

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A. MIRA – BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés

Option : Génie des procédés de l'environnement



**En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie des
Procédés**

Option : Génie des procédés de l'environnement

Présenté par

Mr BELHADDAD Nassim

Mr BENATI Halim

Thème

**Caractérisation des sols et des lixiviats issus de la
décharge BOULIMAT-Bejaia et leurs traitement
par le procédé de stabilisation / solidification**

Les membres du jury :

Président : Mr S. FATMI

M.C.A U.A.M.B

Examineur : Mme K. BOURAS

M.C.B U.A.M.B

Promoteur : Mr K. MOUSSACEB

Professeur U.A.M.B

Co-promoteur: Mr R. SAHNOUNE

Doctorant U.A.M.B

Année Universitaire 2017-2018

Remerciements

En premier lieu nous remercions dieu le tout puissant qui nous a donné la volonté, et la force afin de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier tout d'abord notre promoteur M.MOUSSACEB KARIM pour ses remarques, ses conseils et sa bienveillance, on remercie ainsi notre Co-promoteur M.SAHNOUNE RACHID pour sa patience, et surtout sa confiance, sa disponibilité et ces explications. Qu'ils trouvent ici le témoignage de notre profonde gratitude.

Nous voudrions également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce modeste travail et pour toutes leurs remarques et critiques,

A tous nos enseignants qui nous ont initiés aux valeurs authentiques, en signe d'un profond respect et d'un profond amour !!!

Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, nos plus profonds remerciements vont également à nos familles pour leur soutien moral dans les moments difficiles pendant toutes les étapes de la réalisation de ce travail.

Merci à vous tous

Sommaire

Liste des symboles et sigles	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

CHAITRE I

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Notions et généralités sur les déchets.....	3
I.1.1. Définition du terme déchet.....	3
I.1.2. Types de déchets	3
I.1.3. Composition physico-chimiques des déchets ménagers et assimilés.....	4
I.1.3.1. Composition physique	4
I.1.3.2 Composition chimique.....	5
I.2. Définition des lixiviats de décharges	5
I.2.1 Processus de formation des lixiviats.....	6
I.2.2. Caractérisation de lixiviat.....	7
I.2.3. Composition du lixiviat.....	7
I.3. Généralité sur les sols.....	9
I.3.1 Définition du sol	9
I.3.2 Composition et Propriétés physiques des Sols.....	10
I.3.2.1. Composition des sols.....	10
I.3.2.2. Propriétés physiques des sols.....	12
I.3.2.2.1. Structure des sols.....	12
I.3.2.2.2. Texture.....	12
I.3.2.2.3. Porosité.....	13
I.3.2.2.4. Connectivité.....	13
I.4. Pollution des dols.....	13
I.4.1. Problématique liée aux sols pollués.....	13
I.4.1.1. Pollution organique.....	14

I.4.1.2. Pollution minérale (métaux lourds)...	14
I.4.1.2.1. Les métaux lourds	14
I.4.1.2.2. Sources des métaux lourds.....	15
I.4.1.2.3. Rejets des métaux lourds dans l'eau.....	16
I.4.1.2.4. Toxicité des métaux lourds.....	16
I.4.1.2.5. Métaux lourds dans les sols.....	17
I.4.1.2.5.1. Devenir des métaux lourds dans les sols	17
I.4.1.2.5.2. Comportement des métaux lourds dans les sols	18
I.4.1.2.6. Différents Impacts de la contamination par les métaux lourds.....	19
I.5 Procèdes de traitements des sols contaminés.....	20
I.5.1. Stabilisation/Solidification de déchets dangereux	21
I.5.1.1. Généralités.....	21
I.5.1.2. Stabilisation.....	21
I.5.1.3 Solidification.....	22
I.5.2. Principe de la stabilisation/solidification	22
I.5.3. Mécanismes d'immobilisation des contaminants.....	23
I.5.4. Stabilisation/solidification par des liants hydrauliques.....	24
I.5.4.1. Incorporation de déchets dans les matrices ciment.....	24
I.5.4.2. Liants hydrauliques	24
I.5.4.2.1. Origine des ciments	25
I.5.4.2.2. Type des ciments	25
I.5.4.2.3. Hydratation du ciment portland	26

CHAPITRE II ECHANTILLONAGE, FORMULATIONS ET PROTOCOLESEXPERIMENTAUX

II.1. présentation de site étudié.....	28
II.2. prélèvements des échantillons.....	29
II.3. préparations des échantillons pour l'analyse.....	30
II.3.1. Préparation d'échantillons de lixiviat	30
II.3.2 Préparation des échantillons de boue issue de la filtration des lixiviats.....	31
II.3.3 Préparation des échantillons de sols.....	31
II.3.3.1. Échantillonnage avec un diviseur d'échantillon.....	32
II.4. Caractérisations physico-chimiques	33

II.4.1. Détermination du pH, Norme AFNOR NF X31-103 (1992)...	34
II.4.2. Mesure de la conductivité électrique.....	35
II.4.3. Test TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)....	35
II.4.3.1. Principe et théorie.....	36
II.4.3.2. Mode opératoire (TCLP, EPA 1311)...	36
II.4.4. Dosage des chlorures METHODE DE MOHR.....	36
II.4.4.1. Principe.....	36
II.4.4.2. Mode opératoire.....	37
II.4.4.3. Expression des résultats.	37
II.4.5. Spectrométrie d’Absorption Atomique à flamme (SAA)	37
II.4.5.1. Définition.....	37
II.4.5.2. Principe.....	37
II.4.6. Composition minéralogique par la Diffraction des Rayons X (DRX)...	38
II.4.6.1. Définition.....	38
II.4.6.2. Principe	38
II.4.6.3. Obtention des résultats.....	39
II.4.7. Identification des groupements fonctionnels par la spectrophotométrie infrarouge....	39
II.4.7.1. Définition.....	39
II.4.7.2. Principe.....	39
II.5. Traitement du sol par stabilisation/solidification (s/s).....	41
II.5.1. Stabilisation/Solidification au liant hydraulique (CPA)	41
II.5.1.1. Formulation	41
II.5.1.2. Mise en œuvre.....	42
II.5.2. Détermination des résistances mécaniques.....	43
II.5.2.1. Résistance à la flexion.....	43
II.5.2.2. Résistance à la compression.....	43
II.5.3. Test de lixiviation TCLP et analyse par diffraction au rayon-X.....	44

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Caractérisation des échantillons.....	45
III.1.1. Caractérisation de lixiviat.....	45
III.1.1.1. pH.....	45
III.1.1.2. Conductivité (CE)...	46
III.1.1.3. Teneur en Chlorures.....	47

III.1.1.4. Teneurs en métaux lourds dans le lixiviat.....	48
III.1.2. Caractérisation de la boue issue de la filtration de lixiviat.....	49
III.1.2.1. Résultats de regroupement fonctionnel de la boue issue de filtration des lixiviat....	49
III.1.2.2. Analyse par diffraction des rayons X (DRX) de la boue de la boue issue de filtration des lixiviat	52
III.1.2.3. Teneurs en métaux lourds des boues issues de filtration des lixiviat.....	55
III.2. Caractérisation des éprouvettes stabilisés/solidifiés.....	57
III.2.1. Essais mécaniques.....	57
III.2.2. Composition minéralogique des éprouvettes après S/S	61
III.3. Caractérisation de sol.....	60
III.3.1. Résultats de l'analyse granulométrique.....	60
III.3.1.1. Variation du rendement pondérale en fonction de la granulométrie	60
III.3.1.2. Courbe granulométrique	61
III.3.1.3 Coefficient de HAZEN (coefficient d'uniformité)	62
III 3.1.4. Coefficient de courbure	63
III.3.2. Analyse physico-chimique.....	64
III.3.2.1. Humidité de sol.....	64
III.3.2.2. pH de sol.....	64
III.3.2.3. Conductivité.....	65
III.3.2.4. Teneurs en chlorure.....	65
III.3.2.5. Composition minéralogique du sol.....	66
III.3.2.6. Résultats de la spectroscopie Infrarouge.....	69
III.3.2.7. Résultats des tests de lixiviations	73
III.3.2.7.1. Teneurs en nickel.....	75
III.4. Caractérisation des matériaux stabilisés/solidifiés.....	75
III.4.1. Composition minéralogique des matériaux après S/S	75
III.4.2. Caractérisation de lixiviat obtenu par TCLP après S/S.....	80
III.4.2.1. Teneur en Nickel.....	80
III.4.2.1.1. Taux de rétention du nickel.....	80
Conclusion générale	82
Références bibliographiques	
Annexes	

Dédicaces

*Aux deux personnes les plus importantes au monde,
ma très chère mère et mon
très cher père, qui m'ont toujours aimé, et soutenu
tout au long de ma vie.*

*C'est grâce à eux que je suis arrivé à ce niveau
d'études Je les remercie infiniment pour tous ce qu'ils
ont donnés pour moi et je leurs souhaite une longue
vie pleine de santé*

*À Mes frères et sœurs, qui n'ont cessé d'être pour moi
des exemples de persévérance, de courage et de
générosité.*

*À mes adorables neveux AMINE et AYMEN et mes
nièces NEDJMA, IKRAM et FARAH*

À toute ma famille

À tous mes amis

À toute la promotion génie de l'environnement

À tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

À tous ceux qui me sont chers.

HALIM

DEDICACE

J'ai l'honneur de dédier ce travail :

*À vous les plus chers de ma vie, mes très chers parents, Aucune
dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous
mérites pour tous les sacrifices que vous n'avez cessés de me donner
depuis ma naissance, durant mon enfance. Je vous dédie ce travail en
témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, vous
préserves et vous accordez santé, longue vie et bonheur.*

À la mémoire de mes grands-mères

*À mes chers cousins, Fares, Hakim, Yanis, Smail et Fatah ainsi que
toute ma famille.*

*À mes chers amis, Dahmane, Fares, Mustapha, Walid et Lyes, Bilal,
Hanane avec lesquels j'ai partagé des moments inoubliables, qu'ils
soient assurés de ma profonde amitié et ma profonde sympathie.*

À mon binôme Halim et sa famille

À ceux qui ont marqué ma vie...

...À ceux qui m'ont fait rire quand j'en avais vraiment besoin...

*...À ceux qui m'ont montré les choses positives quand je touchais le
fond...*

NASSIM

LISTE DES SYMBOLES ET SIGLES

Caractères Grecs

θ		Angle d'incidence des Rayons X
λ	(Å)	longueur d'onde des rayons X.
ν	Cm-1	Nombre d'onde

Caractères Latins

A		Absorbance
DBO		Demande Biologique en Oxygène
COD		Carbone Organique Dissous
AGV		Acides gras volatiles
DCO		Demande chimique en oxygène
pH		potentiel Hydrogène
MES		Matière En Suspension
H %		Taux d'Humidité
MO %		Matière organique
CE	μS/Cm	Conductivité électrique
HAP		Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HDP		Hydrocarbures, Diphényles Poly-chlorés
BETX		Benzène/Toluène/Ehyle-benzène/Xylène
p.p.b		Parties par milliard
MPa		Méga pascal
F _f		Charge de rupture
R _f		Contrainte

Sigles

DIB	Déchets Industriels Banals
DIS	Déchets Industriels Banals
CNC	Combustibles Non Classés
INC	Incombustibles Non Classés
DRX	Diffraction des Rayons X
IRTF	Infrarouge à Transformée de Fourier
SAA	Spectroscopie d'Adsorption Atomique
ASTM	American Society for Testing and Materials
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
TCLP	Toxicity characteristic Leaching procedure
AFNOR	Association Française de Normalisation
CPA	Ciments portland artificiel
CPJ	Ciments portland aux ajouts
CHF	Ciments De Hauts Fourneaux
CPZ	Ciments Pouzzolaniques
CLC	Ciments Composés
CNTP	Conditions normales de température et de pression
S/S	Solidification/Stabilisation

Liste des figures

Figure I.1. Les composants du sol..	11
Figure I.2 Devenir des polluants dans les sols.....	18
Figure I.3. Principales interactions entre un atome ou une molécule et un solide à l'interface solide/liquide.	18
Figure I.4 : Parcours possibles des métaux lourds dans le sol.....	20
Figure II .1. Site d'étude (décharge de BOULIMAT).....	28
Figure II.2. Coordonnées de prélèvements.....	29
Figure II.3. Filtration du lixiviat.....	30
Figure II.4. Boue après broyage.....	31
Figure II.5. Séchage du sol à température ambiante.....	31
Figure II.6. Diviseur d'échantillons.....	33
Figure II.7. pH meter « HANNA instruments EC 215 conductivity-meter ».....	34
Figure II.8. Conductimètre « HANNA instruments EC 215 conductivity-meter ».....	35
Figure II.9. Protocole de mise en mode de test de lixiviation des échantillons de sol.....	36
Figure II.10. Principe de fonctionnement de la Spectrométrie d'Absorption Atomique à Flamme (SAA).....	38
Figure II.11. Diffractomètre de rayons X.....	39
Figure II.12. Schéma de principe d'analyse par spectroscopie infrarouge.....	40
Figure II.13. Epruvettes après démoulage.....	42
Figure II.14. Sol après solidification/stabilisation.....	42
Figure III.1 Valeurs des pH des échantillons de lixiviat avant et après filtration.....	45
Figure III.2 Valeurs des conductivités des échantillons de lixiviat avant et après filtration.....	46
Figure III.3 Valeurs de la minéralisation des échantillons de lixiviat avant et après filtration.....	47

Figure III.4	Évolution des teneurs en chlorures en fonction de type d'échantillons.....	47
Figure III.5	Évolution des concentrations du nickel en fonction de type d'échantillons....	48
Figure III.6	Évolution des concentrations du fer en fonction de type d'échantillons.....	49
Figure III.7	Spectre infrarouge de l'échantillon E1 de la boue.....	50
Figure III.8	Spectre infrarouge de l'échantillon E2 de la boue.....	50
Figure III.9	Spectre infrarouge de l'échantillon E3 de la boue.....	50
Figure III.10	Spectre infrarouge de l'échantillon E4 de la boue.....	51
Figure III.11	Spectre infrarouge de l'échantillon E6 de la boue.....	51
Figure III.12	Spectre DRX de l'échantillon E1 de la boue.....	52
Figure III.13	Spectre DRX de l'échantillon E2 de la boue.....	52
Figure III.14	Spectre DRX de l'échantillon E3 de la boue.....	53
Figure III.15	Spectre DRX de l'échantillon E4 de la boue.....	53
Figure III.16	Spectre DRX de l'échantillon E6 de la boue.....	53
Figure III.17	Spectre DRX de l'échantillon E8 de la boue.....	54
Figure III.18	Évolution des teneurs de zinc en fonction de type d'échantillons.....	55
Figure III.19	Évolution des teneurs de plomb en fonction de type d'échantillons.....	55
Figure III.20	Évolution des teneurs de cuivre en fonction de type d'échantillons.....	56
Figure III.21	Évolution des teneurs de fer en fonction de type d'échantillons.....	56
Figure III.22	Évolution des teneurs de nickel en fonction de type d'échantillons.....	56
Figure III.23	Évolution des résistances mécaniques à la compression et à la flexion des éprouvettes.....	58
Figure III.24	Spectre DRX de l'échantillon E1 du lixiviat après S/S.....	58
Figure III.25	Spectre DRX de l'échantillon E2 du lixiviat après S/S.....	59
Figure III.26	Spectre DRX de l'échantillon E3 du lixiviat après S/S.....	59
Figure III.27	Évolution des refus cumulés et des tamisât cumulés des échantillons du sol en fonction des ouvertures des tamis	62
Figure III.28	Evolution du PH des échantillons de sol.....	64
Figure III.29	Résultats de la conductivité des échantillons de sol.....	65
Figure III.30	Évolution des concentrations des chlorures en fonction de type d'échantillons.....	65
Figure III.31	Spectre DRX de l'échantillon E1 du sol.....	66
Figure III.32	Spectre DRX de l'échantillon E2 du sol.....	66
Figure III.33	Spectre DRX de l'échantillon E3 du sol.....	67
Figure III.34	Spectre DRX de l'échantillon E4 du sol.....	67

Figure III.35	Spectre DRX de l'échantillon E5 du sol.....	67
Figure III.36	Spectre DRX de l'échantillon E6 du sol.....	68
Figure III.37	Spectre DRX de l'échantillon E7 du sol.....	68
Figure III.38	Spectre DRX de l'échantillon E8 du sol.....	68
Figure III.39	Spectre infrarouge de l'échantillon E1 du sol.....	70
Figure III.40	Spectre infrarouge de l'échantillon E2 du sol.....	70
Figure III.41	Spectre infrarouge de l'échantillon E3 du sol.....	70
Figure III.42	Spectre infrarouge de l'échantillon E4 du sol.....	71
Figure III.43	Spectre infrarouge de l'échantillon E5 du sol.....	71
Figure III.44	Spectre infrarouge de l'échantillon E6 du sol.....	71
Figure III.45	Spectre infrarouge de l'échantillon E7 du sol.....	72
Figure III.46	Spectre infrarouge de l'échantillon E8 du sol.....	72
Figure III.47	Évolution des teneurs de cuivre en fonction de type d'échantillons.....	73
Figure III.48	Évolution des teneurs de fer en fonction de type d'échantillons.....	73
Figure III.49	Évolution des teneurs de plomb en fonction de type d'échantillons.....	74
Figure III.50	Évolution des teneurs de zinc en fonction de type d'échantillons.....	74
Figure III.51	Évolution des teneurs de nickel en fonction de type d'échantillons.....	74
Figure III.52	Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E4 10%	75
Figure III.53	Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E4 15%	76
Figure III.54	Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E4 20%	76
Figure III.55	Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E4 25%	76
Figure III.56	Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E4 30%	77
Figure III.57	Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E7 10%	77
Figure III.58	Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E7 15%	77
Figure III.59	Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E7 20%	78
Figure III.60	Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E7 25%	78
Figure III.61	Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E7 30%	78
Figure III.62	Évolution de la concentration du nickel dans l'échantillon 4 à 20% après S/S.....	80

Liste des tableaux

Tableau I.1. Composition physique moyenne des déchets ménagers et assimilés (ADEME, 2000).....	5
Tableau I.2. Caractéristiques des lixiviats d'ordures ménagères.	8
Tableau I.3. Composition moyenne d'un lixiviat en phase acidogène et méthanogène (Unités en mg/L sauf pour le pH)	8
Tableau I.4. Classification granulométrique.	10
Tableau I.5. Sources de pollutions par les métaux lourds.	16
Tableau I.6. Les symptômes et maladies causés par les métaux lourds.....	19
Tableau I.7. Les divers résultats de la clinkérisation des matières minérales.	25
Tableau I.8. Proportion des principaux produits d'hydratation du ciment Portland.	27
Tableau II.1. Localisation des prélèvements de lixiviat et de sol.	29
Tableau II.2. Calcul des pourcentages des fractions passantes / refus.	32
Tableau II.3. Différentes analyse effectuées pour la caractérisation des échantillons.....	33
Tableau II.4. Formulation des matériaux S/S.....	41
Tableau II.5. Formulations proposées pour les échantillons de sol.....	41
Tableau II.6. Différentes analyse effectuées sur les matériaux S/S.....	44
Tableau III.1. Résultats des analyses Infra- rouge des échantillons de boue.....	52
Tableau III.2 Phases minéralogiques identifiées dans les échantillons de boue.....	54
Tableau III.3 Phases identifiées pour les matériaux S/S.....	60
Tableau III.4 Les coefficients de courbures et d'uniformités (Cc/Cu).....	63
Tableau III.5 Phases identifiées pour les différents échantillons de sol.....	69
Tableau III.6 Analyse des spectres IR des huit échantillons de sol étudié.....	72
Tableau III.7 Phases identifiées pour les matériaux S/S.....	79
Tableau III.8 Taux de rétention du nickel en (%) dans la matrice cimentaire.....	80

INTRODUCTION GENERALE

La décharge de BOULIMAT dans la ville de Béjaia, comme la majorité des décharges Algériennes, est un dépotoir sauvage à ciel ouvert. Cette décharge non contrôlée et mal exploitée reçoit, chaque jour, des déchets mixtes et de différentes natures ; agricoles, commerciales, industriels, domestiques et hospitaliers, sans traitement préalable. Elle est l'origine d'un lixiviat riches en polluants très variés qui s'infiltré dans le sous-sol. Une grande partie du lixiviat est drainée superficiellement par des cours d'eaux vers la mer. La décharge est implantée sur un cône formé essentiellement de conglomérats. La pente favorise le déplacement des eaux de pluie pénétrant dans les déchets, contribuant ainsi à la formation des eaux de lixiviations qui s'infiltreront à travers les sols.

Parmi les différentes substances polluantes pouvant se retrouver dans les sols suite à diverses activités humaines, les métaux lourds ont reçu une attention particulière en termes d'accumulation dans les sols. Par ailleurs, à l'inverse des contaminants organiques, les métaux lourds ne sont pas dégradés ou éliminés par les mécanismes naturels. En outre, leur temps de résidence dans les sols semble nettement plus grand que dans les autres compartiments de la biosphère (hydrosphère, atmosphère) voire même permanent.

Le sol doit être protégé en tant que ressource naturelle car il contient des substances essentielles au maintien des écosystèmes et des populations humaines, tels les minéraux essentiels, l'eau et les éléments traces.

Face à cette situation précaire et pour une bonne préservation du milieu récepteur, nous essayons au cours de ce travail, d'apprécier le degré de pollution du sol par l'analyse de différents paramètres de caractérisation de ce dernier, et proposer un procédé à base de liant hydraulique, applicable dans le cas de traitement des sols contaminés par les métaux lourds afin de réduire la mobilité de ces derniers.

Pour aboutir à notre objectif, le travail présenté comportera trois grands chapitres :
Le premier chapitre concerne une synthèse bibliographique, essentiellement sur quatre parties:

- La première partie sera consacrée à des généralités sur les déchets contenus dans la décharge
- Dans la deuxième partie on présentera un aperçu sur le lixiviat de la décharge et des généralités sur les sols.

- La troisième partie sera consacrée à l'étude de la pollution du sol et a donné un aperçu général sur les métaux lourds

- Dans la quatrième partie on présentera les différents procédés de traitement des sols et un aperçu sur le procédé de stabilisation /solidification par liant hydraulique.

Alors que le deuxième chapitre, rassemble une présentation du site étudié et l'ensemble des protocoles expérimentaux utilisés au cours de ce travail, ce chapitre est subdivisé en deux parties :

- La première partie sera consacrée à la caractérisation du sol et le lixiviat de la décharge par différentes méthodes d'analyses (SAA, DRX, IR...etc).

- La deuxième partie est dédiée pour le traitement de ces derniers par le procédé de stabilisation/solidification (S/S).

Le dernier chapitre sera destiné à la présentation des résultats obtenus et leurs discussions. Le mémoire s'achève avec une conclusion et des perspectives.

CHAITRE I SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Les déchets, produits par les ménages et par les activités économiques, sont générateurs de nuisances et peuvent être dangereux pour l'homme et la nature. Il est donc essentiel d'en contenir la production et d'en maîtriser le devenir. Le code de l'environnement (Article L541-1 du code de l'environnement) définit le déchet comme "tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon" [01].

I.1. Notions et généralités sur les déchets

I.1.1. Définition du terme déchet

Un déchet est défini comme " Tout résidu d'un processus de production, de transformation, ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon et qui sont de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits ou des odeurs, et d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement " [02].

I.1.2. Types de déchets [03]

➤ Déchets ménagers et assimilés

Ordures ménagères collectées, déchets des espaces et établissements publics, déchets artisanaux et commerciaux, etc.

➤ Déchets agricoles

Déjections animales, résidus de récoltes, sylviculture et transformation du bois.

➤ Déchets industriels

Classés selon leur caractère plus ou moins polluant en trois grandes catégories sont comme suit :

- **Déchets non dangereux dits Déchets Inertes**

Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

Exemples : débris de briques, gravats, tuiles...etc.

- **Déchets non dangereux dits Déchets Industriels Banals (DIB)**

Ils comprennent les déchets de toute nature, dès lors qu'ils ne sont ni inertes, ni dangereux. Ils sont assimilables aux ordures ménagères. Lorsqu'ils proviennent des entreprises, ils sont appelés Déchets Industriels Banals (DIB).

Exemples : papier, cartons, plastique, métaux, bois, déchets verts, ferraille ...etc.

Ils peuvent polluer l'environnement s'ils ne sont pas éliminés convenablement. La combustion de plastique, polystyrène ou tout autre Déchet Industriel Banal peut présenter des risques pour la santé et l'environnement si ils sont pas bien éliminés.

- **Les déchets dangereux dits Déchets Industriels Spéciaux (DIS)**

Ils contiennent des substances dangereuses pour l'homme et pour l'environnement. Leur stockage et leur traitement sont soumis à des règles strictes : sur rétention et à l'abri de la pluie. [03]

Exemples : fixateurs, révélateurs, solvants, chiffons souillés...etc.

I.1.3. Composition physico-chimiques des déchets ménagers et assimilés

I.1.3.1. Composition physique

La connaissance de la composition physique des ordures ménagères et assimilés est indispensable à la bonne gestion de ces derniers. Elle permet le bon choix de la technique de traitement pour une meilleure maîtrise des coûts.

Ces déchets sont répartis selon différentes catégories telles que :

- Les plastiques ;
- Les papiers-cartons ;
- Les putrescibles ;
- Les Combustibles Non Classés (CNC) ;
- Les Incombustibles Non Classés (INC) ;
- Textiles, ...etc. [04]

Les différentes catégories de ces déchets sont illustrées dans le tableau I.1.

Les déchets de taille inférieure à 20 mm représentent 20% de la masse moyenne humide des déchets ménagers. Leur tri a permis de déterminer la présence de 50,5% de déchets putrescibles, de 41,7% d'INC, de 4,5% de verre et de 2,4% de CNC.

Ces valeurs ont été prises en compte lors de la détermination de la composition globale des ordures ménagères [05]. Le tableau I.1 représente la composition physique moyenne des déchets assimilés.

Tableau I.1. Composition physique moyenne des déchets ménagers et assimilés (ADEME, 2000) [05]

Catégories	Masse Humide (%)	Masse Sèche (%)	kg/hab/an
Déchets putrescibles	28,8	15,9	130
Papiers – cartons	25.3	26.9	115
Complexes (Tétra brick)	1.4	1.6	14
Textiles (emballages textiles, autres...)	2.6	3.0	12
Textiles sanitaires (couches, coton hygiénique...)	3.1	1.9	51
Plastiques	11.1	12.7	6
CNC (bois, caoutchouc...)	3.2	3.9	15
Verres	13.1	19.1	60
Métaux (boîte de conserve, plaque de tôle...)	4.1	5.6	19
INC (pierres, gravats...)	6.8	8.9	31
Déchets spéciaux	0.5	0.7	2

Les déchets ménagers sont principalement constitués de putrescibles et de papiers cartons. Ces derniers représentent 55% du poids humide des déchets. Cette composition est variable selon les pays, le site, la période de l'année, le type d'habitat, voire même d'un jour à l'autre sur un même site.

I.1.3.2 Composition chimique

La pollution contenue dans ces déchets est d'origine organique, minérale et métallique. La matière organique est apportée en grande partie par les déchets putrescibles et papiers-cartons (Matière organique non synthétique) et par les plastiques (Matière organique synthétique), la matière minérale par des acides, bains de traitement de surface, sables de fonderies, tant dit que la matière métallique est apportée par les emballages métalliques en acier au en aluminium. [05]

I.2. Définition des lixiviats de décharges

Les lixiviats sont des effluents toxiques issus des centres de stockage des déchets. Ils sont composés de multiples éléments organiques et minéraux. [06]

Le lixiviat est défini comme étant l'eau qui percole à travers les déchets en se chargeant bactériologiquement et chimiquement de substances minérales et organiques c'est « le jus des poubelles et des décharges ». [06]

Les principaux paramètres influençant sur la composition et le comportement du lixiviat sont :

- La composition des déchets enfouis ;
- Leur degré de décomposition ;

- Leur taux d'humidité ;
- L'âge de la décharge.

La production massive de celui-ci engendre des risques de pollution sur les :

- Sols ;
- Rivières ;
- Nappes phréatiques.

Il est donc nécessaire de le collecter et de le traiter avant son rejet dans le milieu naturel. [07]

I.2.1 Processus de formation des lixiviats

Les eaux météoriques s'écoulent à travers la masse des déchets, avec une vitesse et un débit qui dépendent de la porosité, de la perméabilité et de l'épaisseur du milieu.

Elles favorisent la biodégradation des matières organiques fermentescibles et produisent des lixiviats en se chargeant de substances organiques et minérales provenant des déchets ou des produits de la dégradation des déchets.

La formation des lixiviats met en jeu une grande diversité de phénomènes qui joueront plus ou moins en fonction de la nature des déchets, du mode d'exploitation du centre de stockage (hauteur des déchets, surface exploitée, compactage) et de l'infiltration des eaux.

Ces phénomènes peuvent être répartis en deux catégories. [01]

a. Les mécanismes physico-chimiques : évolution du pH, du pouvoir tampon, de la salinité et du potentiel d'oxydo-réduction des solutions percolant à travers les déchets, ces solutions mettent en œuvre des mécanismes chimiques de solubilisation, complexation, oxydo-réduction, adsorption, neutralisation et transfert de matière.

b. Les processus biologiques aérobies et anaérobies qui vont dégrader la fraction organique fermentescible des déchets. Il est admis que le phénomène de biodégradation est à l'origine d'une complexification des réactions qui rend difficile la généralisation de l'ensemble des phénomènes réels. [01]

Tous ces processus sont gouvernés par la présence d'eau au sein du système. D'après **Lefebvre (1998)**, l'humidité des déchets a plusieurs rôles, elle :

- Permet l'hydrolyse de la matière lignocellulosique, principal constituant des déchets organiques, impliquant une consommation de 0,1 gramme d'eau par gramme de cellulose ;
- Est un vecteur de colonisation bactérienne de la surface externe et de la macroporosité des particules solides, et un vecteur de diffusion des enzymes hydrolytiques, des nutriments, des métabolites extracellulaires, de l'oxygène ;

- Constitue 80 % du matériel massique d'un micro-organisme.

I.2.2. Caractérisation de lixiviat

De nombreux facteurs influent sur la quantité et la qualité des lixiviats :

- **Conditions environnementales:** les paramètres climatiques (précipitations, évapotranspiration....etc). Seules, la géologie, l'hydrogéologie et la topographie du site étant maîtrisé puisque le site est choisi selon ces critères ;
- **Nature du déchet**
- **Conditions d'exploitation** : le mode d'enfouissement, la phase d'avancement du site, le matériau de la couverture finale, la couverture végétale.
- **Phénomènes de réactions physico-chimiques et biologiques:** qui s'opèrent dans la masse des déchets et génèrent les lixiviats en fonction de l'âge des déchets. [08]

I.2.3. Composition du lixiviat

Malgré sa complexité, quatre groupes de polluants caractérisent le lixiviat : [05]

- La matière organique dissoute,
- Les composés organiques anthropiques (hydrocarbures aromatiques, phénols, composés aliphatiques chlorés...) – concentration inférieure à 1 mg/L,
- Les composés minéraux majeurs : Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} ...,
- Les métaux lourds (Zn^{2+} , Cd , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} ...), à l'état de traces.

Les principales mesures caractérisant un lixiviat sont la Demande Chimique en Oxygène (DCO), la Demande Biologique en Oxygène (DBO), le Carbone Organique Dissous (COD), l'azote (NTK), le pH, la conductivité, les métaux, ...etc. [05]

Le Tableau I.2 donne les valeurs extrêmes de mesures qui peuvent être retrouvées dans un lixiviat.

Tableau I.2. Caractéristiques des lixiviats d'ordures ménagères. [05]

	Paramètres	Valeurs limites	Unité de mesure
Paramètres globaux	pH	4,5 – 9	/
	Conductivité	2500 - 25000	μS/cm
	COD	30 - 27700	mg C/L
	DBO5	20 - 57000	mg O ₂ /L
	DCO	140 - 90000	mg O ₂ /L
	NTK	14 - 2500	mg N/L
Principaux ions	Ammonium	50 – 1800	mg/L
	Calcium	10 - 7200	mg/L
	Fer	1 - 5	mg/L
	Manganèse	0,03 - 1400	mg/L
	Potassium	50 - 3700	mg/L
	Sodium	70 - 7700	mg/L
	Carbonate	610 - 7320	mg/L
	Chlorure	150 - 4500	mg/L
	Sulfate	8 – 7750	mg/L

Le lixiviat est produit tout au long de la dégradation des déchets. D'après **Wagner & Vasel** (1998), la composition du lixiviat est une photographie de l'état de l'évolution des déchets.

Bon nombre d'auteurs ont étudié la composition d'un lixiviat en phases acidogène et méthanogène sur des déchets enfouis en CSD classiques et n'ayant subi aucun prétraitement. Les gammes de valeurs correspondantes sont données dans le Tableau I.3 :

Tableau I.3. Composition moyenne d'un lixiviat en phase acidogène et méthanogène (Unités en mg/L sauf pour le pH). [05]

Paramètres	Acidogénèse (Ehrig, 1989 Robinson & Gronow, 1993)	Acidogénèse (Kjeldsen <i>et al.</i> , 2002)		Méthanogénèse (Ehrig, 1989 Robinson & Gronow, 1993)	Méthanogénèse (Kjeldsen <i>et al.</i> , 2002)
pH	4,5-7,8	4,5-7,8		6,8-9	6,4-9
DBO5	4000-68000	500-68000		20-1770	0,5-1770
DCO	6000-152000	400-152000		500-8000	1-8000
COT	1010-29000	350-29000		184-2270	14-2270
AGV	963-22414	/		5-146	/
SO4 2-	5-1750	4-2800		5-420	1-1190
Ca2+	10-6240	/		20-600	/
Mg2+	25-1150	/		40-478	/
Fe	20-2300	0,1-2300		1,6-280	0,2-330
Mn2+	0,3-164	/		0,3-45	/
Zn	0,1-140	0,02-200		0,03-6,7	0,005-9
Cu	0,13	0,003-1,1		0,13	0,007-0,6
Cd	0,02	0,002-0,10		0,015	0,0001-0,9
Cr	0,13	0,01-1,5		0,090	0,000-0,7
Ni	0,4	/		0,17	0,036-0,6
Pb	0,28	/		0,2	0,0001-1,9

Selon **Christensen *et al.* (2001)**, en étudiant plusieurs sites ont défini les fourchettes de fluctuations de la composition physico-chimique des lixiviats d'ordures ménagères.

➤ **La fraction minérale** des lixiviats de décharge est constituée essentiellement de chlorures, sulfates, bicarbonates, potassium, sodium et ammonium,

➤ **La fraction organique** est très liée à l'âge des déchets. Si les récentes décharges sont caractérisées par la dominance des acides gras volatiles (AGV) (surtout les acides acétiques, propioniques et butyriques), ce sont des substances assimilées aux composés fulviques et humiques qui sont prépondérantes dans les lixiviats âgés. [06]

I.3. GENERALITE SUR LES SOLS

Les sols sont des systèmes multiphasiques complexes et hétérogènes, composés d'air, d'eau et de solide (sable, limon, argile, matière organique (MO), nutriments, écosystèmes, ...etc.)

En outre, les sols sont des médias ouverts et dynamiques, échangeant de la matière et de l'énergie avec l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère, [09] ils doivent accomplir cinq fonctions principales de base :

- Offrir un habitat physique, chimique et biologique pour les organismes vivants;
- Réguler les flux d'eau, le stockage et le recyclage des cycles des nutriments et d'autres éléments;
- Maintenir les activités et diversités biologiques pour subvenir à la croissance des plantes et la productivité des animaux;
- Filtrer, tamponner, transformer, immobiliser et détoxifier les substances organiques et inorganiques;
- Fournir un support mécanique aux organismes vivants et à leurs structures. [10]

I.3.1 Définition du sol

Horizontalement, le sol est la surface sur laquelle nous évoluons. Il s'étend de façon presque continue à la surface des continents, seulement interrompu par les affleurements rocheux, les cours d'eau ...etc. [11]

Mais la définition du sol ne peut être horizontale, elle est volumétrique, et comprend une dimension verticale fondamentale : le sol s'étend de la roche altérée jusqu'à la surface.

Aussi on peut définir le sol comme Mélange de matière minérale et organique provenant d'Altération physique, chimique et biologique de la roche mère plus l'ajout et l'incorporation de matière organique (plantes, animaux...).[11]

I.3.2 Composition et Propriétés physiques des Sols

I.3.2.1. Composition des sols

➤ Phase solide

Constituée d'une partie minérale (sables, limons, argiles, oxydes et hydroxydes métalliques : 38 % volume, 95 % masse) et d'une partie organique (organismes vivants, débris végétaux et animaux, 12 % volume, 5 % masse) du point de vue minéralogique les constituants solide du sol peuvent être classée en deux groupes : les minéraux primaires et les minéraux secondaires. [12]

La fraction organique est formée de divers organismes vivants (racines, faune du sol) et des résidus organiques à différents stades de leur dégradation (fragment du tissu, des résidus organiques de poids moléculaire élevés). [12]

➤ Phase minérale

Les constituants inorganiques de la phase solide des sols sont des minéraux ; ils constituent l'essentiel de la masse de la majorité des sols à l'exception des sols très organiques. Et qui sont classés par rapport à la distribution de la taille des particules qu'ils renferment. [13] Le tableau I.4 illustre la classification granulométrique.

Tableau I.4. Classification granulométrique.

Désignation	Diamètre des grains (mm)
Blocs erratiques	>200
Cailloux	60-200
Graviers grossiers	20-60
Graviers moyens	6-20
Graviers fins	2-6
Sables grossiers	0.6-2
Sables moyens	0,2-0,6
Sables fins	0,06-0,2
Silts grossiers	0,02-0,06
Silts moyens	0,006-0,02
Silts fins	0,002-0,006
Argiles	<0,002

❖ Phase organique

Elle se compose de deux fractions:

- **Fraction vivante** (micro-organisme, faune épi lithique, animaux fouisseurs). Son influence sur la fixation des éléments trace est importante, elle modifie le potentiel redox ou le pH.

- **Fraction morte** (débris végétaux et animaux plus ou moins décomposés en humus, carbone rapporté).

La matière organique est donc un facteur clef des échanges ioniques et des cycles biochimiques des éléments métalliques. [14]

❖ Phase gazeuse

Le sol est un milieu très poreux (souvent plus de 40 % du sol) ce qui en fait un support exceptionnel pour les êtres vivants. Cette porosité peut être totalement saturée en eau dans le cas des aquifères.

Les sols sont souvent décrits par la répartition granulométrique des constituants minéraux, sa teneur en matières organiques, et par la composition chimique des minéraux, le pH du sol, sa capacité d'échange cationique, etc. [14]

❖ Phase liquide

L'eau est retenue principalement dans les pores ou par interaction avec les minéraux argileux. La quantité d'eau retenue dépend de plusieurs facteurs : la nature des constituants du sol, sa structure et des conditions climatiques (température, humidité...etc.). Elle est donc très variable, à la fois dans l'espace et dans le temps. Cet aspect quantitatif de rétention est complété par un aspect énergétique lié à l'intensité avec laquelle l'eau est retenue à diverses contraintes (pression, gravité) qui déterminent sa mobilité et par conséquent son transport et sa biodisponibilité. [13]

L'eau joue un rôle très important dans tous les phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui se produisent dans le sol. La disponibilité de l'eau dans le sol peut être divisée en quatre niveaux. La figure I.1 illustre les différentes compositions du sol.



Figure I.1. Les composants du sol

I.3.2.2. Propriétés physiques des sols

I.3.2.2.1. Structure des sols

La structure d'un sol est l'assemblage, à un moment donné, de ses constituants solide. La stabilité structurale dépend de la matière organique des sols.

Le complexe argilo-humique joue un rôle structural, ce rôle est plus ou moins important selon les teneurs en eau du sol et varie en fonction du type d'argile. La matière organique augmente la stabilité des agrégats. [15]

Une mauvaise structure peut donc empêcher l'écoulement des eaux dans le sol, les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère. Une bonne structure va assurer une grande facilité de circulation d'eau, donc laisse s'écouler l'excès, assure une bonne aération des racines, une bonne germination, une pénétration profonde des racines et une bonne exploration par les racines des ressources nutritives du sol. [15]

I.3.2.2.2. Texture

La texture du sol est à la base de toutes les autres propriétés, c'est la propriété du sol qui traduit de manière globale la composition granulométrique de la terre fine. [16]

La texture constitue un caractère fondamental du sol, car elle influe sur :

a) Perméabilité du sol à l'eau et à l'air

La perméabilité est indépendante du taux de la matière organique. Le critère retenu pour mesurer la perméabilité est la vitesse de percolation de l'eau exprimée en cm^3/h . Le taux élevé de la matière organique n'implique pas forcément une bonne perméabilité. [17]

Le coefficient perméabilité est exprimé par l'expression suivante :

$$K = \frac{Q}{S} \dots\dots\dots \text{Eq.I.1}$$

Q : Débit d'eau (m^3/h) ; S : Surface d'infiltration (m^2) ; K : coefficient perméabilité (mm/h)

Cependant, son degré de décomposition a une influence sur cette dernière ; plus la matière organique est décomposé, plus la perméabilité est faible et vice-versa.

b) Rétention de l'eau

Sous forme de vapeur ou liquide, l'eau occupe environ un quart du volume d'un sol, quand ce dernier est saturé, l'eau qui percole à travers une tranche du sol le fait sous l'influence de la gravité. [18]

La teneur en air est complémentaire de la teneur en eau, puisque ces deux fluides se partagent l'espace poreux. [19]

I.3.2.2.3. Porosité

La porosité d'un sol est une grandeur physique qui exprime le rapport entre le volume occupé par ses pores et son volume total.

Considérons un échantillon de matériau terreux. Soient v_a le volume total de cet échantillon qui est qualifié d'apparent puisque c'est le volume qui est directement aperçu et v_s le volume occupé par les particules du sol.

La porosité totale θ_t est définie par l'équation Eq.I.2 [13]

$$\theta_t = 1 - \frac{v_s}{v_a} \dots\dots\dots \text{Eq.I.2}$$

I.3.2.2.4. Connectivité

Elle exprime l'importance des connexions entre les pores qui est un déterminant de la continuité de la phase gazeuse, donc de l'écoulement de l'air. [20]

I.4. POLLUTION DES SOLS

I.4.1. Problématique liée aux sols pollués

Mines, usines sidérurgiques, métallurgiques, pétrochimiques, combustions de matière carbonée, usines à gaz, décharges sauvages, traitement du bois, activités domestiques...etc.

Nombreuses sont les activités humaines qui durant des décennies ont rejeté dans l'environnement des quantités importantes de micropolluants, faute de techniques et de réglementation stricte en matière de protection.

Ces micropolluants se sont accumulés au fil du temps au niveau des sols où ils atteignent des teneurs supérieures à celles des fonds géochimiques.

Les hydrocarbures, notamment les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les produits chlorés et les métaux lourds sont les principaux polluants trouvés dans les sols contaminés. [21]

L'attention portée aux pollutions des sols est récente. Pendant longtemps, les sols ont été appréciés pour leurs qualités auto épuratrices: ils jouent un rôle de filtre et d'épurateur pour les substances polluantes en transit. Il n'y avait, en vérité, pas d'analyse approfondie de ce phénomène, mais on considérait que la terre absorbait et digérait tout.

Les activités humaines sont à l'origine d'une augmentation des éléments traces métalliques dans l'atmosphère, le sol et l'eau. Les industries métallurgiques et chimiques ainsi que des pratiques aussi variées que la combustion d'énergies fossiles ou l'épandage d'engrais, de pesticides et de boues de stations d'épurations dans les champs apportent dans la biosphère des quantités importantes de métaux. Où le processus de transfert des métaux dans le sol est régi par deux principaux phénomènes les précipitations (pluie, neige) et l'irrigation :

- ❖ Une partie est évacuée par évaporation ou ruissellement de surface ;
- ❖ Une partie pénètre dans le sol.

Et se dirige alors soit vers les racines des plantes, ou vers les horizons profonds et les nappes phréatiques.

Au cours de ces transports, l'eau se charge en éléments en traces dissous. Ce transfert d'éléments en traces d'un point à un autre du sol (en l'espèce des horizons de surface aux horizons profonds) a lieu soit par :

- ✓ Advection lorsque les éléments se déplacent à la même vitesse et selon les mêmes trajectoires que la masse d'eau,
- ✓ Diffusion lorsque le déplacement est retardé, le circuit est complexe. [22]

La pollution se présente sous forme de poussières atmosphériques précipitées par les pluies ou sous forme de rejet direct au sol. Deux types de pollution ont été déterminés, à savoir :

I.4.1.1. Pollution organique

Les polluants organiques renferment une large gamme de composés qui peuvent être classés selon :

- **Leur origine** (pesticides, carburants, explosifs, résidus de l'industrie pétrolière, déchets issus de la production de coke, ...etc.),
- **Leur structure chimique** (hydrocarbures, diphényles poly-chlorés (HDP), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), benzène/toluène/éthyle-benzène/xylène (BETX), dioxines...etc.)
- **Leur propriétés chimiques ou physiques** (liquides non aqueux, composés organiques volatiles).

I.4.1.2. Pollution minérale (métaux lourds)

I.4.1.2.1. Les métaux lourds

On appelle métaux lourds les éléments métalliques naturels dont la masse volumique dépasse 5 g/cm³. Ceux-ci sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces : mercure, plomb, cadmium, cuivre, arsenic, nickel, zinc, cobalt, manganèse.

Les plus toxiques d'entre eux sont le plomb, le cadmium et le mercure ; Ainsi, tous les métaux sont plus ou moins solides à la température ordinaire, il n'y a que le mercure qui fasse exception ; ce métal ne peut se solidifier qu'à une température de (- 40°). [23]

- ✓ **Les métaux essentiels:** sont des éléments indispensables à l'état de trace pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques.

Certains peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil. C'est le cas du cuivre (Cu^{2+}), du nickel (Ni^{2+}), du zinc (Zn^{2+}), du fer (Fe^{2+}). Par exemple, le zinc (Zn^{2+}), à la concentration du millimolaire, est un oligo-élément qui intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques (déshydrogénases, protéinase, peptidase) et joue un rôle important dans le métabolisme des protéines, des glucides et des lipides.

✓ **Les métaux toxiques :** ont un caractère contaminant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration. Ils n'ont aucun effet bénéfique connu pour la cellule. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg), du cadmium (Cd).

Le terme métaux lourds, implique aussi une notion de toxicité. Le terme « éléments traces métalliques » est aussi utilisé pour décrire ces mêmes éléments, car ils se retrouvent souvent en très faible quantité dans l'environnement. Dans ce contexte, nous utiliserons le terme « métaux lourds » dans le sens de l'impact toxique sur les humains et l'environnement. [24]

I.4.1.2.2. Sources des métaux lourds

a) Sources naturelles

Parmi les importantes sources naturelles, citons l'activité volcanique, l'altération des continents et les incendies de forêts. La contribution des volcans peut se présenter sous forme d'émissions volumineuses dues à une activité explosive, ou d'émissions continues de faible volume, résultant notamment de l'activité géothermique et du dégazage du magma. [25]

b) Sources anthropiques

Les métaux provenant d'apports anthropiques sont présents sous des formes chimiques assez réactives et entraînent de ce fait, des risques très supérieurs aux métaux d'origine naturelle qui sont le plus souvent immobilisés sous des formes relativement inertes. [26]

Les sources anthropogènes sont les suivantes:

- ✓ Activités pétrochimiques ;
- ✓ Utilisation de combustibles fossiles (centrales électriques au charbon, chaudières industrielles, fours à ciment...);
- ✓ Transport (véhicules et moteurs routiers et non routiers, embarcations) ;
- ✓ Incinération de déchets ;
- ✓ Produits (interrupteurs électriques, amalgames dentaires, éclairages fluorescents)
- ✓ Déchets urbains (eaux usées, boues d'épuration, ordures ménagères), agricoles.

Le tableau.I.5 présente quelques exemples de sources de pollutions par les métaux lourds.

Tableau I.5. Sources de pollutions par les métaux lourds. [23]

Métaux	Sources de polluants
Cadmium (Cd)	Engrais phosphatés; industries de traitement de surface des métaux; industrie de stabilisation des matières plastiques; fabrication des accumulateurs et des radiateurs automobiles; fabrication de colorants.
Cuivre (Cu)	Fils électriques; radiateurs automobiles; appareils de chauffage; traitements de surface
Zinc (Zn)	Produits pharmaceutiques ou domestiques; conduites d'eau; peintures; piles; galvanisation; traitements de surface.
Zinc (Zn)	Produits pharmaceutiques ou domestiques; conduites d'eau; peintures; piles; galvanisation; traitements de surface.
Nickel (Ni)	Fabrication d'aciers et d'alliages spéciaux; recouvrement de surface par électrolyse; hydrogénation des huiles et substances organiques; fabrication de peintures; et de produits cosmétiques
Mercure (Hg)	La fabrication et l'usage de catalyseurs; de fongicides; de pigments et composés mercuriels; les piles au mercure; la fabrication de chlore par électrolyse sur cathode de mercure; le traitement des minerais non ferreux; l'incinération de déchets et la combustion du charbon
Chrome (Cr)	L'extraction de la chromite, minéral de fer et de chrome; la métallurgie ; la technologie des matériaux réfractaires et l'industrie de traitement de surface.
Plomb (Pb)	La fabrication de batteries; peintures; additifs pour l'essence; industries pharmaceutiques et sidérurgiques; ateliers photographiques; télévisions
Arsenic (As)	L'extraction, le transport et le traitement métallurgique ; les rejets urbains ; la combustion du charbon ; production de trioxyde d'arsenic pour les pesticides en agriculture et les traitements des bois

I.4.1.2.3. Rejets des métaux lourds dans l'eau

Pendant de nombreuses années, les industries situées à proximité de cours d'eau ont rejeté leurs effluents dans ceux-ci. À ce phénomène (de plus en plus limité par l'installation de station d'épuration au sein même des sites industriels), il faut ajouter l'érosion et le ruissellement de l'eau sur les sols et chaussées.

L'eau constitue un élément fondamental en matière de pollution, puisque dans le cas des métaux, comme pour d'autres composées. L'eau transporte les métaux lourds, et les inserts dans les chaînes alimentaires (algues, poisson, etc.). Même si les métaux lourds sont les plus souvent présents à l'état de traces, ils n'en restent pas moins très dangereux, puisque leur toxicité se développe par bioaccumulation dans l'organisme. [27-28]

I.4.1.2.4. Toxicité des métaux lourds

La toxicité des métaux lourds a conduit les pouvoirs publics à réglementer les émissions en fixant des teneurs limites. Cette réglementation n'est cependant d'aucun secours pour déterminer sans ambiguïté une liste de métaux à surveiller car la liste varie selon les milieux considérés : émissions atmosphériques, rejets dans l'eau, règles sur l'épandage des boues ou la

mise en décharge,...etc. Le quart de la contamination par les métaux lourds est dû aux ordures ménagères (piles au cadmium, batteries au plomb, cuivre et zinc des pesticides, ...etc.). [29]

La toxicité des métaux lourds n'est plus à démontrer. La toxicité du mercure est par exemple connue depuis l'Antiquité. La plupart du temps, les effets toxiques des métaux lourds concernent le système nerveux, le sang ou la moelle osseuse. Ils sont généralement cancérogènes. [30]

I.4.1.2.5. Métaux lourds dans les sols

Parmi la variété de polluants du sol, les métaux lourds posent un problème particulier dans la mesure où ils sont non biodégradables : ils s'accumulent donc dans le sol tant que perdure la source de contamination ; cette période peut durer plusieurs dizaines d'années. Ajoutons que la toxicité des métaux lourds, connue depuis l'Antiquité pour certains d'entre eux, a été tragiquement illustrée au XXe siècle par plusieurs catastrophes telle que celle de Minamata (Japon) dans les années 50, qui ont motivé l'étude des effets de ces éléments sur l'environnement et sur la santé. [31]

I.4.1.2.5.1. Devenir des métaux lourds dans les sols [32]

On a recours à deux notions :

- **Mobilité**: d'un élément caractérise son aptitude à passer d'un compartiment du sol où il est retenu avec une certaine énergie à un autre, où il est retenu avec une moindre énergie. Plus une substance se déplace dans le sol, plus elle sera susceptible d'être absorbée par un organisme vivant.
- **Biodisponibilité** : qui est l'aptitude d'un élément à passer d'un compartiment quelconque du sol dans un être vivant, (bactérie, végétal, animal ou homme), le plus souvent via la solution du sol.

En fonction de la mobilité de l'élément considéré, celui-ci va s'accumuler préférentiellement dans tel ou tel horizon du sol et avoir un effet différent sur les plantes, qui puisent leurs ressources à travers leurs racines bien au-delà de l'horizon de surface, et sur les organismes du sol. La figure I.2 dans la page suivante illustre le devenir des polluants dans le sol.

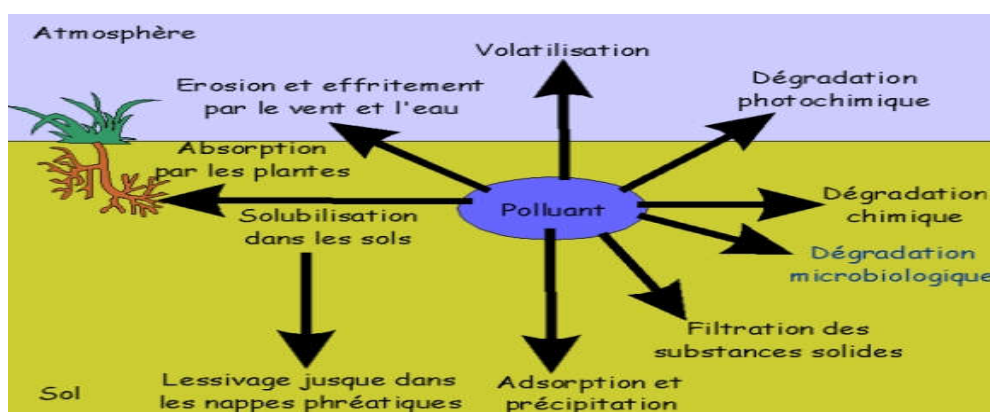


Figure I.2. Devenir des polluants dans les sols [33]

I.4.1.2.5.2. Comportement des métaux lourds dans les sols

- ✓ Les associations des métaux aux différents constituants du sol, peuvent être diverses:
- ✓ Inclusion dans les réseaux cristallins des minéraux primaires et secondaires;
- ✓ Adsorption sur les phases hydroxylées du fer (Fe^{2+}), aluminium (Al^{3+}), magnésium (Mn^{2+})

Complexations ou inclusion dans les macromolécules organiques ;

- ✓ Echange ionique avec les surfaces des minéraux argileux et des matières organiques.
- ✓ Présence sous une forme soluble, colloïdale ou particulaire dans la solution du sol. [34]

La répartition des métaux dans les différentes phases du sol évolue au cours du temps ; les éléments passent d'une forme à l'autre, en permanence, mais avec des vitesses variables, sous l'influence de facteurs externes. L'ensemble des réactions subies par le métal modifie, en augmentant sa mobilité ou au contraire en participant à sa rétention (adsorption ou précipitation), le transport de l'élément à travers le sol. [35] La figure I.3 représente les différentes associations des métaux aux différents constituants du sol.

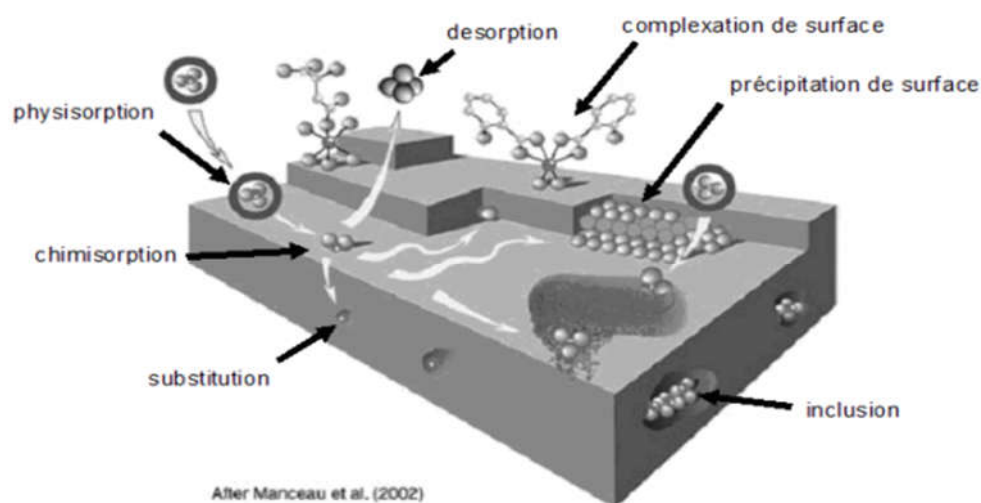


Figure I.3. Principales interactions entre un atome ou une molécule et un solide à l'interface solide/liquide. [36]

I.4.1.2.6. Différents Impacts de la contamination par les métaux lourds

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

a) Sur la santé humaine

Les plus toxiques pour l'homme sont notamment, le cadmium, le mercure, le chrome et le plomb. Il est ainsi distingué une toxicité aiguë (absorption en forte dose sur un court laps de temps) et une toxicité chronique (absorption à faible dose sur temps plus long).

Quand le sol est contaminé par les métaux, s'y accumulent puis pénètrent dans les plantes que les animaux consomment ensuite, l'homme y compris.

Pour l'homme, l'inhalation de poussières et d'aérosols reste la principale source d'intoxication, mais les risques liés à l'absorption de métaux lourds par ingestion d'eau ou de nourriture ne sont toutefois pas négligeables. [37] Le tableau I.6 représente les maladies et les symptômes causés par les métaux lourds

Tableau I.6. Les symptômes et maladies causés par les métaux lourds [38]

Métal	Maladies organiques	Effets neurologiques et psychiatriques
Aluminium	Douleurs articulaires, décalcification des os, anémie	Démence, Alzheimer, Parkinson, Encéphalopathie avec des perturbations de mémoire, de concentration et de mobilité
Arsenic	Diabète de type 2	Atteintes au système nerveux, menant à des faiblesses, surdité, paresthésies, psychoses organiques avec somnolence, troubles, stupeur, délires
Cadmium	Lésions rénales et pulmonaires, fragilisation des os, anémies, augmentation du risque de cancer en cas d'inhalation	Aucune référence trouvée à ce stade
Mercure	Lésions du cerveau, maladies auto- immunes (arthrite, lupus, sclérose en plaques), maladies cardiovasculaires (hypertension et autres), cancer du foie	Diminution de l'intelligence, troubles de la parole, agitation, agressivité, troubles visuels et auditifs, poly-neuropathie, myasthénie grave, Alzheimer
Nickel	Allergies, dermatites, eczémas	Maux de tête, vertiges, manque de sommeil
Plomb	Effets hématologiques et cardiovasculaires (hypertension), atteintes rénales	Dépressions allant jusqu'au suicide, manque d'attention, atteinte à l'intelligence visuelle et aux fonctions motrices, troubles de mémoire, difficultés d'apprentissage, états de fatigue, agitation, agressivité.

b) Sur l'environnement

La complexité et la difficulté du contrôle des émissions des métaux lourds dans l'environnement résultent de la diversité des sources de rejets, de leur importance quantitative et, de leur toxicité, se traduit par une approche quantitative et qualitative du rejet. [39]

À l'état de trace, la plupart des métaux considérés comme toxiques sont en fait indispensables à la vie, de ce fait le contrôle des émissions des métaux lourds dans l'environnement doit se référer à une échelle de toxicité. Ils sont dangereux pour les systèmes vivants car :

- Ils ne sont pas dégradables au cours du temps ;
- Ils ne sont toxiques à de très faibles concentrations ;

Ils ont tendance à s'accumuler dans les organismes vivants et à se concentrer au cours des transferts de matière dans les chaînes trophiques. [40] La figure I.4 représente l'organigramme du parcours possibles des métaux lourds dans le sol

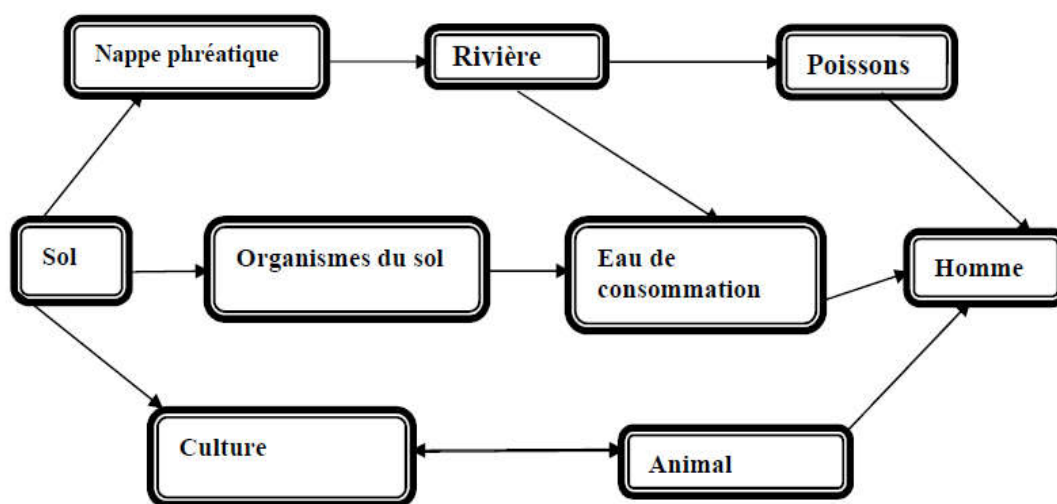


Figure I.4. Parcours possibles des métaux lourds dans le sol

I.5 PROCÉDES DE TRAITEMENTS DES SOLS CONTAMINÉS

Les procédés de traitement des sols ont pour objectif de supprimer ou diminuer à un niveau tolérable le niveau de risque de ces sols contaminés.

Parmi ces techniques, certaines visent à immobiliser la pollution, d'autres à l'extraire ou à la détruire. On les classe généralement en trois familles : les traitements physiques, chimiques et biologiques.

a) Traitements physiques : consistent soit à immobiliser les polluants, soit à apporter de l'énergie par voie thermique, mécanique ou électrique pour les dégrader ou les extraire. Ils comprennent notamment le confinement, la stabilisation, l'incinération, la désorption thermique, le pompage, la volatilisation (ou venting).

b) Traitements chimiques : mettent en jeu un réactif pour dégrader ou extraire la pollution. Il s'agit par exemple d'oxydation, de réduction, de lavage par solvants ou tensioactifs.

c) Traitements biologiques : quant à eux, sont basés sur l'action d'organismes vivants (micro-organismes, plantes) par exemple Le compostage et méthanisation. [41]

I.5.1. Stabilisation/Solidification de déchets dangereux

I.5.1.1. Généralités

Les techniques de Stabilisation se différencient principalement par la nature organique ou minérale des réactifs employés. Des additifs peuvent éventuellement être ajoutés afin de compléter l'action des liants. La Stabilisation regroupe plusieurs techniques telles que la vitrification, la fixation physique, la fixation chimique et la solidification qui peuvent ou non être associées. [42]

La stabilisation/solidification des déchets vise :

- la réduction de la solubilité des polluants : transformation des éléments sous forme peu solubles et/ou modification du contexte physico-chimique ; [43]
- la limitation de l'interface entre le déchet et le milieu environnant :

Solidification des déchets sous formes de monolithes massifs et peu perméables, la réactivité du matériau est alors limitée par les transferts de masse. Trois types de procédés de stabilisation/solidification ont alors été élaborés : [43]

- les procédés à haute température : le déchet est solidifié par sa fusion en présence d'éventuels additifs, le solidifié est constitué d'une matrice vitreuse ou cristalline ; [43]
- les procédés à basse température (110 à 250°C) : le déchet est mélangé à un liant thermoplastique ou thermodurcissable. Le déchet est alors enrobé dans une matrice imperméable ; [43]
- Les procédés à froid : mélange du déchet avec un liant minéral (hydraulique ou pouzzolaniques), le déchet est à la fois stabilisé du fait des interactions chimiques avec le liant et solidifié par son intégration dans un mortier. [43]

I.5.1.2. Stabilisation

Elle se traduit par une fixation chimique des polluants. Elle désigne l'ensemble des mécanismes permettant de mettre les polluants contenus dans le résidu sous une forme stable, peu soluble et peu mobilisable par l'environnement. [44]

I.5.1.3 Solidification

Elle se traduit par la transformation du résidu traité (pulvérulent, pâteux, granuleux...) en une matrice peu poreuse et peu perméable, par réaction (ou non) avec un ou plusieurs réactifs intervenants dans le procédé.

La solidification, si elle est dissociée d'une stabilisation peut être considérée comme une encapsulation, qui pour principal effet de limiter l'interface entre le sol et le milieu, autrement dit le piégeage mécanique de polluée, donc de réduire le passage en solution des polluants, tant que la structure du matériau reste intégrée.

Elle a en outre pour effet, si bien que le sol traité se présente sous la forme d'un solide selon les techniques employées. [45]

I.5.2. Principe de la stabilisation/solidification

La stabilisation/solidification (S/S) est une technique de réhabilitation non destructive qui a pour but de réduire la mobilité de contaminants présents dans un sol contaminé ou toutes autres matières résiduelles dangereuses (boues, sédiments, matières radioactives,...etc.). [22] Elle comporte divers techniques dont on peut citer :

➤ Les plus répandus :

- Le procédé Stabilisation/Solidification à base des liants hydrauliques ; [46]
- Le procédé Neutrec par SOLVAY ; [47]
- La vitrification. [48-49]

➤ Les moins répandus :

- Le procédé Tredi-Ash. [50]

Contrairement à plusieurs autres techniques, celle-ci ne permet pas d'extraire ou d'éliminer les contaminants, mais plutôt d'empêcher leur migration dans l'environnement.

Les objectifs à accomplir par le procédé S/S sont :

- Réduire la mobilité ou la solubilité des contaminants;
- Améliorer la maniabilité et les caractéristiques physiques du sol en produisant un solide sans liquide en phase libre;
- Réduire les surfaces exposées par lesquelles les contaminants pourraient lixivier.

[51]

Afin de créer un monolithe de sols contaminés qui respectera les objectifs demandés. [52]

De son côté, la stabilisation inclut tous les mécanismes visant à convertir les contaminants sous des formes moins solubles, mobiles ou toxiques. [53] Cette conversion est essentiellement obtenue à l'aide de réactions chimiques telles la précipitation/dissolution, l'oxydation/réduction ou la sorption chimique. [54]

La stabilisation et la solidification sont deux mécanismes d'immobilisation distincts qui interviennent différemment selon les procédés de S/S utilisés. Ainsi elle permet outre la solidification, la réduction de la surface de contact entre le déchet et l'environnement.

Elle agit ainsi comme élément de stabilisation du déchet dans la mesure où, en réduisant l'interface déchet-environnement, elle réduit la mobilité de ses contaminants. [53]

I.5.3. Mécanismes d'immobilisation des contaminants

Les mécanismes d'immobilisation sont nombreux, mais on peut les regrouper sous deux catégories :

- ✓ Les mécanismes physiques ;
- ✓ Les mécanismes chimiques.

La prédominance de l'un par rapport à l'autre dépend de plusieurs facteurs, dont la nature des agents de liaison, des additifs ou des contaminants. Parmi les mécanismes les plus importants, on retrouve l'encapsulation, la sorption, l'oxydation/réduction et la précipitation/dissolution. [54]

a) Encapsulation

Il s'agit donc d'un mécanisme d'immobilisation physique qui consiste en un confinement des sols et de leurs contaminants dans des capsules formées par des agents de liaison. [55]

Lors du durcissement des liants, la matrice de liaison agit comme une barrière imperméable et empêche la migration des contaminants hors des sols, que ce soit sous forme solide, liquide ou gazeuse.

b) Sorption

La sorption est un mécanisme d'immobilisation qui peut être chimique ou physique. En S/S, les contaminants sous phase aqueuse peuvent être attirés par les particules d'un sol, d'un agent de liaison ou d'un additif.

Cette attraction résulte en une accumulation du contaminant à la surface d'une particule (adsorption) ou à l'intérieur de celle-ci (absorption). [52]

c) Oxydation/réduction

En contamination des sols, certains métaux sont plus susceptibles aux réactions d'oxydation/réduction tels l'arsenic, le sélénium, le chrome, le mercure et le plomb. [56] L'état d'oxydation est donc une caractéristique à considérer puisque l'intervention pour une décontamination variera selon la forme du métal. [57]

d) Dissolution/précipitation

Dans les sols, on peut retrouver les contaminants sous différentes formes. Une modification de l'environnement par l'ajout de liants ou d'additifs peut changer les limites de saturation en contaminants de l'eau, ce qui se traduit par leur précipitation ou leur dissolution.

Les métaux traces sont particulièrement sensibles à cette situation. [58-59] En S/S, on s'intéresse surtout au pH du sol comme indicateur des conditions environnementales.

Lorsque le pH se situe entre 7 et 11, la solubilité est généralement à son minimum. [56]

Par contre, les métaux amphotères ou oxyanioniques ont également tendance à se solubiliser avec une augmentation du Ph. [60]

Ainsi, l'ajout d'un liant alcalin pourrait causer une dissolution des métaux non solubilisés et augmenter leur risque de lixiviation dans l'environnement. [54]

I.5.4. Stabilisation/solidification par des liants hydrauliques

I.5.4.1. Incorporation de déchets dans les matrices ciment

L'incorporation de déchets dans les matrices ciment induit des perturbations dans l'hydratation, et peut avoir des conséquences sur les propriétés physiques et chimiques de la matrice. [61-62]

L'ajout d'un déchet dans un mortier peut avoir des conséquences non négligeables sur l'hydratation du coté de :

- ✓ La maniabilité avec l'augmentation de la teneur en déchets ;
- ✓ Le temps de prise peut être multiplié ;
- ✓ La résistance à la compression et la porosité finale du matériau sont très sensibles au taux de déchet incorporés en substitution du sable dans ces mortiers. [62]

I.5.4.2. Liants hydrauliques

Les liants hydrauliques sont des matériaux minéraux finement broyés qui « prennent » en présence d'eau pour former, après durcissement, une matière solide poreuse : c'est la prise hydraulique qui est due aux réactions d'hydratations des composés du ciment.

Les matériaux ainsi obtenus conservent leur résistance, même sous l'eau. Le ciment est dit Portland, du fait de l'analogie de sa composition avec celle de la pierre de Portland.

Il est constitué principalement de clinker, résultant du broyage d'un mélange de roches calcaires et argileuses puis de la cuisson jusqu'à fusion partielle (vers 1450°C). [63]

Le ciment est une poudre dont on peut mesurer la masse volumique absolue, la granulométrie, et la surface spécifique. La masse volumique absolue varie de 2.90 à 3.20 (g/cm³) suivant les constituants du ciment. L'intervalle granulaire va de 0 à 200 µm.

La détermination de la surface spécifique est une façon de mesurer la réactivité des ciments elle est d'environ 3000 cm²/g. Plus la surface spécifique est grande, plus il y a de grains fins et plus le ciment réagit vite. [64]

I.5.4.2.1. Origine des ciments

Du fait de l'analogie de sa composition avec celle de la pierre de Portland, est le plus courant. Il est constitué principalement de clinker, résultant de la cuisson jusqu'à fusion partielle (vers 1450°C) puis du broyage d'un mélange de roches calcaires et argileuses.[39]

I.5.4.2.2. Type des ciments

On distingue les différents types de ciments comme suit:

✓ **CPA-CEM I** :(le ciment portland artificiel) contiennent du clinker et au maximum 5 % de constituants secondaires ;

✓ **CPJ-CEM II** :(Ciment Portland Composé) contiennent du clinker (65-94 %) et jusqu'à 35 % de constituants principaux (calcaire, schiste calciné, cendres volantes, pouzzolane naturelle, laitiers de haut-fourneau, fumées de silice) ;

✓ **CHF-CEM III** :(Ciments De Hauts Fourneaux) contiennent du clinker (5-64 %) et de fortes teneurs (36 à 95 %) de laitiers de haut-fourneau ; [65]

✓ **CPZ-CEM IV** :(Ciments Pouzzolaniques) contiennent de 11 % à 55 % d'ajouts pouzzolaniques (fumées de silice, pouzzolanes, cendres volantes) ;

✓ **CLC-CEM V** :(Ciments Composés), contiennent du laitier (18-50 %) et des pouzzolanes et cendres volantes siliceuses (18-50 %). [66]

Le mélange complexe des matières minérales introduites dans le four à clinkérisation aboutit après cuisson à des solutions solides dérivées des phases minéralogiques figurant dans le tableau I.7. [66]

Tableau I.7. Les divers résultats de la clinkérisation des matières minérales. [41]

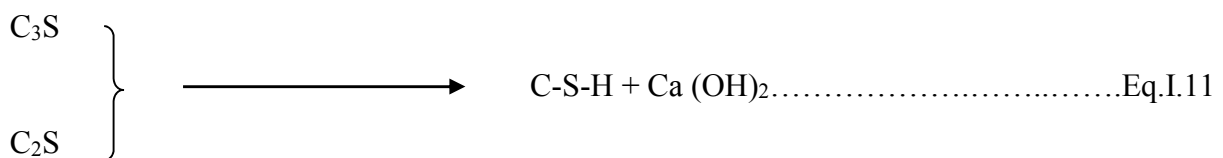
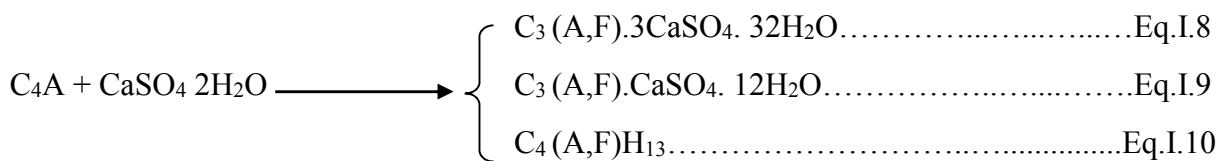
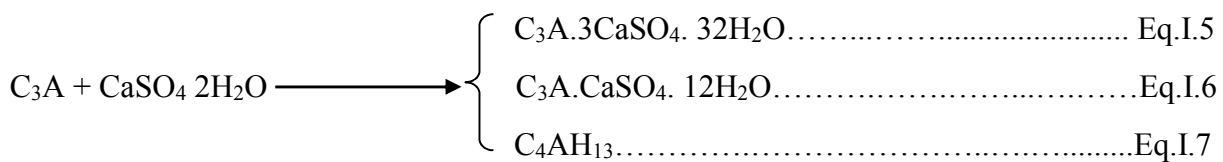
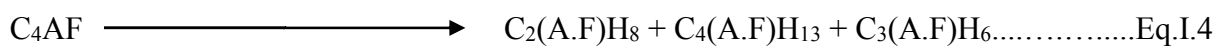
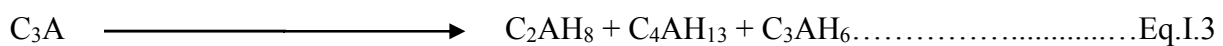
Constituant et Notation	Alite C ₃ S	Bélite C ₂ S	Célite I C ₃ A	Célite II C ₄ AF
Formule Chimique	3CaO.SiO ₂	2CaO.SiO ₂	3CaO.Al ₂ O ₃	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃
Proportion dans le clinker	(50-70) %	(15-30) %	(5-10) %	(5-15) %
Rôle dans l'hydratation, la prise et le durcissement du ciment	Prise initiale et contribution à la résistance initiale	résistance au-delà d'une semaine	dégagement de chaleur lors de l'hydratation, prise rapide en l'absence de gypse	diminution de la température de clinkérisation, hydratation rapide mais faible contribution à la résistance

I.5.4.2.3. Hydratation du ciment portland

Le mélange du ciment Portland et de l'eau s'apparente à un système dispersé constitué d'un réseau de particules dans une phase aqueuse.

Les atomes de ces particules (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) présentent des liaisons insaturées qui, au contact de l'eau, sont le siège ou l'origine de nombreuses réactions d'adsorption, d'hydrolyse, de dissolution, de solvation ou de cristallisation.

Les mécanismes d'hydratation sont résumés ci-après par les évolutions des principaux constituants. [67]



Les aluminates C_3A et C_4AF réagissent, formant immédiatement des hydrates d'aluminates de calcium (3 et 4). Lorsque des sulfates (issus du gypse) entrent en solution, ils réagissent avec ces aluminates pour les envelopper d'hydrates de sulfoaluminates de calcium appelés ettringite (5 et 8).

Ce dernier composé, très peu soluble dans la solution basique de gypse, ralentit l'hydratation des grains de ciment. Quelques heures après l'ajout de l'eau, la quantité de sulfates de calcium disponible est faible, l'ettringite réagit alors avec les aluminates de calcium (C_3A) et se transforme en mono sulfates (6 et 9).

Le C_3A réagit avec de l'eau et de l'hydroxyde de calcium pour former des aluminates de tétra-calcium (7 et 10). Après quelques jours, très peu d'ettringite subsiste. [68]

Parallèlement aux premières réactions des aluminates, les silicates s'hydratent, plus lentement. Les principaux produits d'hydratation sont au nombre de deux : un gel de silicate de calcium hydraté, la tobermorite encore désignée par C-S-H selon sa composition stœchiométrique approximative, et l'hydroxyde de calcium cristallisé appelé portlandite (11). Le durcissement, la résistance et quelques autres propriétés du ciment hydraté sont principalement dus au gel C-S-H.

En résumé, l'hydratation du ciment conduit à l'obtention de trois types de produits dont les proportions sont rapportées dans le tableau I.8. [69]

Tableau I.8 : Proportion des principaux produits d'hydratation du ciment Portland.

Constituant	Sulfo-aluminates de calcium ettringite et mono-sulfates	Tobermorite C-S-H	Portlandite $Ca(OH)_2$
Proportion dans le ciment hydraté	(20-30) %	(50-70) %	(5-15) %

CHAPITRE II. ECHANTILLONAGE, FORMULATIONS ET PROTOCOLESEXPERIMENTAUX

Notre étude c'est focalisée sur le sol de la décharge sis à BOULIMAT-Bejaia, elle comporte initialement une étude sur les lixiviat rejetés vers l'environnement

Afin de mener cette étude à terme, nous avons utilisés différentes techniques et méthodes d'analyses de caractérisation des lixiviats et de sol, par suite on a procédé au traitement par stabilisation/solidification par liant hydraulique.

II.1. PRESENTATION DE SITE ETUDIE

La région de Bejaïa est marquée par la prépondérance des reliefs montagneux (65%), coupé par l'oued de la Soummam et les plaines situées près du littoral, à savoir, du côté :

- **Nord** : le massif de Bouhatem et le massif du Djurdjura.
- **Sud** : le massif de Bousselam et des bords.
- **Centre** : la vallée de la Soummam.

Notre étude est faite sur la décharge de Boulimat qui couvre une superficie de 200,000 m² et qui se situe à 15km de chef-lieu de la wilaya de Bejaïa, et qui est délimitée du coté :

- **Nord** : la méditerranée,
- **Sud** : la commune d'Oued-Ghir
- **Ouest** : la commune de Toudja
- **Est** : la commune de Bejaïa. [70]



Figure II.1. Site d'étude (décharge de BOULIMAT)

II.2. PRÉLÈVEMENTS DES ÉCHANTILLONS

L'échantillonnage se définit comme une procédure dans laquelle une portion de substance, de matériau ou de produit est prélevée pour fournir un échantillon représentatif, pour les besoins de l'analyse. L'échantillonnage ayant en général un but bien précis, la stratégie de prélèvement doit toujours être adaptée aux objectifs de l'étude. [71]

Notre échantillonnage a été effectué au niveau de la décharge sauvage d'ordures ménagères situées à Boulimat Bejaia. Après décaissage à la pelle et évacuation des 5 premiers centimètres, huit prélèvements de la couche de surface sur une profondeur de 30 à 45 cm ont été effectués au niveau du sol, ainsi que huit prélèvements de lixiviat dans les mêmes endroits. Les points de prélèvements sont représentés sur la figure II.2. et le tableau II.1.

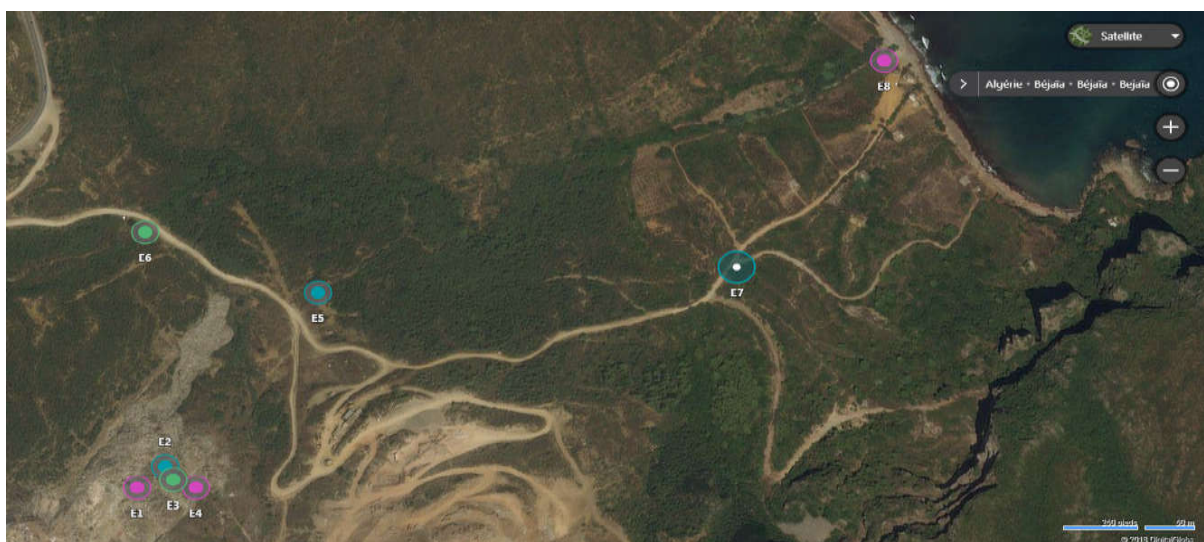


Figure II.2. Coordonnées de prélèvements

➤ Localisation des prélèvements

Tableau II.1. Localisation des prélèvements de lixiviat et de sol.

Repaire (point de prélèvement)	Localisation géographique	
	Latitude (N) °	Longitude (E) °
E1	36.78914	5.00757
E2	36.78933	5.00790
E3	36.78918	5.00799
E4	36.78910	5.00826
E5	36.79126	5.00972
E6	36.79194	5.00767
E7	36.79153	5.01468
E8	36.79386	5.01635

II.3. PREPARATIONS DES ECHANTILLONS POUR L'ANALYSE

II.3.1. Préparation d'échantillons de lixiviat

Les échantillons de lixiviat d'environ 2L ont été filtré sur du papier filtre afin d'éliminer les particules en suspension avant de les analyses.

- **Filtration**

La filtration est une technique de séparation utilisée pour isoler un solide contenu dans une solution ou pour éliminer des impuretés solides présentes dans une solution. Le liquide s'écoule librement sous l'action de son propre poids à travers le filtre. [72]

- **Mode opératoire**

Lixiviat récupéré est versé lentement sur du papier filtre déposé sur un entonnoir afin de faciliter la récupération du filtrat dans des bouteilles, le résidu solide retenu est destiné au séchage. La filtration est illustrée dans la figure II .3



Figure II.3. Filtration du lixiviat

- **Acidification :**

Lixiviat récupéré dans la décharge est chargé en matières organiques ce qui rend la minéralisation de l'échantillon une étape importante avant l'analyse.

L'acidification des échantillons est faite par l'ajout de 2 ml d'acide Nitrique (65%) pour chaque tube a essai destiner à l'analyse (SAA) afin de libéré les métaux lourds. La mesure des concentrations en métaux dans chaque échantillon est réalisée par spectroscopie d'absorption atomique (SAA).

II.3.2 Préparation des échantillons de boue issue de la filtration des lixiviats

Les boues récupérée après filtration ont été séché dans des étuves a une température de 80 C° pendant 24h, et broyer a un diamètre inférieur à 9 mm afin d'être lixivier et analyser. La boue broyée est illustrée dans la figure II.4.



Figure II.4. Boue après broyage

II.3.3 Préparation des échantillons de sols

Après réception des échantillons au laboratoire, le sol est étalé en couche mince pendant 20 jours à température ambiante. Le sol est ensuite tamisé sur une maille inférieure à 2 mm. La conservation des échantillons se fait ensuite dans des sacs en polyéthylène avant les préparations pour analyses. Le séchage est illustré dans la figure II.5



Figure II.5. Séchage du sol à température ambiante

Avant d'opter a une granulométrie par tamisage l'échantillon doit être préparé mécaniquement afin de pouvoir réaliser le tamisage, cette préparation est bien :

- **Le concassage** : l'échantillon doit avoir un diamètre inférieur à 2 mm.
- **Le broyage** : C'est une opération qui consiste à réduire les dimensions des grains de la matière première à une granularité assez fine.

- **L'homogénéisation** : C'est un procédé mécanique qui consiste à mélanger l'échantillon de manière à le rendre homogène. [73]

➤ Principe de la Granulométrie par tamisage

Le principe de cette manipulation consiste à prendre un échantillon de sol séché et de le verser dans une colonne de tamis classés dans l'ordre décroissant des ouvertures selon la norme AFNOR. La pesée des refus des tamis permet de tracer les courbes granulométriques afin de déterminer la granulométrie du sol.

➤ Calcul

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

Tableau II.2. Calcul des pourcentages des fractions passantes / refus.

Ouverture des tamis (mm)	Echantillon	Masse des refus partiels R_i (g)	Masse des refus cumulés R_n (g)	Pourcentage des refus cumulés $R_n / P_s \cdot 100 \%$	Pourcentage des tamis cumulés $100 - (R_n / P_s) \%$
2		m_1	$m_1 = m'_1$	$R_1 = 100 * (m'_1 / M)$	$T_1 = 100 - R_1$
1		m_2	$m'_1 + m_2 = m'_2$	$R_2 = 100 * (m'_2 / M)$	$T_2 = 100 - R_2$
0,5		m_3	$m'_2 + m_3 = m'_3$	$R_3 = 100 * (m'_3 / M)$	$T = 100 - R_3$
0,25		m_4	$m'_3 + m_4 = m'_4$	$R_4 = 100 * (m'_4 / M)$	$T_4 = 100 - R_4$
0,125		m_5	$m'_4 + m_5 = m'_5$	$R_5 = 100 * (m'_5 / M)$	$T_5 = 100 - R_5$
0,063		m_6	$m'_5 + m_6 = m'_6$	$R_6 = 100 * (m'_6 / M)$	$T_6 = 100 - R_6$
<0,063		m_7	$m'_6 + m_7 = m'_7$	$R_7 = 100 * (m'_7 / M)$	$T_7 = 100 - R_7$

M : masse totale de l'échantillon

II.3.3.1. Échantillonnage avec un diviseur d'échantillon

Afin d'obtenir un échantillon représentatif correspondant à la composition de la quantité total nous avons opté pour le diviseur d'échantillon automatique rotatif.

➤ Principe :

La matière à diviser est versée dans une trémie d'alimentation décentrée puis directement répartie dans les orifices de la couronne. Même si la granulométrie de la matière à diviser est plutôt grossière, les fractions obtenues dans les flacons à échantillons diffèrent très peu les uns des autres

La vitesse de rotation de la couronne est contrôlée et maintenue constante, la matière chargée est répartie uniformément entre les flacons à échantillons. [74] le diviseur est illustré dans la figure II.6.en page suivante.



Figure II.6. Diviseur d'échantillons

II.4. CARACTERISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

➤ Méthodes d'analyse

Les différentes analyses physico-chimiques effectuées pour la caractérisation des échantillons sont illustrées dans le tableau II.3

Tableau II.3. Différentes analyse effectuées pour la caractérisation des échantillons

Paramètre	Matériel et réactifs	Type d'échantillons analysé
pH	pH mètre de marque « HANNA cal-check PH mètre HI 221 », [75]	Lixiviat et sol
Dosage des chlorures	Méthode de Mohr. [80]	Lixiviat et sol
Conductivité	Conductimètre de marque « HANNA instruments EC 215 conductivity meter ». [78]	Lixiviat et sol
Dosage du zinc, nickel, cadmium, plomb, fer et cuivre	Spectrophotométrie d'adsorption atomique (SAA). [82]	Lixiviat, boue et sol
Détermination de la composition minéralogique	Diffraction des Rayons X. [85]	Boue et sol
Identification des groupements fonctionnels	Spectrophotométrie infrarouge. [83]	Boue et sol

II.4.1. Détermination du pH, Norme AFNOR NF X31-103 (1992) [75]

a) Lixiviat

Le pH est la mesure de l'activité de l'ion hydrogène dans lixiviat. C'est l'un des paramètres les plus fréquemment mesurés dans le domaine de l'analyse de la solution compte tenu de son importance dans la plupart des équilibres physico-chimiques.

➤ Principe

Le principe de la mesure du pH est le même pour toutes les analyses. La mesure du pH est réalisée à l'aide d'un pH-mètre à une température avoisinant les 20°C. Elle est basée sur une réaction mettant en jeu les ions H_3O^+ libres d'une solution (**Amiot et Britten, 2002**).

Notre mesure a été effectuée par un pH mètre de marque « HANNA cal-check pH mètre HI 221 » Un étalonnage correct du pH-mètre et du système d'électrodes de pH est essentiel pour obtenir des résultats fiables et Hanna a développé un nouveau système qui surveille les deux paramètres les plus importants pendant le processus d'étalonnage, l'électrode de pH et la solution tampon. [76]

b) Boue et Sol

Le pH fait partie d'une des plus importantes caractéristiques physico-chimiques des sols, et donc la mobilité et la biodisponibilité des éléments traces métalliques sont liées à sa valeur. Le pH est défini par la relation: [77]

$$pH = -\log H + \dots\dots\dots \text{Eq.II.1}$$

Où : H^+ $\Rightarrow$ l'activité des ions d'hydrogène en solution.

➤ Mode opératoire

$10 \pm 0,005$ g de sol sont mis en suspension dans $50 \pm 0,1$ ml d'eau distillée, agités pendant 1 heure sur une plaque d'agitation, puis laisser au repos pendant 2 heures, et ensuite filtrée. Le pH est mesuré au repos sur le filtrat à l'aide d'un pH-mètre de marque « HANNA cal-check pH mètre HI 221 » l'appareil est illustré dans la figure II .7



Figure II.7. pH meter « HANNA instruments EC 215 conductivity-meter ».

II.4.2. Mesure de la conductivité électrique

La conductivité électrique est une mesure qui donne une approximation de la concentration des sels solubles présents dans l'échantillon.

a) Lixiviat

Notre mesure a été effectuée par un conductimètre de marque « HANNA instruments EC 215 conductivity-meter ». L'appareil est illustré dans la figure II.7



Figure II.8. Conductimètre « HANNA instruments EC 215 conductivity-meter ».

b) Boue et Sol

➤ Principe

La norme utilisée est la NF X 31-113 qui est basée sur l'extraction des sels solubles dans l'eau d'un échantillon, dans des conditions bien définies et dans un rapport sol sec/eau égal à 1/5 (m/m). Deux électrodes en platine maintenues en parallèle dans une colonne d'extrait aqueux de sédiment permettent de mesurer le courant conduit par les ions présents.

➤ Mode opératoire

On pèse 10 g d'échantillon de sol préparé pour essai qu'on transvase dans un flacon en polyéthylène, on y ajoute 50 ml d'eau distillée, on ferme le flacon et on le place dans un agitateur mécanique à mouvement horizontal, et on agite pendant 30 min. Après filtration, on mesure la conductivité de la solution obtenue. [78]

II.4.3. Test TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)

La Lixiviation est un procédé qui est utilisé pour l'évaluation de la mobilité des espèces inorganiques afin d'évaluer si un résidu industriel est considéré comme une matière lixiviable selon l'article 3 du Règlement sur les matières dangereuses.

Ce protocole de lixiviation peut également être utilisé pour déterminer la solubilité d'espèces inorganiques dans d'autres guides publiés par le ministère de l'Environnement du Québec. Ce protocole est tiré de la méthode EPA 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP). [39]

II.4.3.1. Principe et théorie

Le principe des tests de lixiviation est de :

- Déterminer les phénomènes de fixation des contaminants ;
- Comprendre les mécanismes de leurs relargage ;
- Détermination du principal agent susceptible de véhiculer les éléments toxiques vers

l'environnement est l'eau. [39]

II.4.3.2. Mode opératoire (TCLP, EPA 1311)

Le solide est broyé à une grosseur inférieure à 9,5 mm. Par la suite, il est mis en contact avec la solution de lixiviation (rapport solide-liquide de 1 : 20) et agité pendant 18 heures à la température ambiante. [39]

➤ Préparation de la Solution de lixiviation du test TCLP

Dans un ballon de 1 litre contenant environ 500 ml d'eau, verser 5,7 ml d'acide acétique. Puis peser précisément 2,572 g d'hydroxyde de sodium et le verser dans le ballon.

Compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée. Le pH de cette solution doit être $4,93 \pm 0,05$. [79] Le protocole de mise en mode de test de lixiviation des échantillons est illustré dans la figure II.7



Figure II.9. Protocole de mise en mode de test de lixiviation des échantillons de sol

II.4.4. Dosage des chlorures METHODE DE MOHR

II.4.4.1. Principe

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition d'une teinte rouge caractéristique du chromate d'argent. [80]

II.4.4.2. Mode opératoire

On introduit 100 ml de solution à analyser (préalablement filtrée si nécessaire), puis on ajoute 2 à 3 gouttes d'acide nitrique pur et une pincée de carbonate de chaux et 3 gouttes de solution de chromate de potassium à 10 %. On verse alors au moyen d'une burette un volume V de la solution de nitrate d'argent jusqu'à apparition d'une teinte rougeâtre, qui doit persister pendant 1 à 3 minutes. [81]

II.4.4.3. Expression des résultats

$$[\text{Cl}^-] = V_{\text{AgNO}_3} \times 3.55 \times 10 \dots\dots\dots \text{Eq.II.2}$$

Où:

$[\text{Cl}^-]$: Concentration de chlore en (mg/l) ;

V_{AgNO_3} : Volume de nitrate d'argent (AgNO_3) en ml. [81]

NB : Les dosages des chlorures sont réalisés pour les échantillons de lixiviats et les échantillons de sols après lixiviation.

II.4.5. Spectrométrie d'Absorption Atomique à flamme (SAA)

II.4.5.1. Définition

C'est une méthode d'analyse physico-chimique qualitative qui englobe une large gamme d'applications en particulier la chimie minérale. Elle permet de doser plus de soixante-dix (70) éléments, métalliques et non métalliques, à l'état de trace (p.p.m) et même d'ultra traces (p.p.b). [82]

Cette méthode est basée sur la mesure de l'absorbance des atomes à l'état ionisé, soumis à une lumière de longueur d'onde spécifique de l'élément à doser. [83]

II.4.5.2. Principe

La figure II.8 en page suivante présente le principe de fonctionnement de la Spectrométrie d'Absorption Atomique à flamme (SAA) où le faisceau lumineux issu de la source (1) traverse la chambre d'absorption (flamme ou four) (2) dans laquelle l'élément se trouve porté à l'état atomique, avant d'être focalisé sur la fente d'entrée d'un monochromateur (3) qui sélectionne un intervalle très étroit de longueur d'onde. Le trajet optique se termine sur la fenêtre d'entrée du détecteur (4). [83] On mesure ainsi l'affaiblissement du rayonnement.

Les longueurs d'onde et les intensités énergétiques absorbées sont fonctions de la nature et de la concentration de l'élément. Ce qui nous permet de déceler (analyse qualitative) et/ou de doser (analyse quantitative) les éléments. [84]

Absorption = Atome fondamental + $h\nu$ absorbé $\rightarrow$ Atome excité.

Où A est l'absorbance de l'échantillon à l'état de vapeur atomique. [82]

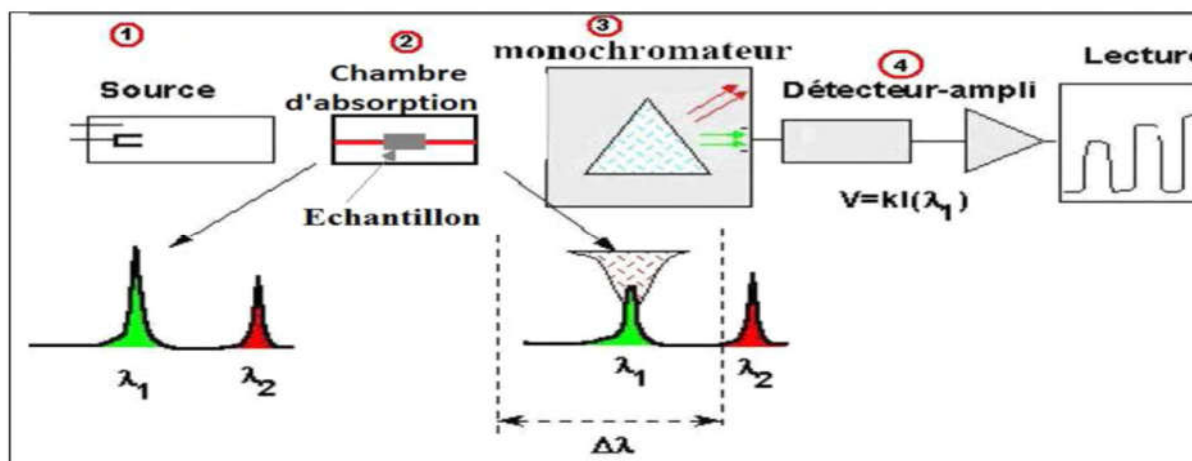


Figure II.10. Principe de fonctionnement de la Spectrométrie d’Absorption Atomique à Flamme (SAA).

NB : l’analyse par Spectrométrie d’Absorption Atomique est réalisée pour les échantillons de lixiviats et ceux des boues et sols après lixiviation.

II.4.6. Composition minéralogique par la Diffraction des Rayons X (DRX)

II.4.6.1. Définition

La diffraction des rayons X renseigne sur la structure du solide, la nature des éléments qui le composent, la maille cristalline et ses paramètres, les positions cristallographiques des atomes dans le solide, les distances interatomiques, angles de liaisons et le degré d’ordre.

Cette technique permet l’obtention de diffractogrammes Intensités diffractées/angle de diffraction, signature caractéristique de la structure cristalline analysée. [85]

II.4.6.2. Principe [86]

La diffraction des rayons X est une technique très utilisée pour identifier la nature et la structure des produits cristallisés (cristaux, minéraux, argiles...etc.) du fait que leurs atomes sont arrangés selon des plans cristallins spécifiques. Le principe de la méthode repose sur la diffraction des rayons X par une famille de plans réticulaires (hkl) favorablement orientés sous un angle θ par rapport au faisceau incident, l’illustration est dans la figure II.9 en page suivante.

Ceci se traduit dans le diffractogramme, représentant l'intensité en fonction de l'angle de diffraction θ , par l'observation de raies à partir desquelles peuvent être déterminées les distances réticulaires d_{hkl} , caractéristiques d'un composé cristallin donné, à l'aide de la loi de Bragg. [86]

Où λ est la longueur d'onde du faisceau de rayons X incident. L'indexation des différents pics de diffraction du diagramme de rayons X permet de déterminer les phases cristallines

présentes en se référant aux fiches ASTM (American Society for Testing Materials) appelées aussi JCPDS. [86]

II.4.6.3. Obtention des résultats

L'identification se fait manuellement (on indexant les pics) ou automatiquement en utilisant des logiciels d'identification et les banques de données de références ASTM.

Les différents anneaux correspondent aux pics obtenus avec le diffractomètre. Ils indiquent une valeur de distance réticulaire. [87] Les difficultés d'application de la méthode diffractométrique sont liées à :

- ❖ La nécessité de prélever et mettre suffisamment de matière dans le port substrat, pour qu'elle soit représentative;
- ❖ La présence de plusieurs produits: les mélanges sont toujours difficiles à analyser car les « pics » caractéristiques peuvent se confondre. [87]

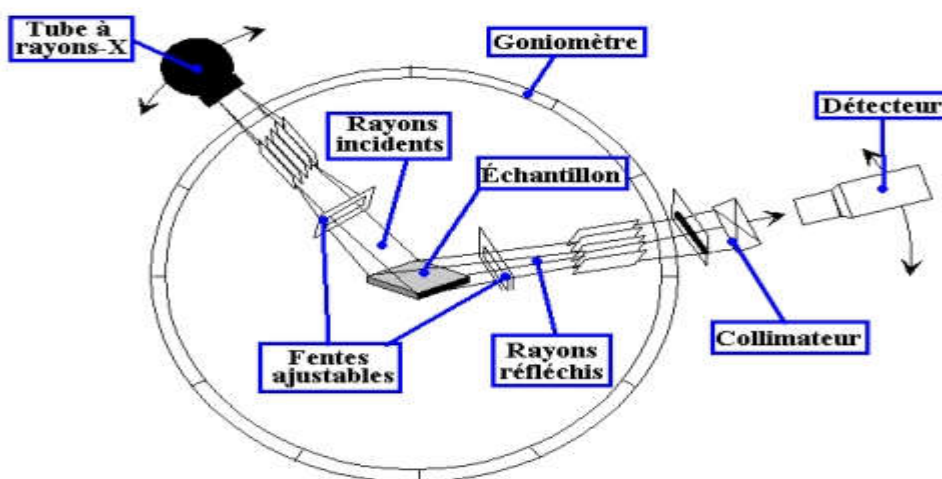


Figure II.11. Diffractomètre de rayons X. [88]

NB : l'analyse par la Diffraction des Rayons X est réalisée pour les échantillons de boue et ceux de sol.

II.4.7. Identification des groupements fonctionnels par la spectrophotométrie infrarouge

II.4.7.1. Définition

La spectrophotométrie infrarouge est une méthode d'analyse qualitative, sensible aux énergies de vibration des liaisons moléculaires. C'est une méthode d'analyse des environnements locaux quel que soit l'état physique du système étudié. [83]

II.4.7.2. Principe

Dans les conditions normales de température et de pression (CNTP), les atomes et les groupements fonctionnels constituant la matière, sont animés de mouvements vibratoires. Si ces

constituants sont exposés à un rayonnement électromagnétique dont la fréquence est proche de celle de l'une ou l'autre de leurs fréquences de vibrations propres, ils entrent en résonance, empruntant pour ce faire, de l'énergie dans le faisceau incident. Il y a alors absorption d'énergie. [89]

Cette technique est basée sur l'absorption par les matériaux des rayonnements électromagnétiques (dans le domaine de l'infrarouge) qui vont entraîner des mouvements de vibrations des liaisons chimiques. [90]

Les vibrations mises en jeu sont de deux types : les vibrations de valence et les vibrations de déformation.

L'utilisation de la spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier permet d'examiner de faibles quantités de matériaux argileux. [90]

La figure II.10 représente le principe d'analyse par spectroscopie infrarouge. Le domaine infrarouge, dans lequel se trouvent les énergies de vibration des liaisons moléculaires, est divisé en trois zones. [89]

- **Proche infrarouge** : $\lambda = 0,8 \text{ à } 2,5 \text{ } \mu\text{m}$ (ou $\nu = 4000 \text{ à } 12500 \text{ cm}^{-1}$) ;
- **Moyen infrarouge** : $\lambda = 2,5 \text{ à } 25 \text{ } \mu\text{m}$ (ou $\nu = 400 \text{ à } 4000 \text{ cm}^{-1}$) ;
- **Lointain infrarouge** : $\lambda = 25 \text{ à } 1000 \text{ } \mu\text{m}$ (ou $\nu = 10 \text{ à } 400 \text{ cm}^{-1}$). [91]

L'analyse IR s'effectue sur des pastilles de KBr fabriquées en respectant les proportions suivantes : 80% de KBr et 20 % de matériau finement broyé.

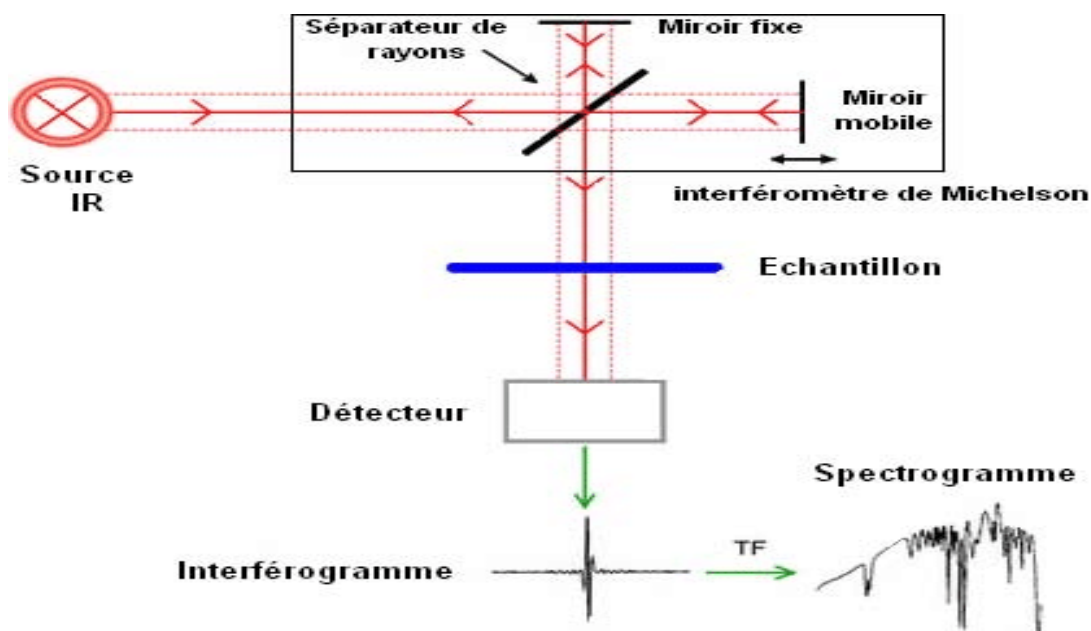


Figure II.12. Schéma de principe d'analyse par spectroscopie infrarouge.

NB : l'analyse par la spectroscopie infrarouge est réalisée pour les échantillons de boues et ceux des sols.

II.5. TRAITEMENT DU SOL PAR STABILISATION/SOLIDIFICATION (S/S)

Le choix d'une technologie de traitement de sol et de lixiviat contaminés dépend toujours des besoins et des circonstances du projet étudié (quantités, concentrations en contaminants, budget, échéancier, réglementations, etc.). L'utilisation d'un procédé de S/S au ciment sera généralement motivée par la présence d'une forte concentration en métaux ou d'autres éléments inorganiques dans les sols. Bien entendu, l'utilisation de ce type de procédé est régie par une réglementation stricte, surtout si une revalorisation des sols traités est envisagée (remblai, matériaux de construction, etc.) plusieurs méthodes sont utilisées. [39]

II.5.1. Stabilisation/Solidification au liant hydraulique (CPA)

II.5.1.1. Formulation [92]

La première étape dans la mise au point du procédé de Stabilisation/Solidification est le choix des constituants. Nous avons choisi un procédé à base de liants hydrauliques, donc à base de ciment et d'eau.

La quantité d'eau est un paramètre important pour l'obtention d'une matrice la plus performante possible. On a opté pour le meilleur compromis, entre une quantité d'eau suffisante pour une bonne maniabilité de la pâte, et pas trop élevée pour éviter d'augmenter la porosité avec un rapport (eau/ciment) $E/C = 0.3$.

Les formulations finales sont présentées dans les tableaux II.4 et II.5

Tableau II.4 Formulation des matériaux S/S

Échantillon	T (jour)	M _C (g)	V _L (ml)
E1	14	500	150
E2	14	500	150
E3	14	500	150

M_C : Masse du ciment, V_L : Volume de Lixiviat

Pour les formulations de sol on a utilisé le rapport $\frac{E}{(S+C)} = 0,35$ d'où le tableau II.5 présente les formulations proposées pour les échantillons de sol

Tableau II.5 formulations proposées pour les échantillons de sol

		10%	15%	20%	25%	30%	Masse total
E 4	Ms (g)	180	170	160	150	140	200
	Mc (g)	20	30	40	50	60	
	Ve (ml)	70	70	70	70	70	
E 7	Ms (g)	180	170	160	150	140	200
	Mc (g)	20	30	40	50	60	
	Ve (ml)	70	70	70	70	70	

Avec : Ms : masse solide, Mc : masse ciment, Ve : Volume de l'eau

II.5.1.2. Mise en œuvre

a) Mise en œuvre pour lixiviats

Les constituants (ciment et lixiviats) sont introduits dans un malaxeur, est mélanger pendant 5 minutes environ. Le mélange est coulé dans des moules rectangulaires en acier de dimension ($4*4*16\text{ cm}^3$) puis stocké dans des moules à une température ambiante.

Au bout de 14 jours de cure, les éprouvettes sont démoulées afin de subir des essais de caractérisation, tel que l'analyse par diffraction au rayon-X et le test de lixiviation TCLP.

[53-93], les éprouvettes après démoulage sont illustrées dans la figure II .13.



Figure II.13 Epreuves après démoulage

b) Mise en œuvre pour le Sols

Le sol sec plus le ciment sont introduit dans un malaxeur, dans l'ordre des masses décroissantes, puis malaxés pendant une à deux minutes. Le mélange est étalé sur des sacs en plastique puis arroser avec de l'eau a des volumes différents, au bout de 14 jours les formulations vont subir des essais de caractérisation, tel que la DRX et le test de lixiviation TCLP. [94] Les formulations sont illustrées dans la figure II.14



Figure II.14 Sol après solidification/stabilisation

II.5.2. Détermination des résistances mécaniques

Après une cure de 14 jours, les éprouvettes de dimension 4*4*16 cm³ ont subis des tests mécaniques selon la norme EN 196-1.

➤ Principe

La résistance mécanique est mesurée selon la norme (EN 196-1) cette norme européenne décrit une méthode de détermination des résistances à la compression et à la flexion d'un mortier de ciment.

La norme classe les ciments suivant leur résistance normale à 2, 14 et 28 jours. La résistance normale du ciment est la résistance à la compression mesurée sur mortier normalisé conservé à 20°C conformément à la norme EN 196 - 1. Elle s'exprime couramment en MPa ou N/mm². [92]

II.5.2.1. Résistance à la flexion

L'essai de rupture par flexion est effectué sur une éprouvette prismatique de (4*4*16 cm³) en mortier placé sur deux rouleaux distant de 100 mm. On actionne la presse qui va appliquer une charge progressive, continue et sans chocs à vitesse constante sur l'éprouvette jusqu'au moment de rupture.

Ensuite, on enregistre les résultats de la charge de rupture F_f et de la contrainte R_f correspondantes. Cette contrainte est appelée résistance à la flexion et si F_f est exprimée en (N), R_f est exprimée en (MPa).

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f}{b^3} \dots \dots \dots \text{Eq.II.3}$$

Avec :

- R_f : Résistance à la flexion, en newtons par millimètre carré;
- b : Côté de la section carrée du prisme, en millimètres;
- F_f : Charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

II.5.2.2. Résistance à la compression

L'essai consiste à placer l'extrémité du monolithe, de chaque éprouvette obtenu après rupture par flexion, dans la machine d'essai à la compression entre deux plaques d'acier.

A l'aide de la presse on presse l'éprouvette à vitesse constante, en lui appliquant une charge progressive jusqu'à rupture de l'éprouvette.

On lit sur l'afficheur de la presse la charge de rupture F_c et la contrainte de rupture R_c . Cette contrainte est appelée résistance à la compression et si F_c est exprimée en (N), R_c est exprimée en (MPa). [92]

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \dots \dots \dots \text{Eq.II.4}$$

- R_c : Résistance à la compression, en newtons par millimètre carré;
- F_c : Charge maximale à la rupture, en newtons.

II.5.3. Test de lixiviation TCLP et analyse par diffraction au rayon-X

L'efficacité du traitement du sol par le procédé S/S est défini par deux paramètres: la formation de monolithes de sol et de leur tenue mécanique, et par la résistance à la lixiviation des contaminants. [95] Dans le but de vérifier l'efficacité de procédé de S/S nous avons refait le test TCLP pour comparer les teneurs en métaux relargués avant et après S/S ainsi que l'analyse par diffraction au rayon-X sur matériaux S/S.

Les différentes analyses physico-chimiques effectuées pour la caractérisation des échantillons après stabilisation / solidification sont illustrées dans le tableau II.6

Tableau II.6. Différentes analyse effectuées sur les matériaux S/S

Paramètre	Matériel et réactifs	Type d'échantillons analysé
Dosage des métaux	Spectrophotométrie d'adsorption atomique (SAA)	Lixiviat et sol
Détermination de la composition minéralogique	Diffraction des Rayons X	lixiviat et sol
Détermination des résistances mécaniques	Machine de traction mécanique	lixiviat

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'objectif de ce travail est d'arriver à une connaissance approfondie du milieu, (pH, conductivité, teneur en espèces métalliques, granulométrie,...etc.), afin d'identifier des grandeurs utiles pour le traitement par stabilisation/solidification dans le cas d'une contamination par les métaux lourds. Pour cela nous avons procédé à la caractérisation de nos huit échantillons (sol et lixiviat).

La première étape de notre étude concerne une caractérisation physico-chimique la plus large possible du sol et lixiviat, qui a aboutis à trois échantillons de lixiviat et deux échantillons de sol contaminés.

III.1. CARACTÉRISATION DES ÉCHANTILLONS

III.1.1. Caractérisation de lixiviat

III.1.1.1. pH

Le pH est l'un des facteurs les plus importants qui influent sur la réactivité des métaux dans les eaux. Le pH de l'eau mesure la concentration des protons H^+ contenus dans l'eau. Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acide carbonique et il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates. [96] La figure III.1 présente les résultats du pH mesuré sur les échantillons de lixiviat.

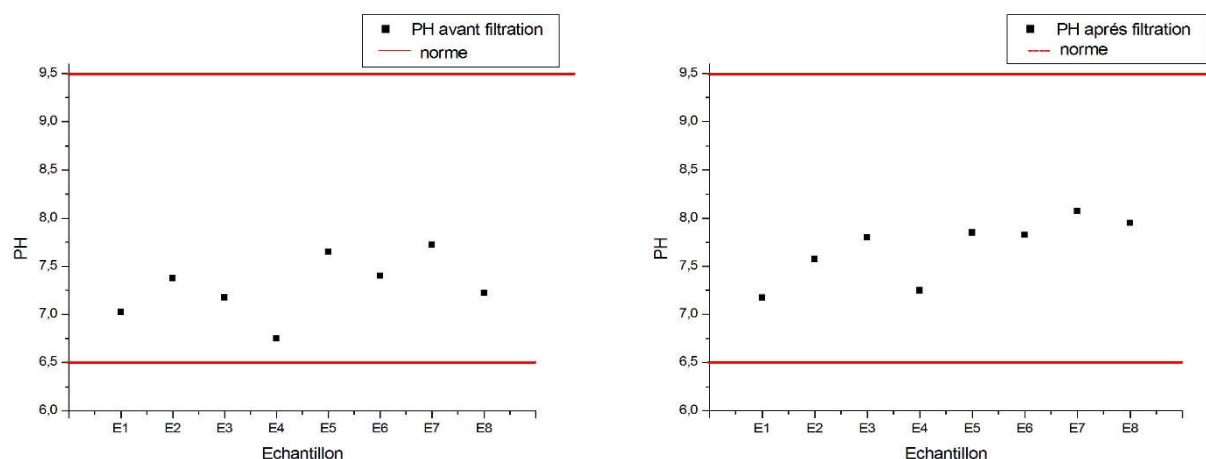


Figure III.1 Valeurs des pH des échantillons de lixiviat avant et après filtration

Les valeurs observées sur la figure III.1 révèlent que le pH est neutre dans tous les échantillons de lixiviat avant et après filtration.

Les valeurs sont comprises entre 6,75 et 8,075, ces valeurs enregistrées sont dans l'intervalle des valeurs limites maximale du pH des eaux qui sont comprises entre 6,5 et 9,5.

III.1.1.2. Conductivité (CE)

La mesure de la conductivité constitue une bonne appréciation du degré de minéralisation d'une eau où chaque ion agit par sa concentration et sa conductivité spécifique. La figure III.2 donne les valeurs des conductivités des lixiviats avant et après filtration.

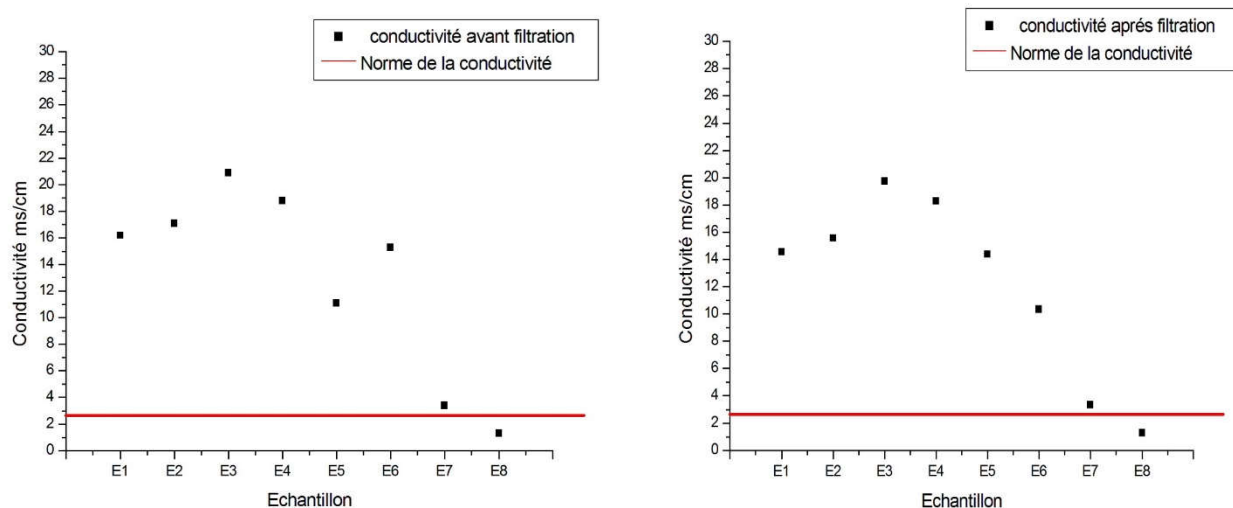


Figure III.2 Valeurs des conductivités des échantillons de lixiviat avant et après filtration

Les valeurs de la conductivité pour les prélèvements varient d'un échantillon à un autre et oscillent entre (1,330 et 20,900) mS/cm. La valeur la plus élevée est observée au niveau de l'échantillon E3. Toutes ses valeurs dépassent la norme algérienne fixée à 2,8 mS/cm sauf l'échantillon E8. [97] Alors que les valeurs relativement élevées des conductivités indiquent le caractère très minéralisée de lixiviat (conductivité ≥ 1 mS/cm).

Ces valeurs élevées indiquent une présence de sels solubles dans le lixiviat. Ces résultats préliminaires, peuvent indiqués le caractère élevé de minéralisation du lixiviat de la décharge et la présence des polluants minéraux car cette élévation de la conductivité n'est pas associée à une acidité importante. L'évolution des concentrations en chlorures semble influencer sur la conductivité électrique qui est déterminée principalement par ces ions. [98-100] Les résultats de la minéralisation sont illustrés dans la figure III.3 en page suivante.

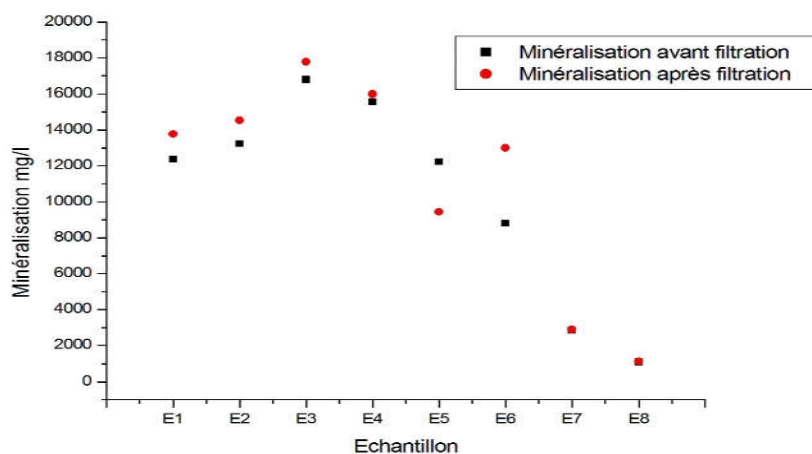


Figure III.3 Valeurs de la minéralisation des échantillons de lixiviat avant et après filtration

III.1.1.3. Teneur en Chlorures

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ils sont souvent considérés comme un indice de pollution des eaux. La figure III.4 donne l'évolution des chlorures en fonction des échantillons de lixiviat.

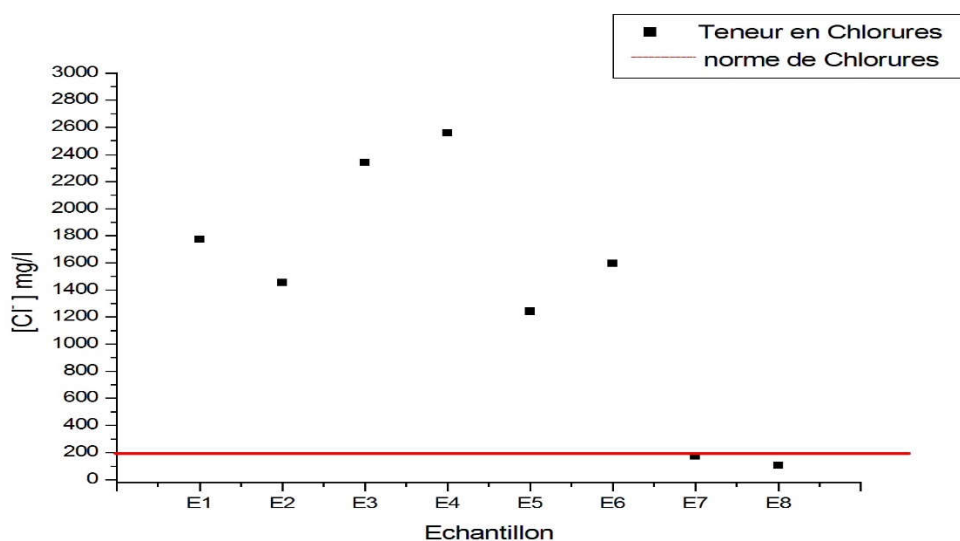


Figure III.4 Évolution des teneurs en chlorures en fonction de type d'échantillons

D'après la figure III.4, on remarque que les valeurs de la concentration en chlorures sont très importantes comprises entre (106,5 et 2556) mg/l ces concentrations dépassent largement la norme de l'OMS et algérienne qui est de 200 mg/l sauf pour les échantillons E7 et E8.

L'augmentation de la température stimule les réactions d'oxydation, d'hydrolyse et de reminéralisation des déchets par les bactéries (stimulation de l'activité enzymatique bactérienne), d'où le lixiviat devient riche en éléments minéraux tels que les chlorures. [98-100] Exemple : $\text{FeCl}_3 \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + 3\text{Cl}^-$

III.1.1.4. Teneurs en métaux lourds dans le lixiviat (SAA)

Cette étude a fait ressortir la présence de métaux lourds dans le lixiviat à savoir: le nickel (Ni^{2+}) et le Fer (Fe^{2+}).

Il est à noter que quatre autres éléments ont été analysés, à savoir : le plomb (Pb^{2+}), le zinc (Zn^{2+}), le cuivre (Cu^{2+}) et le cadmium (Cd^{2+}). Il est enregistré que leurs concentrations sont inférieures à la limite de détection dans tous les échantillons de lixiviat. Par contre, les résultats des concentrations, des autres métaux (nickel (Ni^{2+}) et le Fer (Fe^{2+})) sont présentés dans les figures III.5 et III.6.

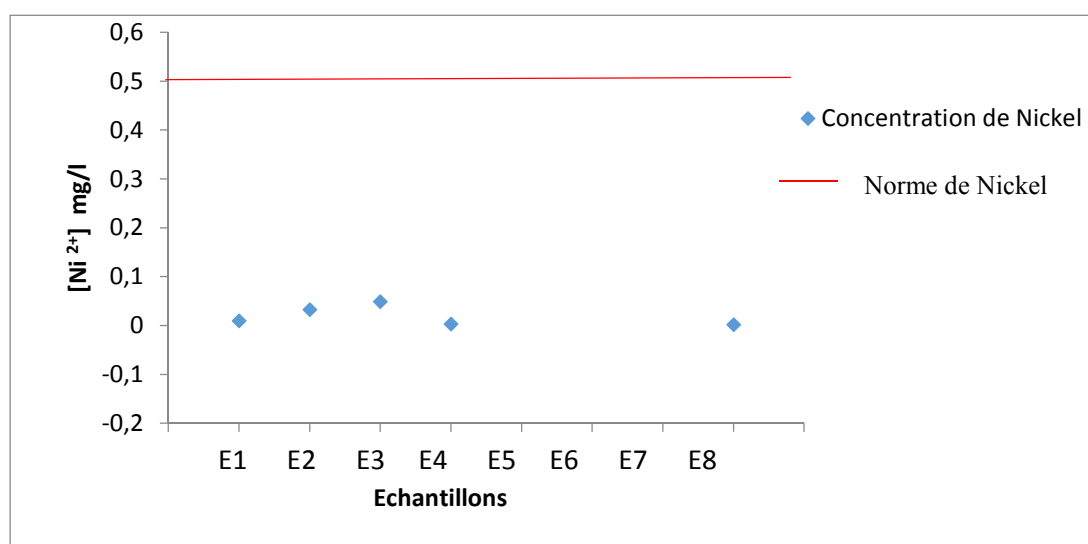


Figure III.5 Évolution des concentrations du nickel en fonction de type d'échantillons.

Les teneurs en Nickel (Ni^{2+}) enregistrées oscillent entre (0,0023 et 0,0492 mg/l). Tandis que, les concentrations enregistrées au niveau des échantillons, ne dépassent pas la limite normative (0,5mg/l) exigée par les normes de rejet algériennes. [105]

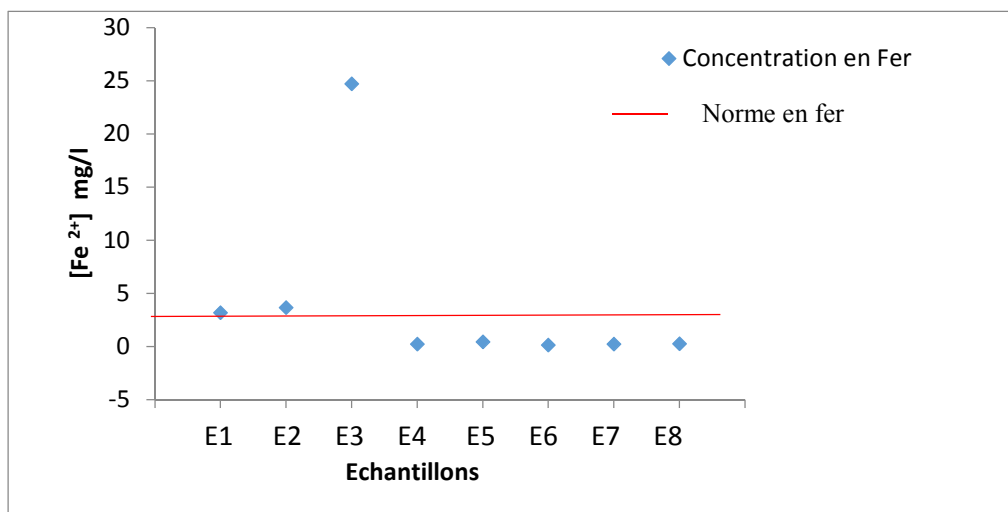


Figure III.6 Évolution des concentrations du fer en fonction de type d'échantillons

Les teneurs en Fer (Fe^{2+}) enregistrées dans les huit échantillons fluctuent entre 0,154 et 24,708 mg/l, elles manifestent une grande variabilité d'un échantillon à l'autre on trouve trois valeurs qui dépassent la limite normative (3 mg/l) exigée par les normes algérienne de rejet. [105]

La présence du Nickel Ni^{2+} , dans les lixiviats pourraient être liées à la mise en décharge des objets, tels que les accumulateurs électriques, les boîtes en métal, le PVC...etc. Par ailleurs, le métal le plus abondant dans les lixiviats est le fer ; Cette présence significative en fer pourrait être due essentiellement au pourcentage élevé des matières contenant du fer comme les canettes métalliques de boissons, boîtes de conserve, fil de fer, plaques de tôle, éléments de décoration et d'aménagement métalliques...etc.

III.1.2. Caractérisation de la boue issue de la filtration de lixiviat

III.1.2.1. Résultats de l'infrarouge (IR) de la boue issue de filtration des lixiviat

L'analyse des échantillons de boue par IR nous a permet d'accéder à des informations concernant les composés organiques contenus dans cette boue.

L'identification des différents signaux de vibrations a été effectuée à partir des tables d'identification infrarouge, ainsi qu'à partir des données relevées dans une recherche bibliographique[107], dans notre cas on a réalisé l'analyse pour 5 échantillons de boue, et Les résultats obtenus convergent vers les mêmes groupements fonctionnels (bondes) dans les échantillons analysés, comme il est illustré dans les figures III.(7-11) et le tableau III.1. en pages suivantes.

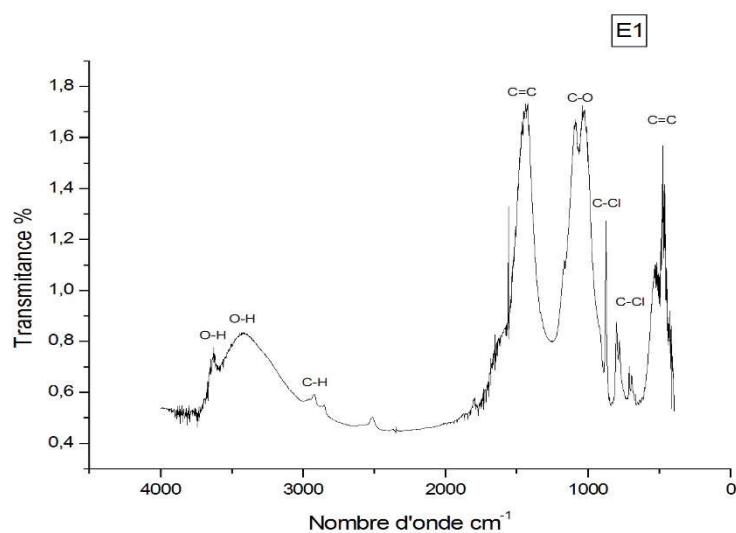


Figure III.7 Spectre infrarouge de l'échantillon E1 de la boue

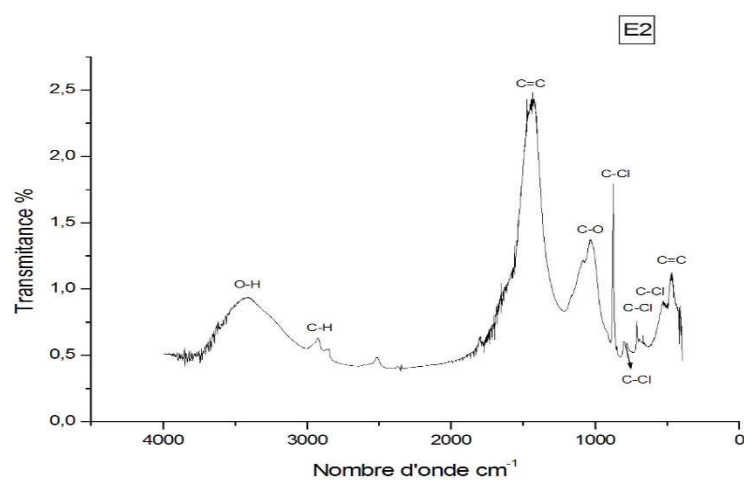


Figure III.8 Spectre infrarouge de l'échantillon E2 de la boue

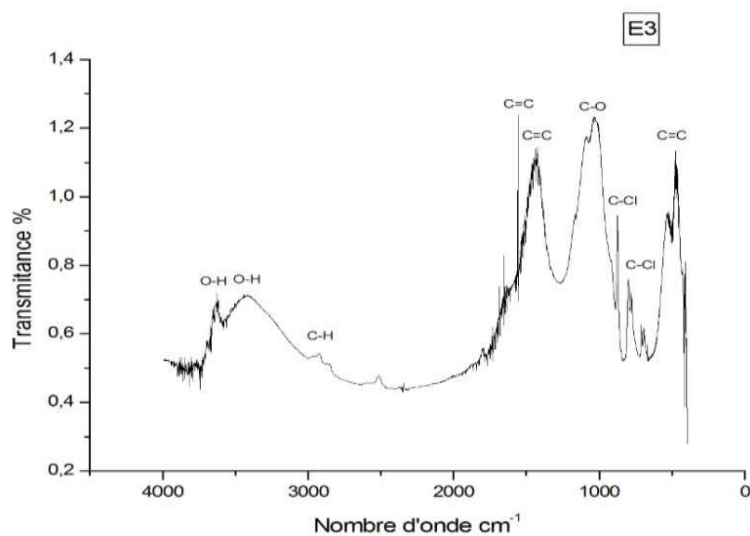


Figure III.9 Spectre infrarouge de l'échantillon E3 de la boue

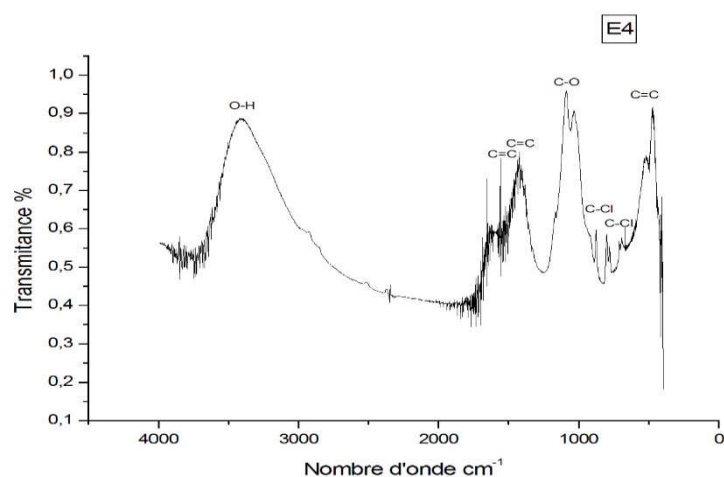


Figure III.10 Spectre infrarouge de l'échantillon E4 de la boue

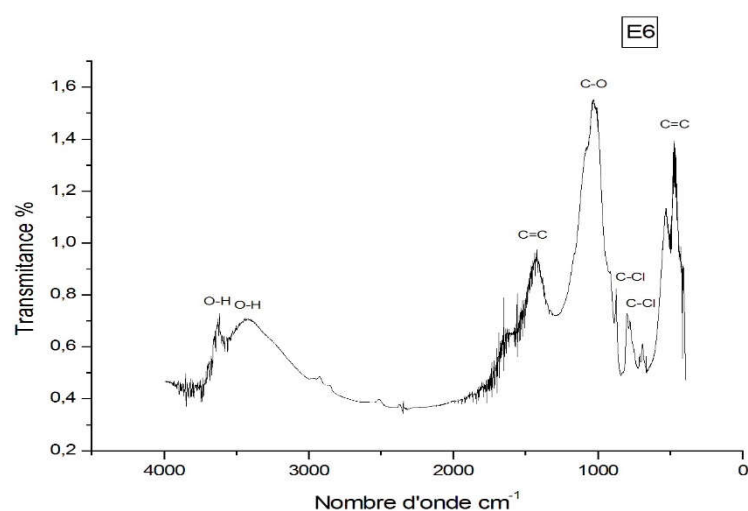


Figure III.11 Spectre infrarouge de l'échantillon E6 de la boue

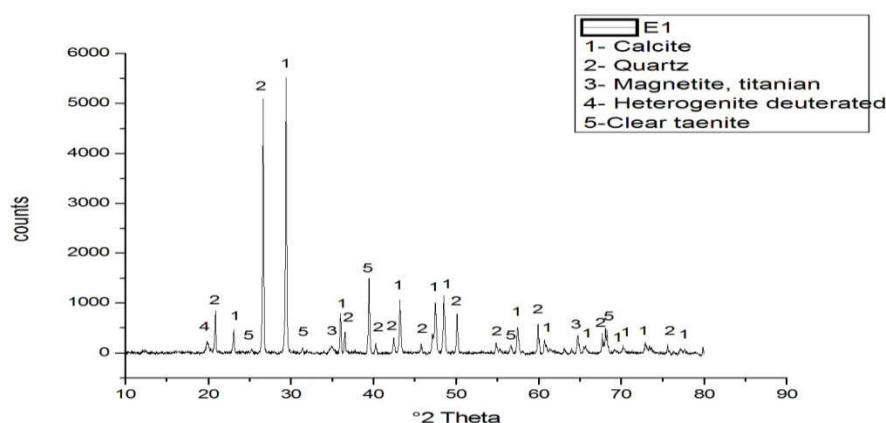
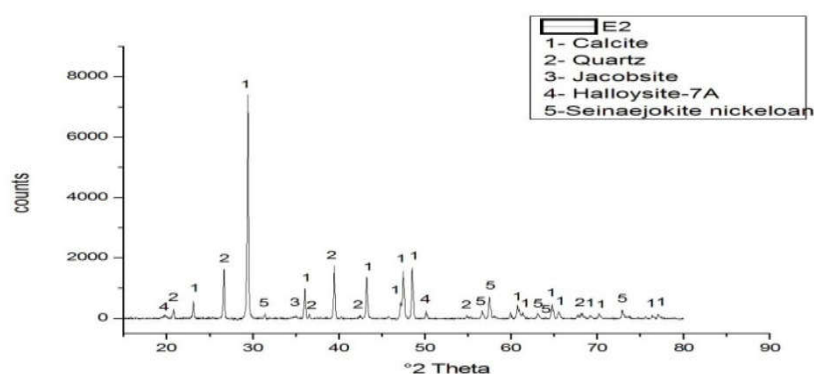
Le tableau III.1 regroupe les différents groupements fonctionnels contenus dans les échantillons de boue avec leur longueurs d'onde, les résultats enregistrés dans ce tableau mettent en évidence la présence de la matière organique, dans les cinq échantillons de boue, caractérisée par les pics 472 et 1561 cm^{-1} qui correspondent à la liaison -C=C- d'un cycle aromatique et les chlorures en quantité très importante, les bandes caractéristiques des chlorures se situent aux pics 700, 780,55 et 870 cm^{-1} qui correspondent à la liaison C-Cl des chlorures d'alkyles.

Tableau III.1. Résultats des analyses Infra- rouge des échantillons de boue.

Nombre d'ondes (cm ⁻¹)	Groupe ment fonctionnel	Constituant associé
3412 -3634	Élongation O-H	Alcools et phénols [107]
1040-1028	Élongation C-O	Éthers [107]
870-700-780	Élongation C-Cl	chlorures d'alkyles [107]
2920	Élongation C-H	Alcanes [107]
1561 – 472-1432	Élongation C=C	cycle aromatique [107]

III.1.2.2. Analyse par diffraction des rayons X (DRX) de la boue issue de filtration des lixiviats

La diffraction des rayons X (DRX) nous a permis de caractériser les phases minéralogiques présentes dans la boue et de plus préciser la nature des minéraux argileux. Les spectres de diffraction des rayons X des échantillons de la boue sont montrés sur les figures III.(12-17) suivantes :

**Figure III.12** Spectre DRX de l'échantillon E1 de la boue**Figure III.13** Spectre DRX de l'échantillon E2 de la boue

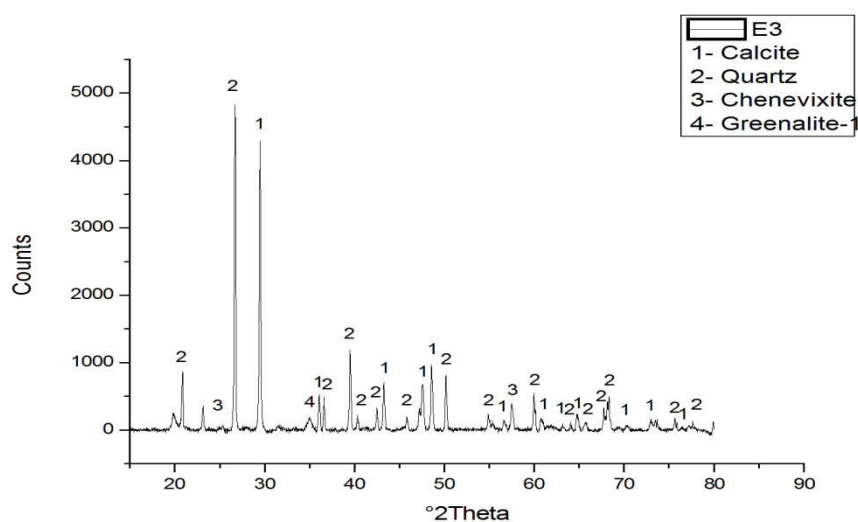


Figure III.14 Spectre DRX de l'échantillon E3 de la boue

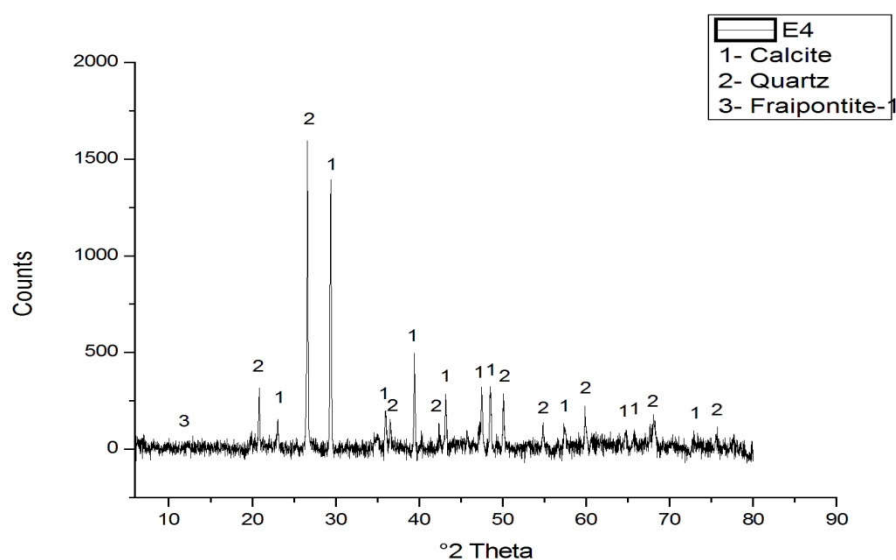


Figure III.15 Spectre DRX de l'échantillon E4 de la boue

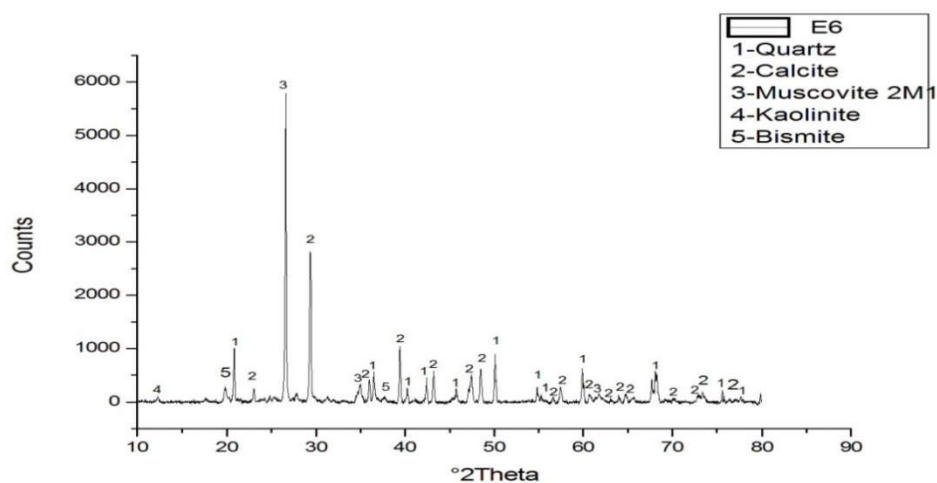


Figure III.16 Spectre DRX de l'échantillon E6 de la boue

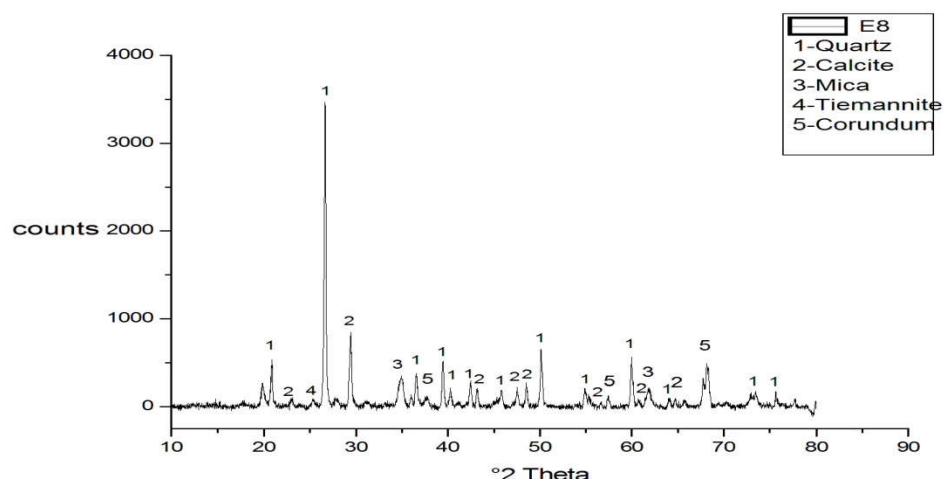


Figure III.17 Spectre DRX de l'échantillon E8 de la boue

Une synthèse sur les résultats obtenus par DRX sur l'ensemble des échantillons de boue est présentée dans le tableau III.2. Les analyses minéralogiques ont permis de mettre en évidence la présence de plusieurs phases cristallines distinctes, principalement de la calcite, du quartz et la présence des phases contenant des métaux lourds tels que fer, cuivre, zinc et Nickel caractérisées par les phases Magnititetitanian $[\text{Fe}_{2.25}\text{O}_4\text{Ti}_{0.75}]$, Greenalite-1 $[\text{Fe}_{2-3}(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4]$, SeinaejokiteNickeloan $[(\text{Fe}_{0.75}\text{Ni}_{0.25})\text{Sb}_2]$, Chenevixite $[\text{Cu}_2\text{Fe}^{3+}_2(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4]$ et Cleartaenite $[\text{Fe}_{0.93}\text{Ni}_{0.06}]$.

Tableau III.2 Phases minéralogiques identifiées dans les échantillons de boue.

Phases minérales	Formule chimique	Echantillons identifiée
Quartz	SiO_2	E1, E2, E3, E4, E6, E8
Calcite	CaCO_3	E1, E2, E3, E4, E6, E8
Magnititetitanian	$\text{Fe}_{2.25}\text{O}_4\text{Ti}_{0.75}$	E1
Cleartaenite	$\text{Fe}_{0.93}\text{Ni}_{0.06}$	E1
Jacobsite	Fe_2MnO_4	E2
Halloysite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	E2
Chenevixite	$\text{Cu}_2\text{Fe}^{3+}_2(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4$	E3
Greenalite-1	$\text{Fe}_{2-3}(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	E3
Fraipontite-1	$(\text{Zn},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	E4
Muscovite	$\text{H}_2\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}$	E6
Kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	E6
Bismite	Bi_2O_3	E6
Mica	$\text{AlFeH}_2\text{KMgO}_2\text{Si}$	E8
Tiemannite	HgSe	E8
Corundum	Al_2O_3	E8
Heterogenitedeuterated	DCoO_2	E1
Seinaejokite nickeloan	$(\text{Fe}_{0.75}\text{Ni}_{0.25})\text{Sb}_2$	E2

On conclut, à travers cette caractérisation minéralogique que la boue étudiée contient des métaux lourds qui peuvent être à l'origine de sa pollution (Ordures ménagères).

III.1.2.3. Teneurs en métaux lourds des boues issues de filtration des lixiviats

Les lixiviats successives obtenus lors des tests TCLP sont soumis à une analyse chimique élémentaire, les résultats d'analyse de la boue de la décharge boulimat obtenus sont présentés dans les figures III. (18-22)

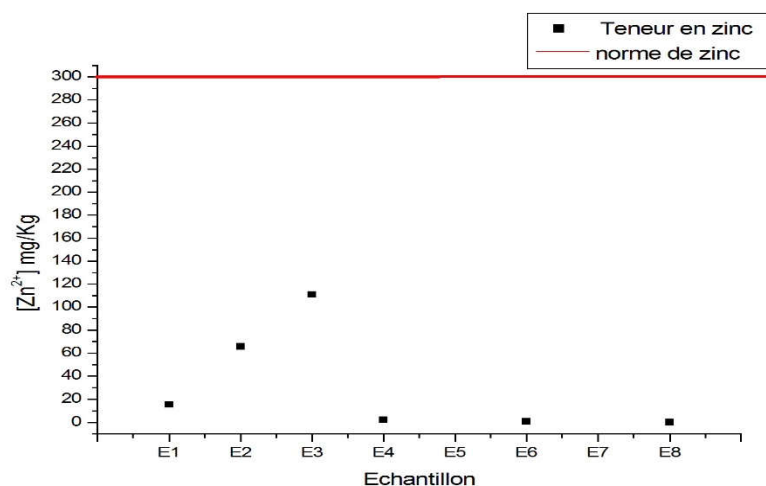


Figure III.18 Évolution des teneurs de zinc en fonction de type d'échantillons

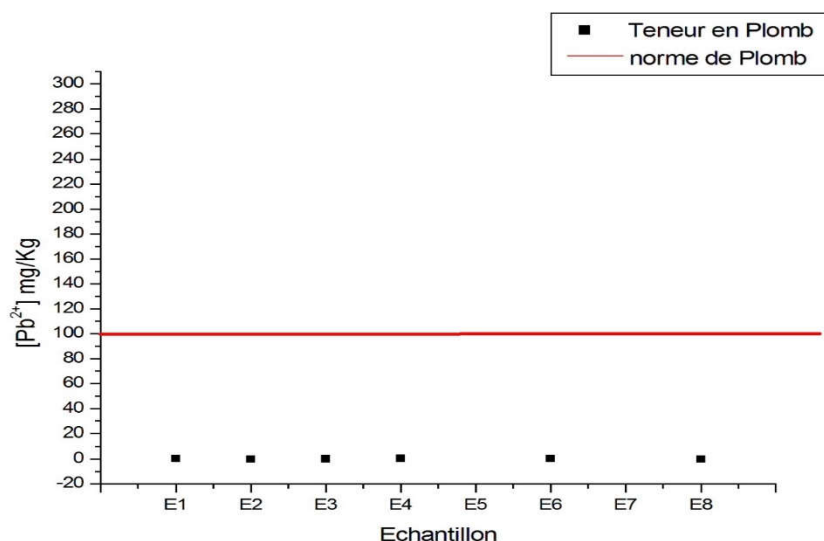


Figure III.19 Évolution des teneurs de plomb en fonction de type d'échantillons

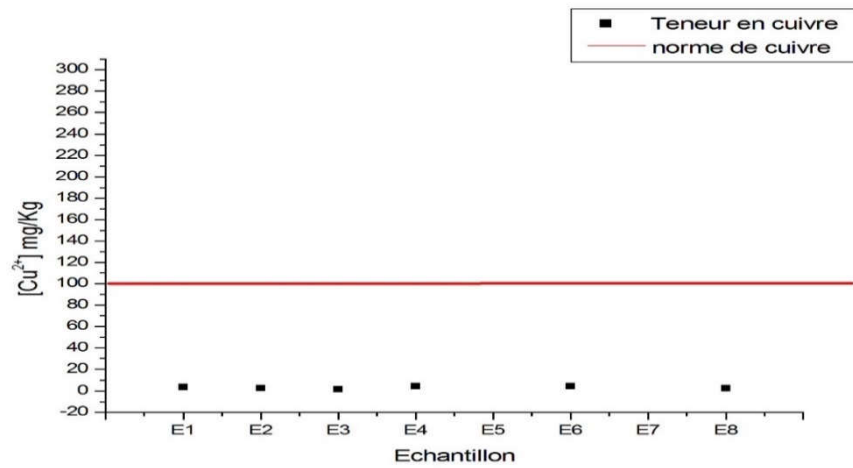


Figure III.20 Évolution des teneurs de cuivre en fonction de type d'échantillons

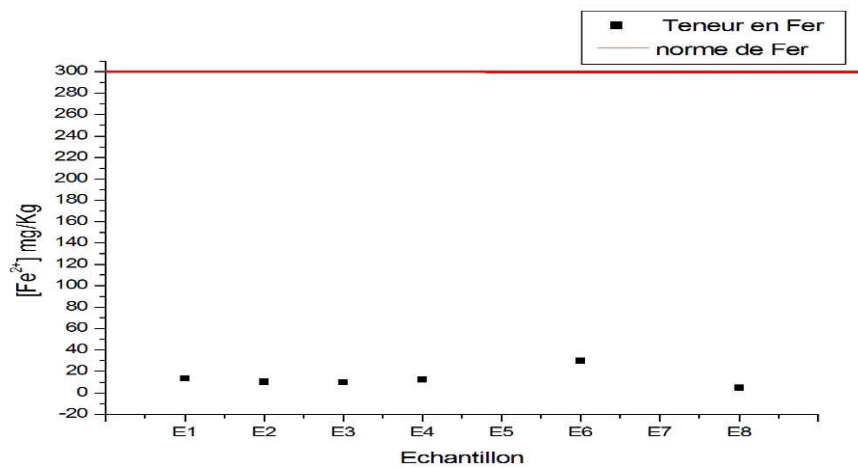


Figure III.21 Évolution des teneurs de fer en fonction de type d'échantillons

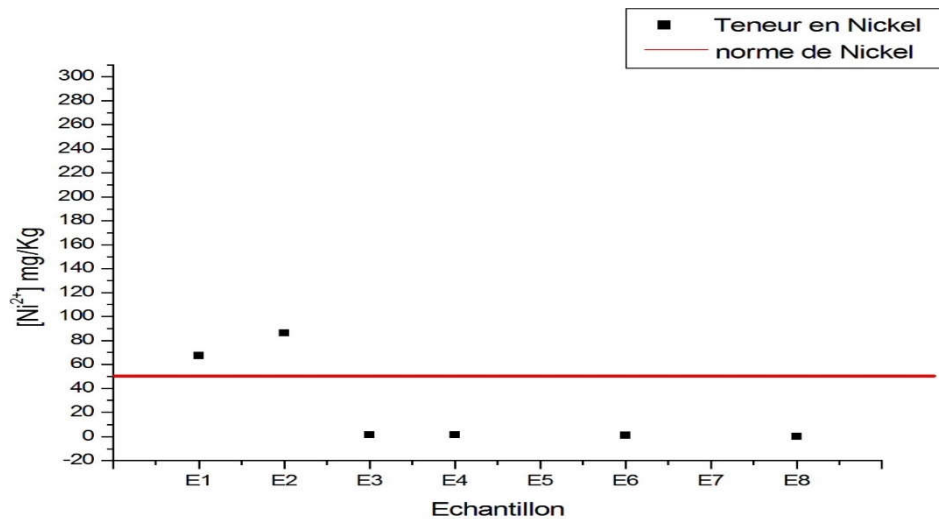


Figure III.22 Évolution des teneurs de nickel en fonction de type d'échantillons

Les résultats obtenus confirment la présence des métaux lourds dans les échantillons de boues. Il a été donné de constater que les concentrations du zinc, cuivre, plomb et du fer sont inférieures aux normes exigées, [106] Pour celles du nickel elles sont nettement au-dessous de la norme (50 mg/kg), excepté celles des échantillons E1 et E2 qui dépasse la norme algérienne de rejet avec une teneur de 67,5 mg/kg et 86,3mg/kg respectivement.

Conclusion

À travers cette étude et par une caractérisation physico-chimique, on conclut la présence d'une pollution minérale (par le Nickel et le Fer) et organique (par les matières organiques) de nos échantillons. Cependant, l'exploration d'une pollution du sol aux voisinages des points de prélèvement des lixiviats demeure nécessaire et inévitable. De ce fait, une campagne de prélèvement des échantillons du sol a été entamée.

III.2. CARACTÉRISATION DES EPROUVETTES STABILISÉS/SOLIDIFIÉS

Au bout de 14 jours de cure du mélange (formulation lixiviat - ciment), les éprouvettes sont démoulées afin de subir des essais mécaniques et de caractérisation physico-chimiques, tel que la résistance mécanique, l'analyse par diffraction au rayon-X et le test de lixiviation TCLP.

III.2.1. Essais mécaniques

L'essai de résistance mécanique a été réalisé pour étudier l'influence des lixiviats contaminés, comme remplacement d'eau de gâchage dans la formulation, sur les résistances mécaniques des éprouvettes conçues. Les propriétés mécaniques du matériau sont acquises par hydratation du ciment principalement au cours de la prise, laquelle correspond à la cristallisation et à l'organisation des hydrates formés en une structure mécaniquement résistante.

Les résistances mécaniques à la compression et à la flexion des échantillons, mesurées sont présentées dans la figure III.23

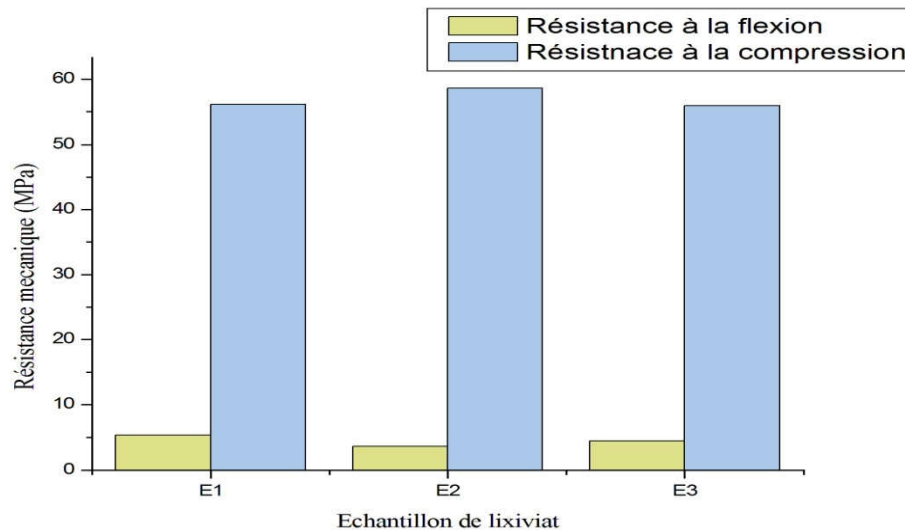


Figure III.23 Évolution des résistances mécaniques à la compression et à la flexion des éprouvettes.

D'après les résultats illustrés en figure III.23 on constate que : d'une part, les résistances mécaniques à la compression obtenues sont supérieures à la norme exigée qui est de l'ordre de 1MPa, [95] et d'autre part la présence du nickel dans les lixiviat a amélioré les résistances mécaniques des éprouvettes.

On conclut, que la résistance mécanique d'un matériau se distingue et dépend fortement de la quantité et de la qualité des polluants incorporés dans le matériau.

III.2.2. Composition minéralogique des éprouvettes après S/S

Les figures III. (24-26) représentent les diffractogrammes des matériaux S/S, l'analyse de ces derniers permet de mettre en évidence que les signatures minéralogiques des trois matériaux S/S sont très similaires. Cependant quelques différences sont observables. En effet, certains pics des diffractogrammes n'ont pas la même intensité d'un matériau à l'autre.

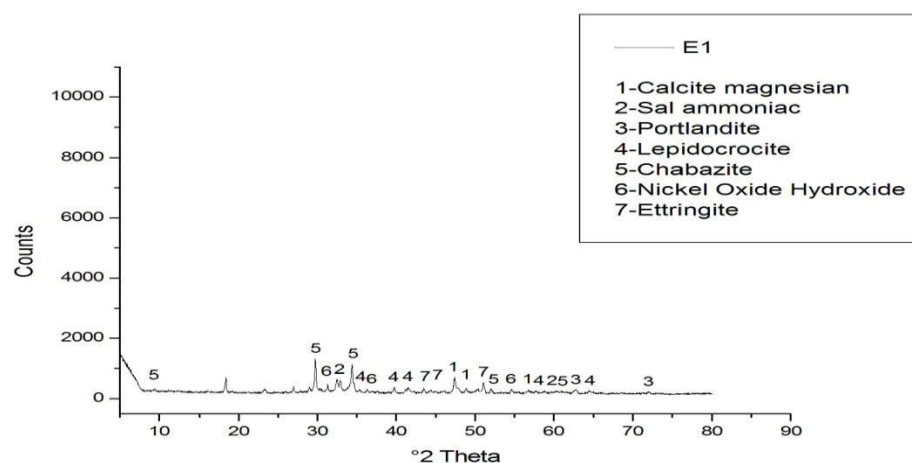


Figure III.24 Spectre DRX de l'échantillon E1 du lixiviat après S/S

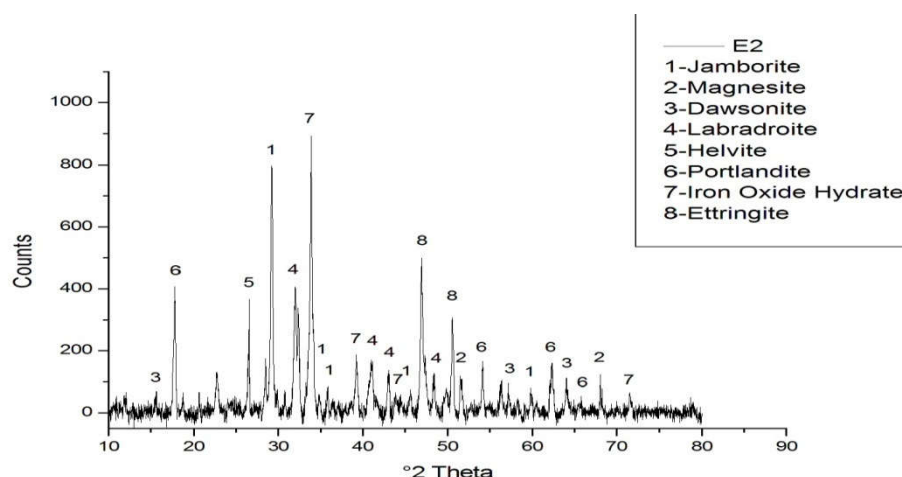


Figure III.25 Spectre DRX de l'échantillon E2 du lixiviat après S/S

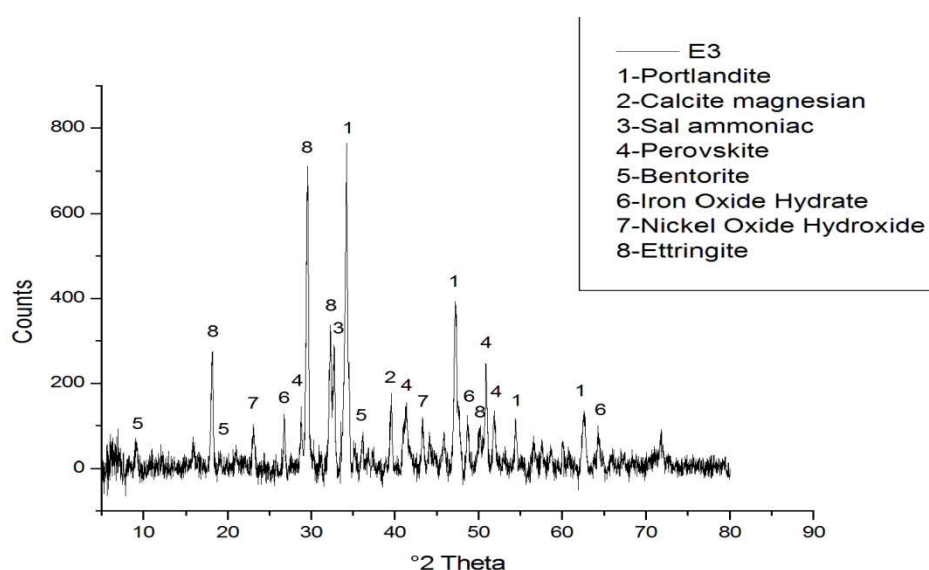


Figure III.26 Spectre DRX de l'échantillon E3 du lixiviat après S/S

Le tableau III.3 synthétise les résultats obtenus par DRX sur l'ensemble des échantillons de lixiviat traité par le procédé S/S. Les analyses minéralogiques ont permis de mettre en évidence qu'une différence de composition et de répartition, apparaît concernant les échantillons de lixiviat stabilisé solidifié par rapport aux échantillons du lixiviat bruts. En effet, il peut être observé la présence de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), d'ettringite ($\text{Ca}_6 \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 (\text{OH})_{12} \cdot 26 (\text{H}_2\text{O})$), la présence de ces espèces minérales est liée à l'hydratation des phases cimentaires lors du procédé de stabilisation.

Tableau III.3 Phases identifiées pour les matériaux S/S.

Nom de La Phase	Formule chimique	Échantillons identifiée
Portlandite	Ca(OH)_2	E1, E2, E3
Quartz	SiO_2	E1, E3
calcite magnesian	$(\text{Mg}_{0,064}\text{Ca}_{0,0936}) (\text{CO}_3)$	E1, E3
Sal ammoniac	NH_4Cl	E1, E3
Chabazite	$\text{Ca}_{1,95} \text{Al}_{3,9} \text{Si}_{8,1} \text{O}_{24}$	E2
Pervoskite	$(\text{Sr}_{0,6} \text{Bi}_{0,4}) \text{FeO}_3$	E2, E3
Magnesite	$\text{Mg(CO}_3)$	E2
Dawsonite	$\text{Na Al(OH)}_2 (\text{CO}_3)$	E2
Labradorite	$\text{Na}_5\text{Ca}_5\text{Al}_{1,5}\text{Si}_{2,5}\text{O}_8$	E2
Briartite	$\text{Cu}_2\text{FeGeS}_4$	E2
Ettringite	$(\text{Ca}_6 \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 (\text{OH})_{12} 26 (\text{H}_2\text{O}))$	E1, E2, E3
IronOxide Hydrate	Fe (OH)_2	E3, E2
Nickel Oxide Hydroxide	$\text{Ni}_3\text{O}_2 (\text{OH})_4$	E1, E3
Jamborite	$\text{Ni}_5\text{O (OH)}_9$	E2
Lepidocrocite	$\text{Fe}_{+3}\text{O (OH)}$	E1
Bentorite	$\text{Ca}_6\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} 26\text{H}_2\text{O}$	E3

D'après les diffractogrammes obtenus après stabilisation/solidification de différents échantillons de lixiviat, on distingue la formation des phases pendant l'hydratation tel que Iron Oxide Hydrate Fe (OH)_2 , Nickel Oxide Hydroxide $\text{Ni}_3\text{O}_2 (\text{OH})_4$; on remarque le piégeage de certains éléments au sein de la matrice cimentaire par substitution $\text{Ca} \rightleftharpoons \text{Fe}$, $\text{Ca} \rightleftharpoons \text{Ni}$.

III.3. Caractérisation de sol

L'étude expérimentale a été réalisée sur huit échantillons de sol. La première étape du travail réalisé est une caractérisation physico-chimique la plus large possible du sol.

III.3.1. Résultats de l'analyse granulométrique

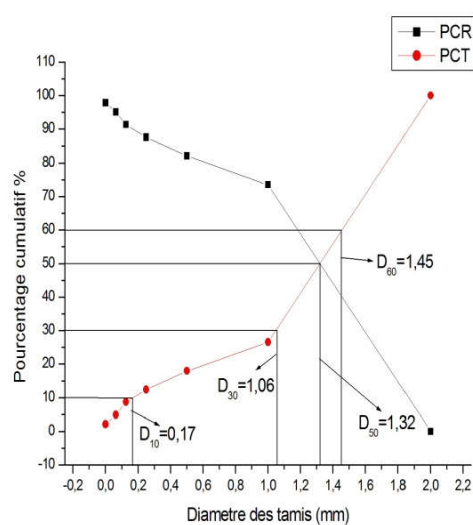
L'analyse granulométriques a pour objectif de mesurer la distribution par taille de particules d'un échantillon. L'identification des différentes familles granulométriques qui constituent un échantillon permet par ailleurs de définir sa texture.

III.3.1.1. Variation du rendement pondérale en fonction de la granulométrie

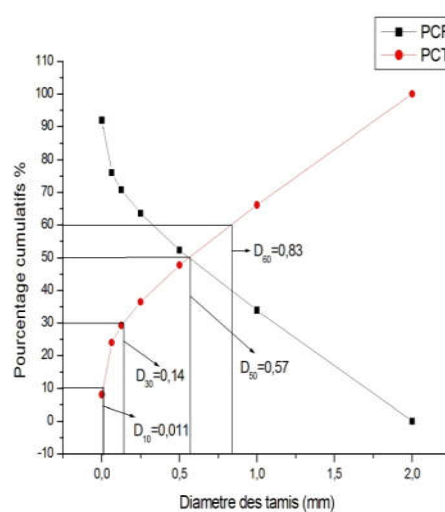
A la lumière de ces résultats, on conclut que: Les huit échantillons de sols ont des profils semblables. Ils sont majoritairement composés d'une fraction de taille de 1 mm et plus. Donc, leurs textures d'après les données de la littérature indiquées dans (Chapitre I. tableau I.4) correspondent à un sable grossier.

III.3.1.2. Courbe granulométrique

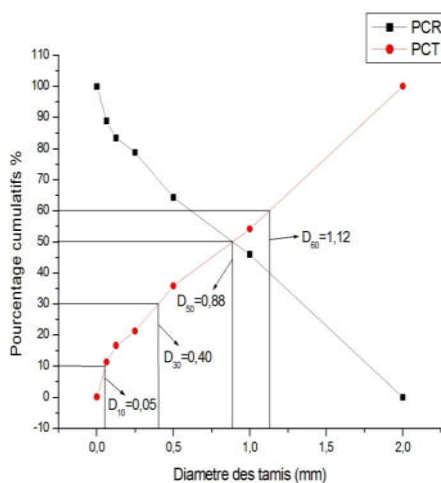
D'après les résultats obtenus, on constate que les rendements cumulatifs des tamisât sont croissants en fonction des diamètres moyens des tamis. Par contre les rendements cumulatifs des refus sont décroissants en fonction des diamètres moyens des tamis. De plus, ces deux courbes (refus-tamisât) sont symétriques et se croisent en un point D_{50} , c'est le diamètre de la maille du tamis qui permet le passage de 50% du matériau du départ. La figure III.27 représente les courbes granulométriques des huit échantillons.



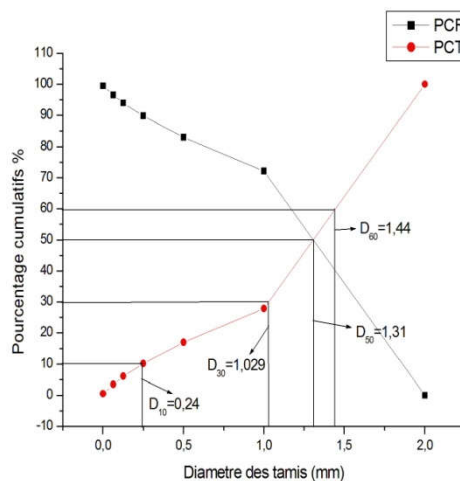
Échantillon E1



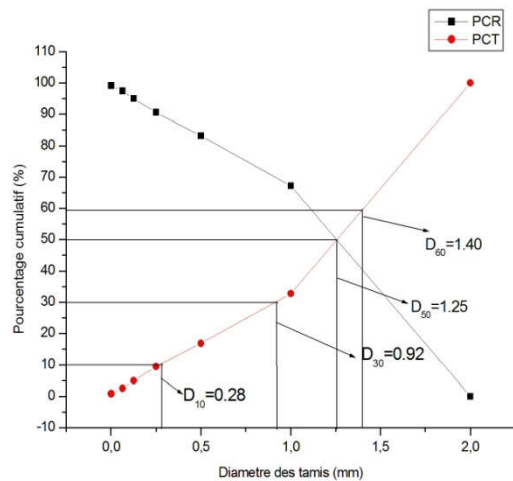
Échantillon E2



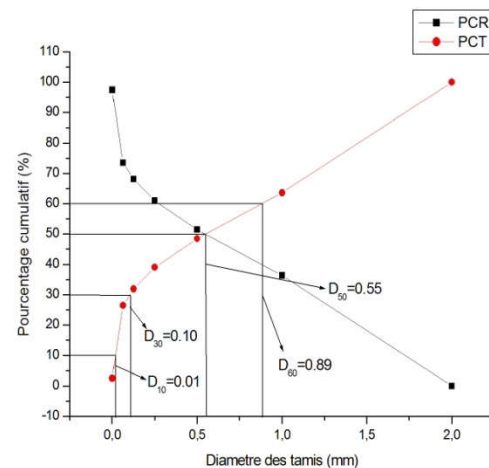
Échantillon E3



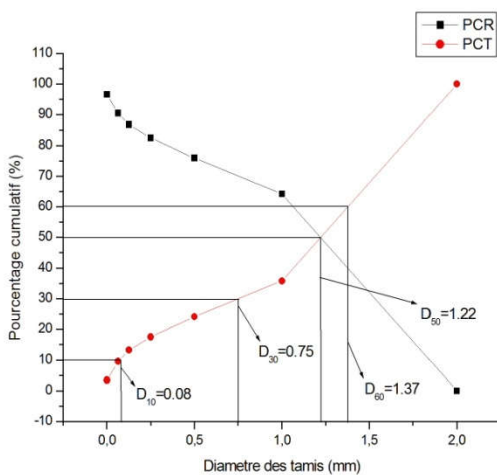
Échantillon E4



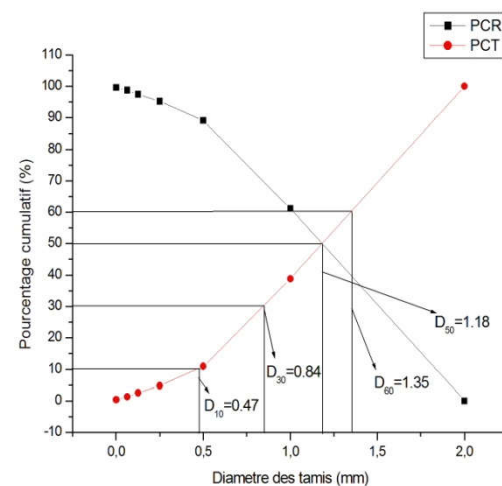
Échantillon E5



Échantillon E6



Échantillon E7



Échantillon E8

Figure III.27 Évolution des refus cumulés et des tamisât cumulés des échantillons du sol en fonction des ouvertures des tamis

Le D_{10} , D_{30} , D_{50} , et le D_{60} représentent respectivement les diamètres correspondant à 10%, 30%, 50% et 60% de tamisât. Ils représentent respectivement les diamètres des mailles des tamis qui permettent le passage de 10%, 30%, 50% et 60% du matériau du départ.

III.3.1.3 Coefficient de HAZEN (coefficient d'uniformité)

Le coefficient de HAZEN permet de savoir si la granulométrie est étalée ou serrée (Uniforme). Ce coefficient est défini par la relation suivante :

$$C_U = D_{60} / D_{10} \dots\dots\dots \text{Eq.III.1}$$

Avec : C_U : Le coefficient de HAZEN (uniformité); D'après CAQUOT et KERISEL : [82]

- $C_U < 2$: La granulométrie est dite uniforme ;
- $C_U > 2$: La granulométrie est dite étalée.

III.1.4. Coefficient de courbure

Le coefficient de courbure vient en complément à celui de HAZEN dans la classification des sols. Afin de déterminer si la granulométrie est bien graduée (un sol est mal gradué si une fraction des grains prédomine). Le coefficient de courbure est donné par l'équation :

$$C_c = (D_{30})^2 / D_{10} \cdot D_{60} \dots \dots \dots \text{Eq.III.2}$$

C_c : le coefficient de courbure :

- $1 < C_c < 3$: La granulométrie est bien graduée (continuité bien répartie) ;
- $C_c < 1$ et $C_c > 3$: La granulométrie est mal graduée (continuité mal répartie).

Les coefficients de courbures et d'uniformités des échantillons de sol sont illustrés dans le tableau III.4, ce tableau révèle que les valeurs des coefficients d'uniformité sont supérieures à 2 pour tous les échantillons. Donc, le sol présente une granulométrie variée.

Tableau III.4 Les coefficients de courbures et d'uniformités (C_c/C_u)

	D₁₀	D₃₀	D₅₀	D₆₀	C_u C_c	Commentaire
E1	0,17	1,06	1,32	1,45	8,52 4,55	Cu : La granulométrie étalée Cc : La granulométrie est mal graduée
E2	0,011	0,14	0,57	0,83	75,45 2,14	Cu : La granulométrie étalée Cc : La granulométrie est bien graduée
E3	0,05	0,40	0,88	1,12	22,4 2,85	Cu : La granulométrie étalée Cc : La granulométrie est bien graduée
E4	0,24	1,029	1,31	1,44	6 3,06	Cu : La granulométrie étalée Cc : La granulométrie est male graduée
E5	0,28	0,92	1,25	1,40	5 2,15	Cu : La granulométrie étalée Cc : La granulométrie est bien graduée
E6	0,01	0,10	0,55	0,89	89 1,12	Cu : La granulométrie étalée Cc : La granulométrie est bien graduée
E7	0,08	0,75	1,22	1,37	17,12 5,13	Cu : La granulométrie étalée Cc : La granulométrie est mal graduée
E8	0,47	0,84	1,18	1,35	2,87 1,11	Cu : La granulométrie étalée Cc : La granulométrie est bien graduée

III.3.2. Analyse physico-chimique

La structure, la texture et la composition du sol lui confèrent des caractéristiques particulières qui influencent les phénomènes d'infiltration et de rétention des éléments traces métalliques.

III.3.2.1. Humidité de sol

L'eau joue un rôle essentiel dans tous les phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui se produisent dans le sol. Elle pourra entrer en compétition avec les molécules organiques pour l'adsorption sur les matériaux solide, entraînant une baisse de l'adsorption des polluants lorsque le taux d'humidité du sol augmente. [101] La teneur en eau du sol est un facteur déterminant dans la répartition du polluant dans les trois phases du sol.

Les taux d'humidité des échantillons de sol est de 0,99%. Cette valeur dépend fortement des conditions climatiques au moment des prélèvements en hiver, une grande quantité d'eau c'est infiltrée et absorbé par le sol.

III.3.2.2. pH de sol

Le pH fait partie d'une des plus importantes caractéristiques physiques des sols, car la spéciation, la mobilité et la disponibilité des éléments de traces métalliques sont liées à la valeur du pH. [102]

D'après les valeurs des pH enregistrées dans la figure III.28, il ressort que ces valeurs sont comprises entre 7,90 et 8,40. Le sol présente un pH alcalin, cette basicité peut être attribuée à la présence des carbonates. Des études similaires ont montré que les sols ayant des valeurs de pH élevées présentent de fortes teneurs en carbonates, favorisant ainsi l'ensemble des modes de fixation des métaux. [103-104]

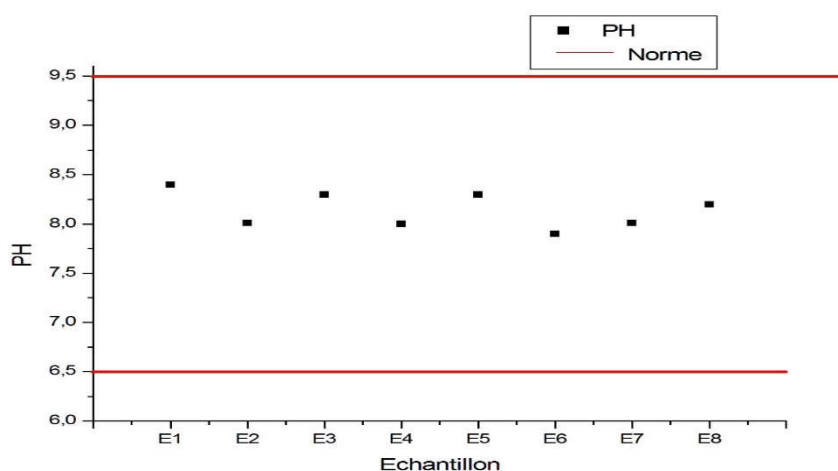


Figure III.28 Évolution du PH des échantillons de sol

III.3.2.3. Conductivité

Les valeurs des conductivités électriques, des échantillons de sols, enregistrées dans la figure III.29 sont comprises entre 0,441 et 2,115 mS/cm.

Elles révèlent une forte force ionique. Ces valeurs élevées indiquent un taux important de sels soluble et un caractère minéral dans le sol. Ces résultats préliminaires, peuvent dès lors indiqués la présence des polluants minéraux.

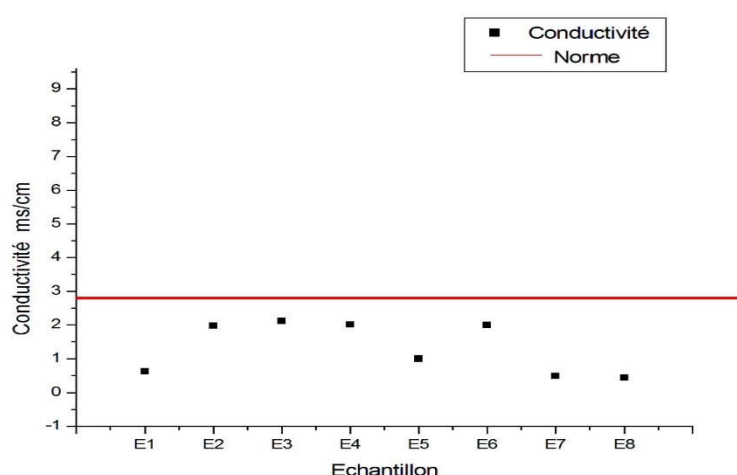


Figure III.29 Résultats de la conductivité des échantillons de sol

III.3.2.4. Teneurs en chlorure

Les résultats présentés sur la figure III.30 montrent que les concentrations en chlorures de nos échantillons varient entre 568 et 2414 mg/kg. À cet effet, les grandeurs des échantillons de sol sont largement au-dessous de la norme qui est de l'ordre de 15000 mg/kg.

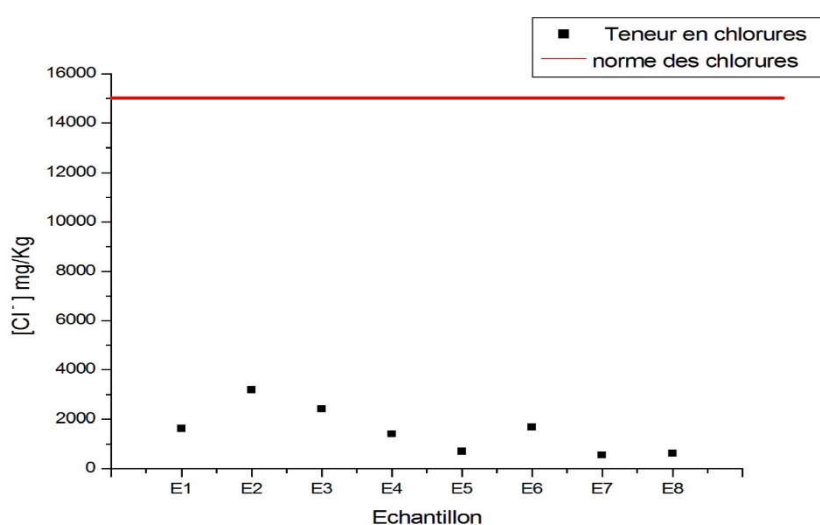


Figure III.30 Évolution des concentrations des chlorures en fonction de type d'échantillons

III.3.2.5. Composition minéralogique du sol

La diffraction des rayons X est une technique d'étude, sans contact, utilisée couramment pour identifier les espèces minérales d'une matrice solide. Elle permet entre autres de discriminer des espèces minérales de même composition chimique mais de structures cristallines différentes, telles que la calcite et le quartz. Les figures III. (31-38) représentent les diffractogrammes obtenus des échantillons du sol.

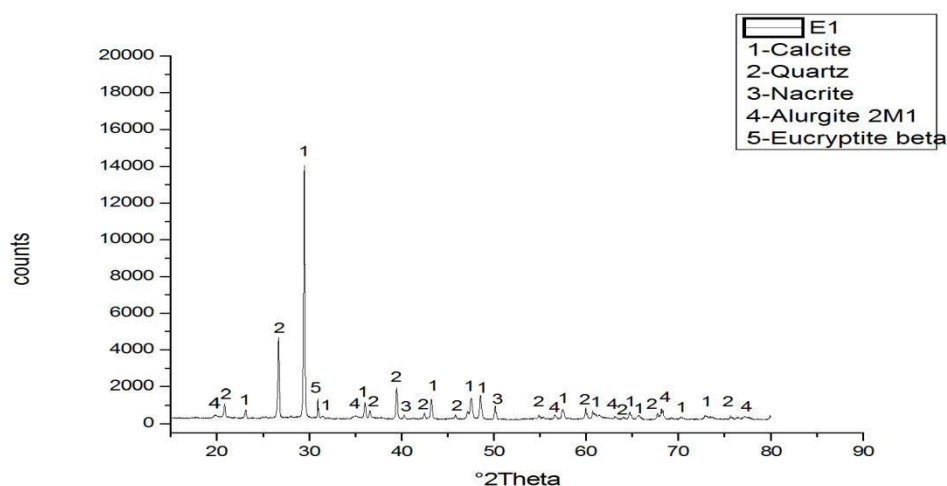


Figure III.31 Spectre DRX de l'échantillon E1 du sol

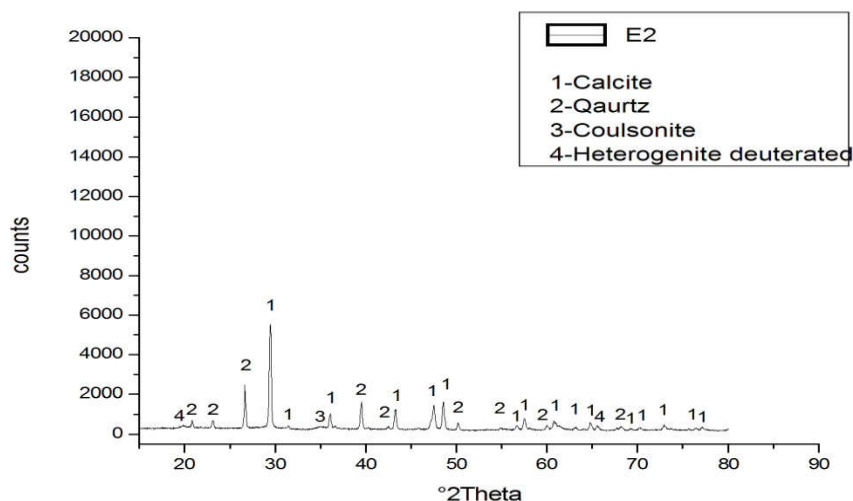


Figure III.32 Spectre DRX de l'échantillon E2 du sol

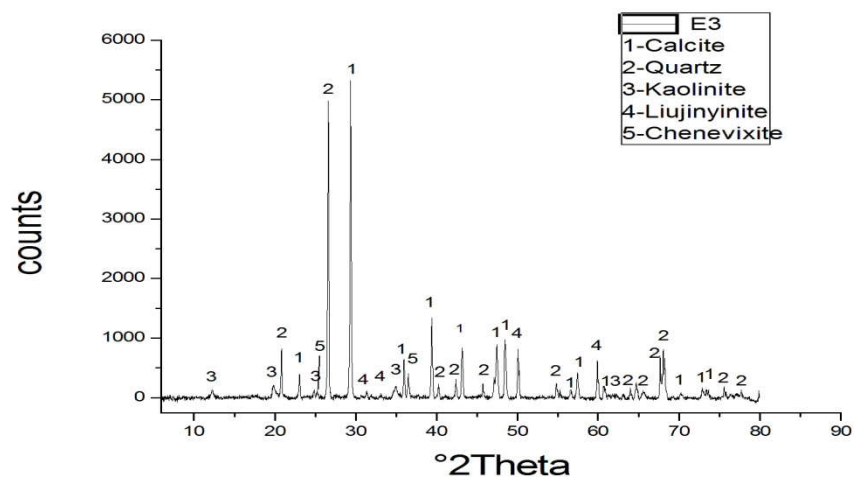


Figure III.33 Spectre DRX de l'échantillon E3 du sol

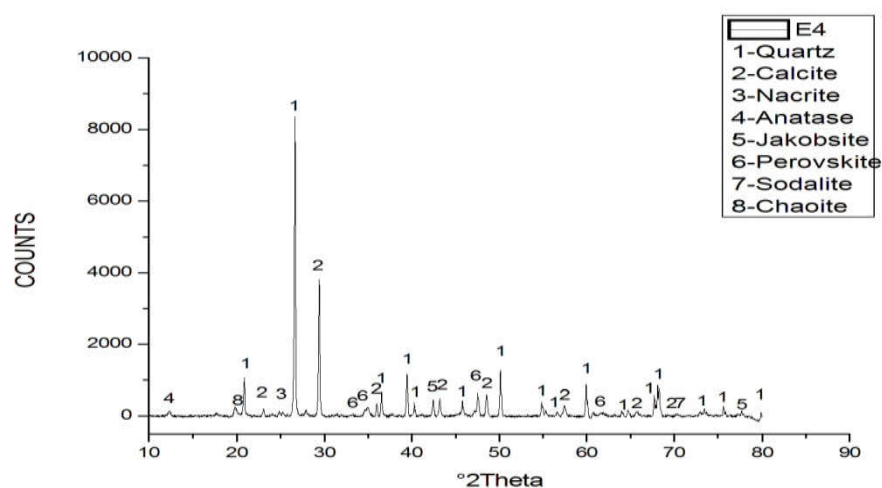


Figure III.34 Spectre DRX de l'échantillon E4 du sol

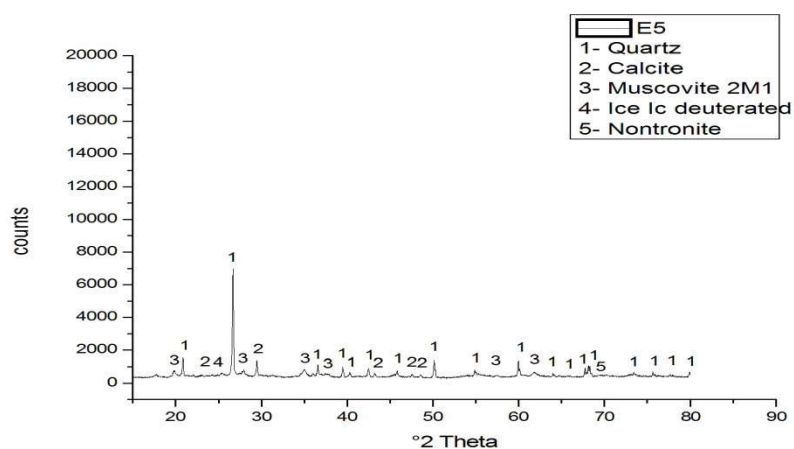


Figure III.35 Spectre DRX de l'échantillon E5 du sol

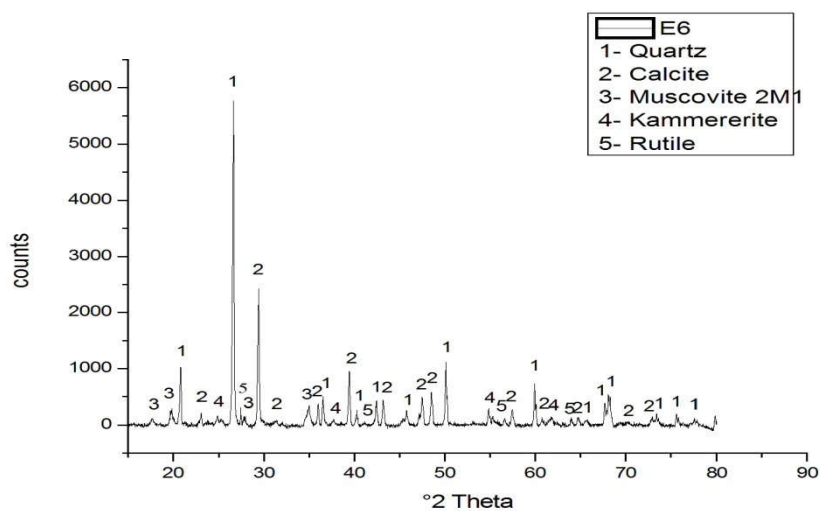


Figure III.36 Spectre DRX de l'échantillon E6 du sol

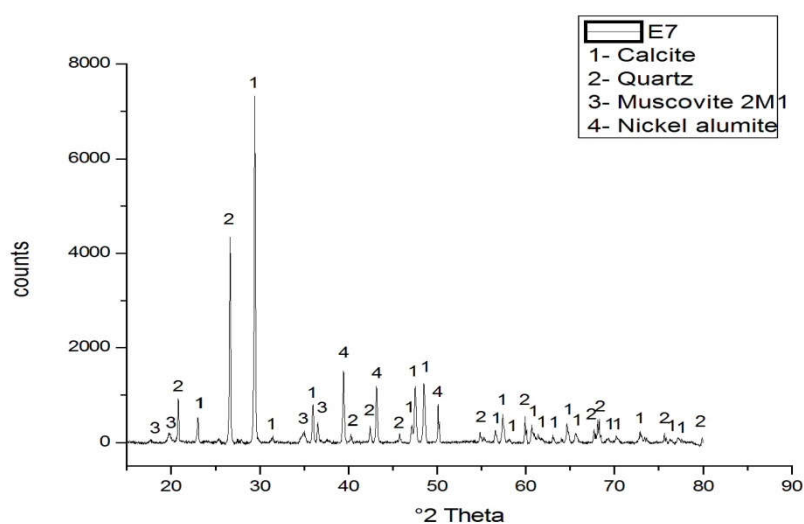


Figure III.37 Spectre DRX de l'échantillon E7 du sol

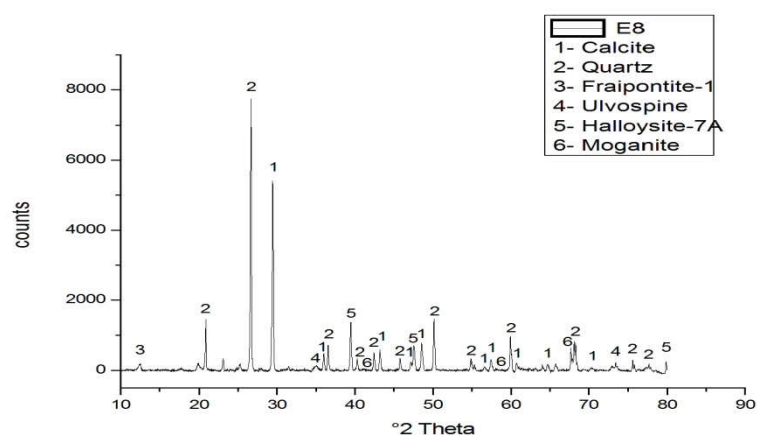


Figure III.38 Spectre DRX de l'échantillon E8 du sol

L'examen des diffractogrammes des échantillons du sol révèlent la présence des minéraux distincts; principalement le Quartz, la Calcite et des phases contenant des métaux lourds (Nickel, Fer et Zinc) telles que : Nickel alumite ($A_{14}H_{18}NNiO_{22}S$), Ulvospine (Fe_2TiO_4), Jakobite (Fe_2MnO_4), Fraipontite ($(Zn,Al,Cu)_3(Si,Al)_2O_5(OH)_4$)

On conclut, dans un deuxième temps, à travers cette caractérisation minéralogique que le sol étudié contient des métaux lourds qui peuvent être à l'origine de sa pollution. Le tableau III.5 Synthétise les données obtenues par DRX sur l'ensemble des échantillons de sol.

Tableau III.5 Phases identifiées pour les différents échantillons de sol.

Désignation	Formule chimique	Échantillons identifiée
Calcite	$CaCO_3$	E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8
Quartz	SiO_2	E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8
Nacrite	$H_4Al_2Si_2O_9$	E1, E4
Alurgite 2M1	$(K_{.94}Na_{.06})(Mg_{.08}Al_{1.75}Fe_{.15}Mn_{.02})(Al_{.92}Si_{3.08})O_{10}(OH)_2$	E1
Eucryptite beta	$LiAlSiO_4$	E1
Coulsonite	FeV_2O_4	E2
Kaolinite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	E3
Liujinyinite	Ag_3AuS_2	E3
Anatase	TiO_2	E4
Jakobsite	$MnFe_2O_4$	E4
Perovskite	$CaTiO_3$	E4
Sodalite	NiO	E4
Muscovite	$KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$	E5, E6, E7
DeuteriumOxide	D_2O	E5
Nontronite	$Na_{0.33}Fe_{2+3}(Si,Al)_4O_{10}$	E5
Kammererite	$Ca_{0.1}(Mg_{4.75}Cr_{0.46}Fe_{0.1})(Si_{2.93}Al_{0.93})O_{10}(OH)_{8.7}$	E6
Rutile	TiO_2	E6
Nickel alumite	$A_{14}H_{18}NNiO_{22}S$	E7
Fraipontite-1	$(Zn,Al,Cu)_3(Si,Al)_2O_5(OH)_4$	E8
Ulvospine	Fe_2TiO_4	E8
Halloysite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	E8
Moganite	SiO_2	E8
Chaoite	C	E4
Chenevixite	$Cu_2^{+2}Fe_2^{+3}(AsO_4)_2(OH)_4H_2O$	E3

III.3.2.6. Résultats de la spectroscopie Infrarouge

Les groupements fonctionnels associés à chaque vibration sont illustrés sur les figures III. (39-46) et dans le tableau III.6 en pages suivantes.

Une large bande présentant un maximum aux environs de 3420cm^{-1} correspond à amine aromatique (C-N). La bande d'absorption a environ de 695 cm^{-1} est attribuable à la vibration (C-H) de groupe Alcyne $\equiv\text{C-H}$. la bande a environ 3420 cm^{-1} correspond aux groupements hydroxyles d'alcools ou d'acides.

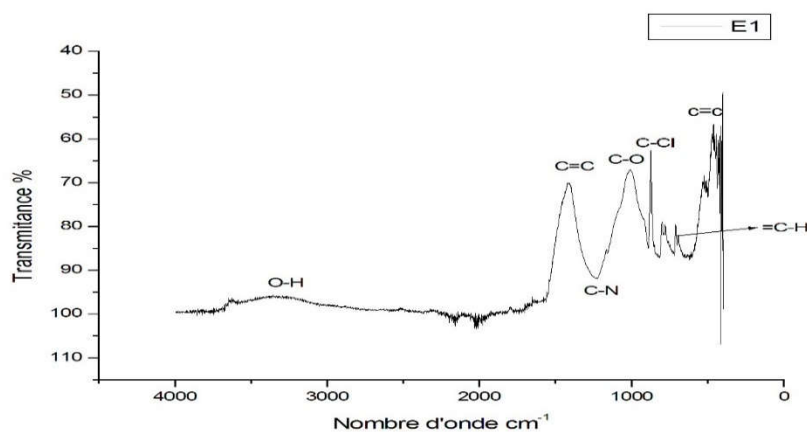


Figure III.39 Spectre infrarouge de l'échantillon E1 du sol

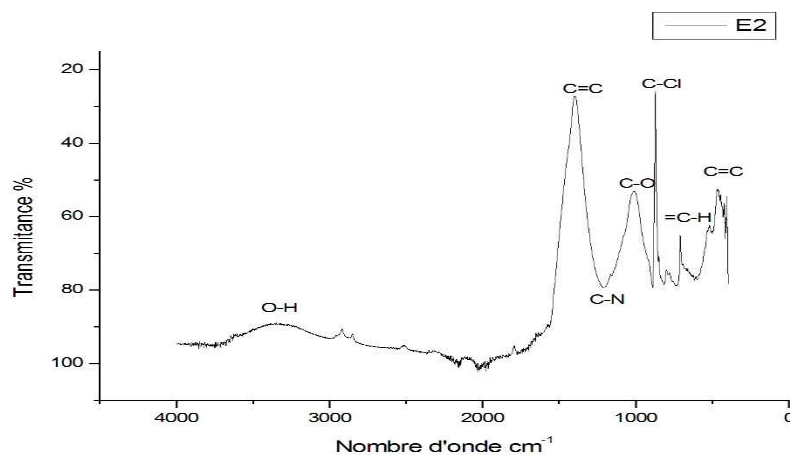


Figure III.40 Spectre infrarouge de l'échantillon E2 du sol

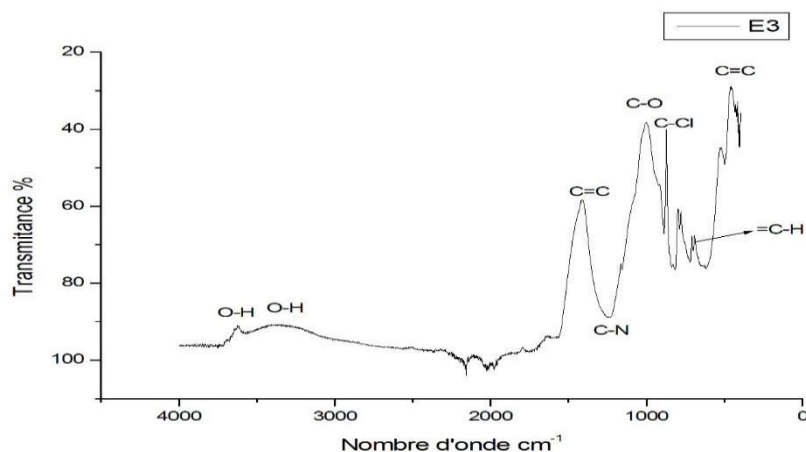


Figure III.41 Spectre infrarouge de l'échantillon E3 du sol

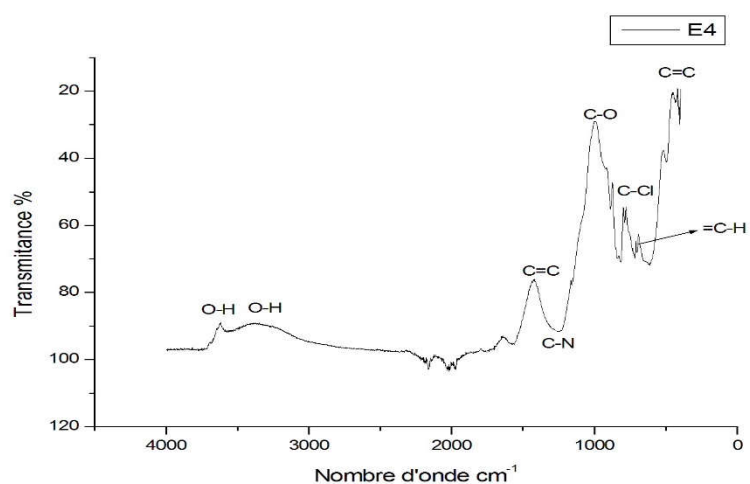


Figure III.42 Spectre infrarouge de l'échantillon E4 du sol

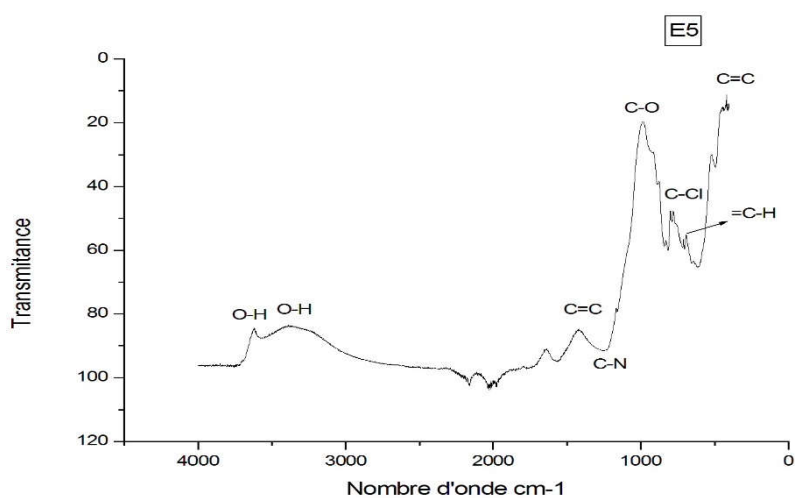


Figure III.43 Spectre infrarouge de l'échantillon E5 du sol

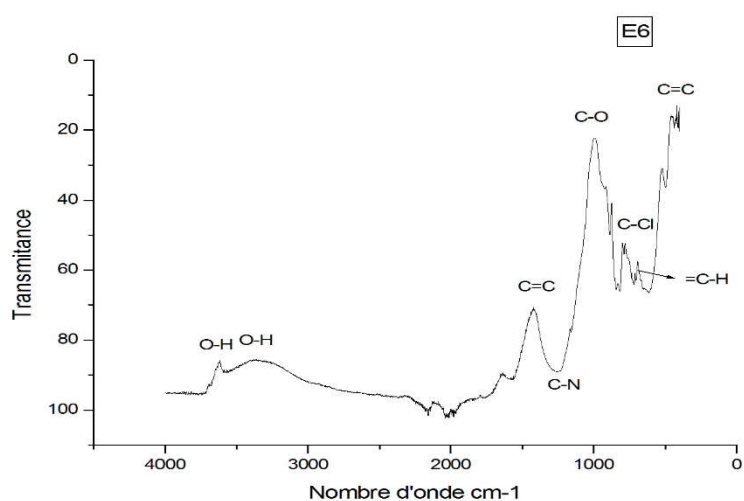


Figure III.44 Spectre infrarouge de l'échantillon E6 du sol

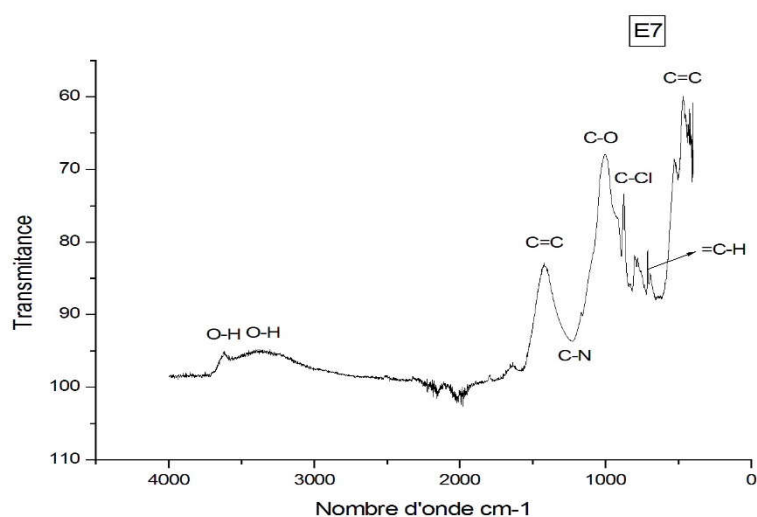


Figure III.45 Spectre infrarouge de l'échantillon E7 du sol

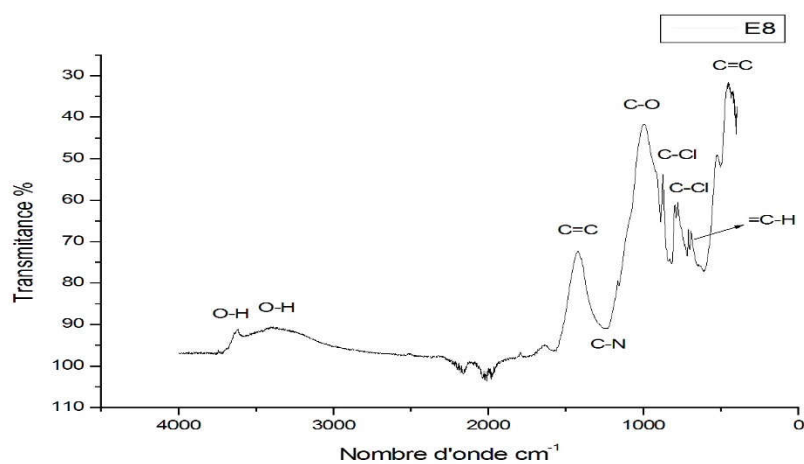


Figure III.46 Spectre infrarouge de l'échantillon E8 du sol

Tableau III.6 Analyse des spectres IR des huit échantillons de sol étudié.

Nombre d'ondes (cm ⁻¹)	Groupe ment fonctionnelles	Constituant associé
3420-3620	Élongation O-H	Alcools phénols [107]
1330	Élongation C-N	Amines [107]
1028	Élongation C-O	Alcool primaires [107]
872-767	Élongation C-Cl	chlorures d'alkyles [107]
695	Élongation $\equiv$ C-H	alcynes [107]
470-1419	Élongation C=C	Cycle aromatique [107]

III.3.2.7. Résultats des tests de lixiviations

Le but du test TCLP est de mesurer les fractions maximales mobilisables des éléments; Après caractérisation des lixiviats on a eu les résultats présentés dans les figures III.(47-51) où l'analyse des éléments Cu^{2+} (Cuivre), Pb^{2+} (plomb), Zn^{2+} (Zinc) et Fe^{2+} (Fer) à donner des valeurs inférieures aux normes, sauf pour le Nickel (Ni^{2+}) qui dépasse la norme exigée.

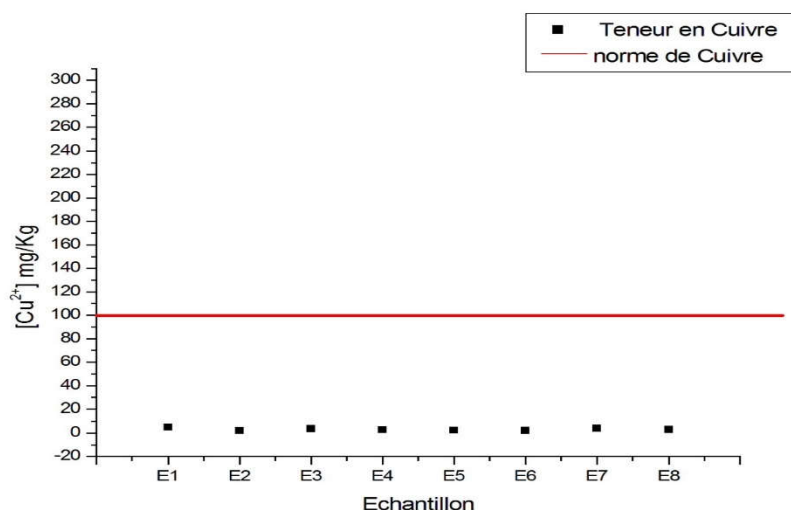


Figure III.47 Évolution des teneurs de cuivre en fonction de type d'échantillons

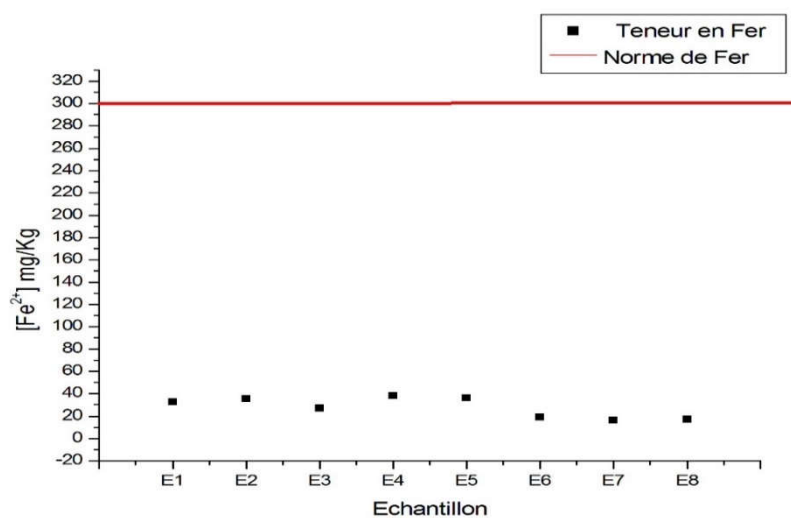


Figure III.48 Évolution des teneurs de fer en fonction de type d'échantillons

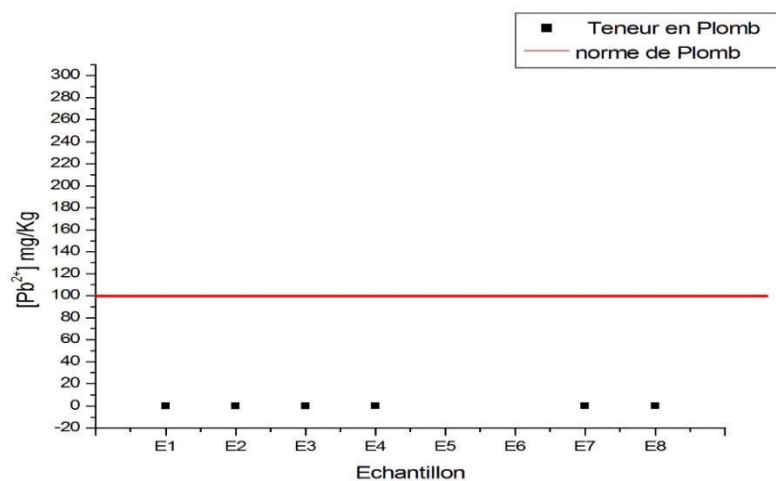


Figure III.49 Évolution des teneurs de plomb en fonction de type d'échantillons

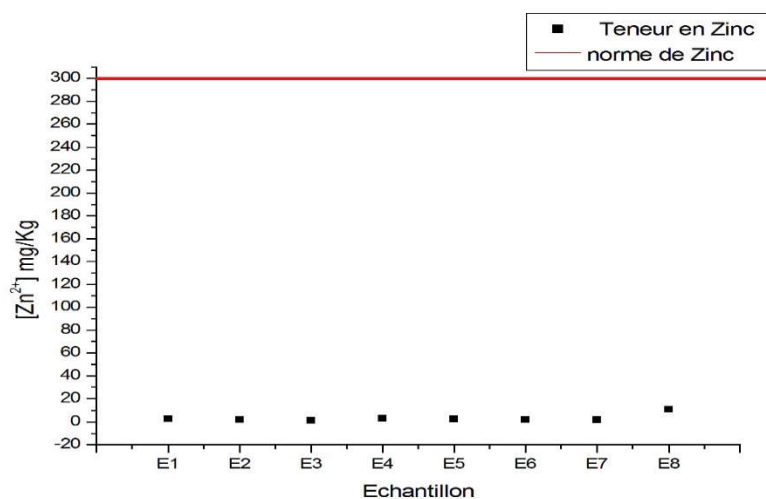


Figure III.50 Évolution des teneurs de zinc en fonction de type d'échantillons

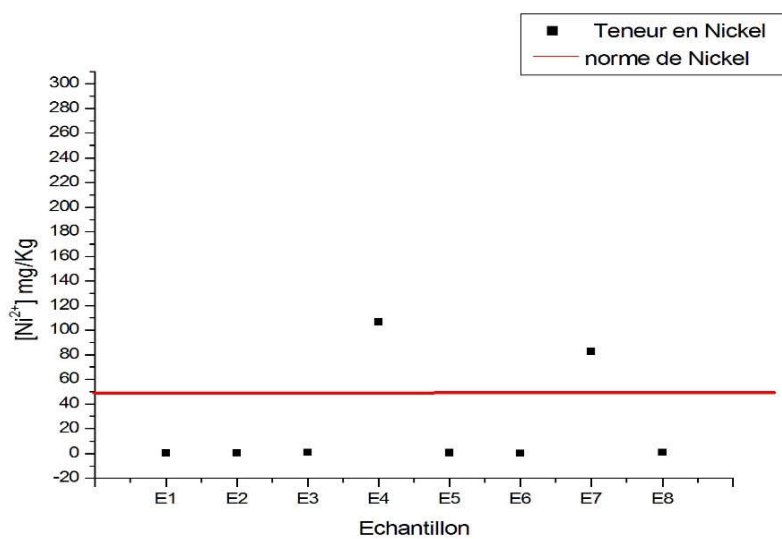


Figure III.51 Évolution des teneurs de nickel en fonction de type d'échantillons

III.3.2.7.1. Teneurs en nickel

On remarque d'après les résultats illustrés sur la figure III.51 pour les différents échantillons de sol que les concentrations en nickel varient entre 0,234 mg/kg et 106,756 mg /kg, et les concentrations des échantillons E4 et E7 dépassent la norme exigée qui est de l'ordre de 50 mg/kg. La concentration la plus élevée est enregistrée pour l'échantillon E4 qui est égale à 106,756 mg/kg.

L'élévation de la concentration en Nickel dans le sol peut être due à la nature de la roche-mère qui est une roches-mères calcaires ainsi que l'incinération et le rejet des déferents déchets dans la décharge.

Conclusion

En terme de cette étude, on conclut que l'ensemble des méthodes de caractérisation utilisées converge vers les mêmes conclusions, et démontrent que le sol étudié est contaminé au minimum par le nickel qui est un métaux lourd nocif pour l'environnement et la santé humaine. À cet effet, la décontamination est nécessaire. Pour ce faire, on propose un procédé de traitement à savoir : la stabilisation/solidification par liants hydrauliques.

III.4. CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX STABILISÉS/SOLIDIFIÉS

Après 14 jours de cure des formulations (sol- ciment- eau), l'opération de préparation mécanique des matériaux S/S pour une caractérisation physico-chimiques a été entamée.

III.4.1. Composition minéralogique des matériaux après S/S

Les figures III.(52-61) présentent les diffractogrammes obtenus par DRX des matériaux S/S

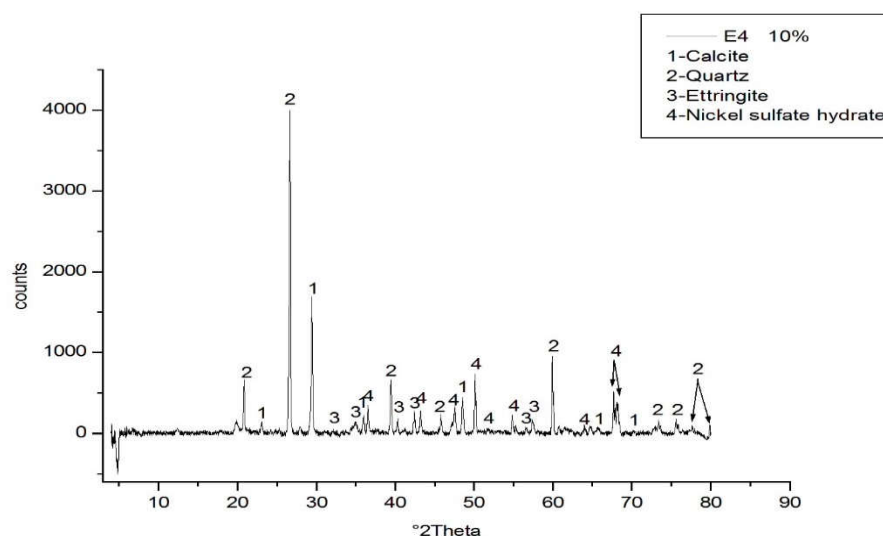


Figure III.52 Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E4 10%

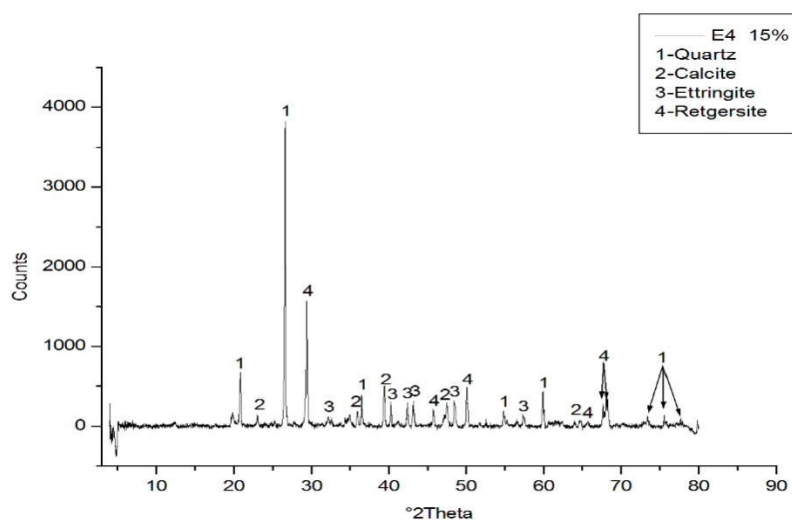


Figure III.53 Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E4 15%

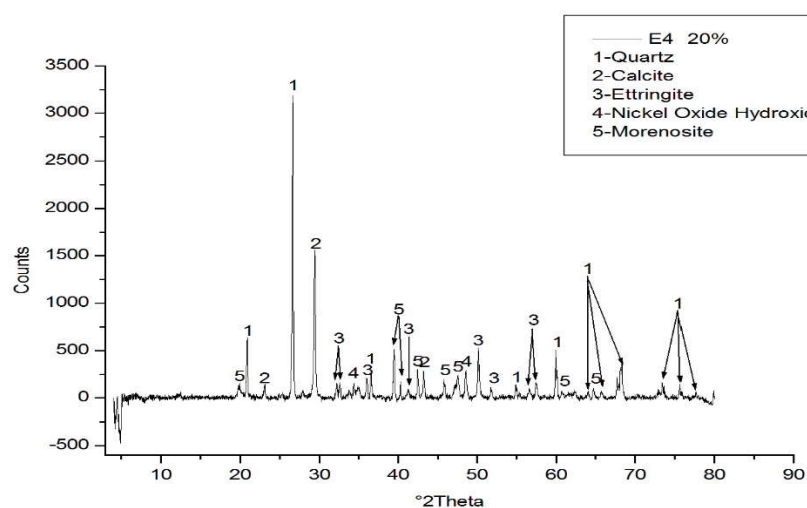


Figure III.54 Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E4 20%

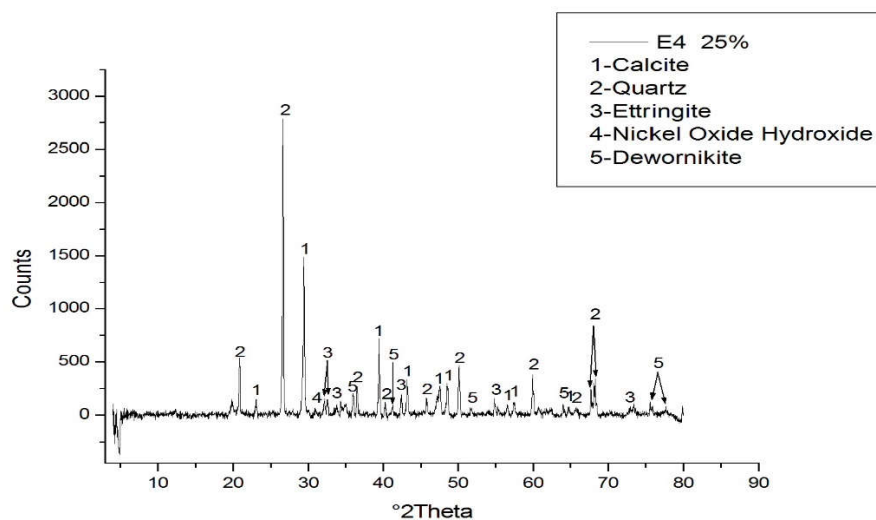


Figure III.55 Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E4 25%

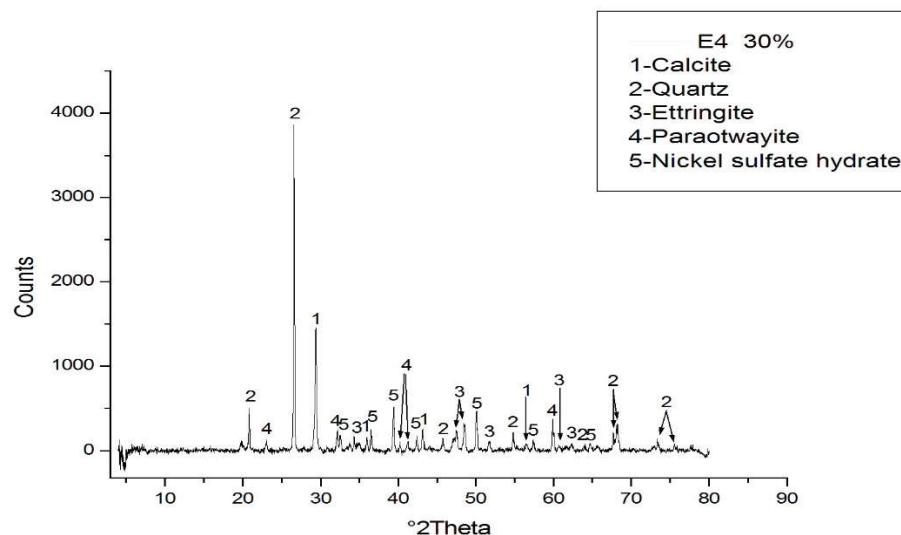


Figure III.56 Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E4 30%

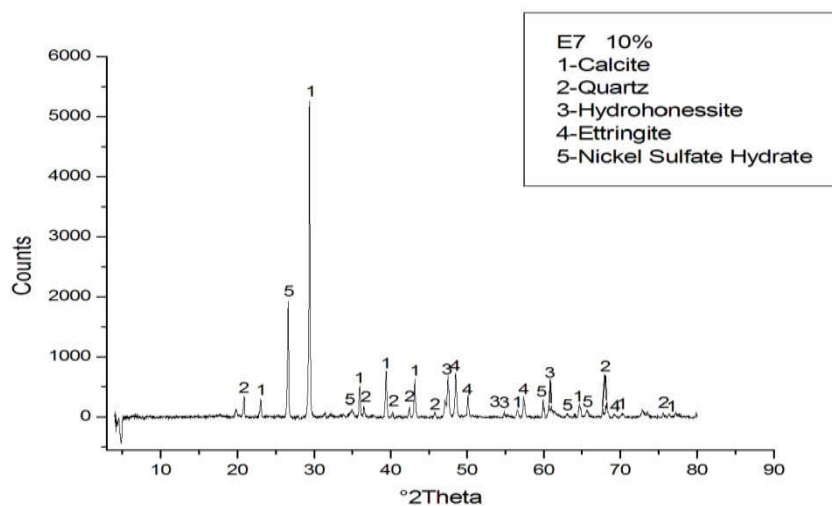


Figure III.57 Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E7 10%

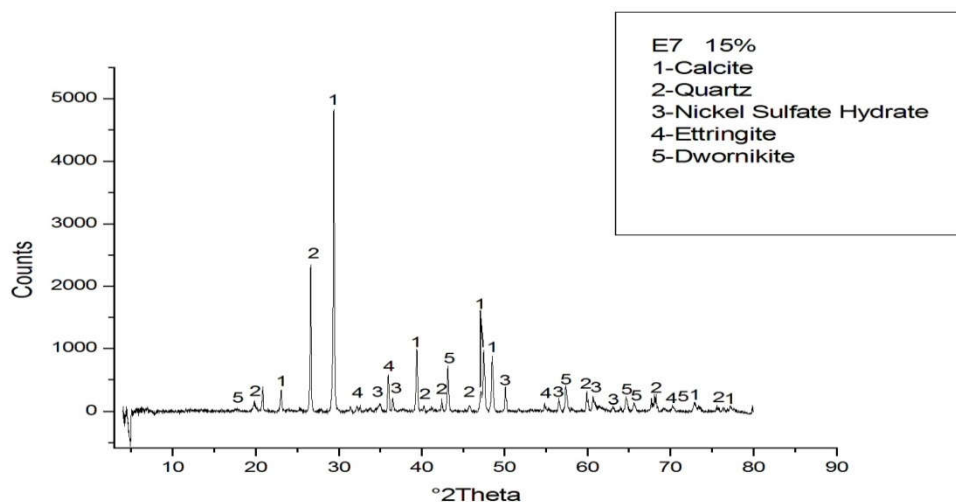


Figure III.58 Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E7 15%

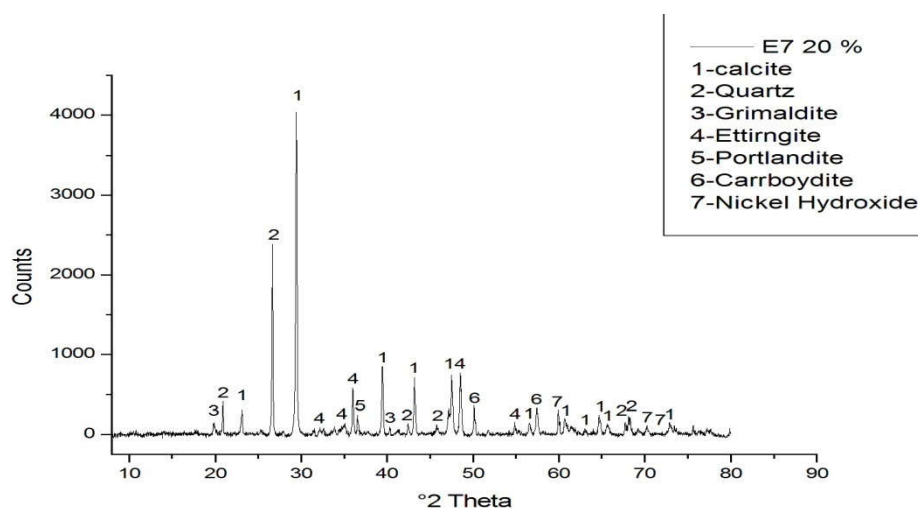


Figure III.59 Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E7 20%

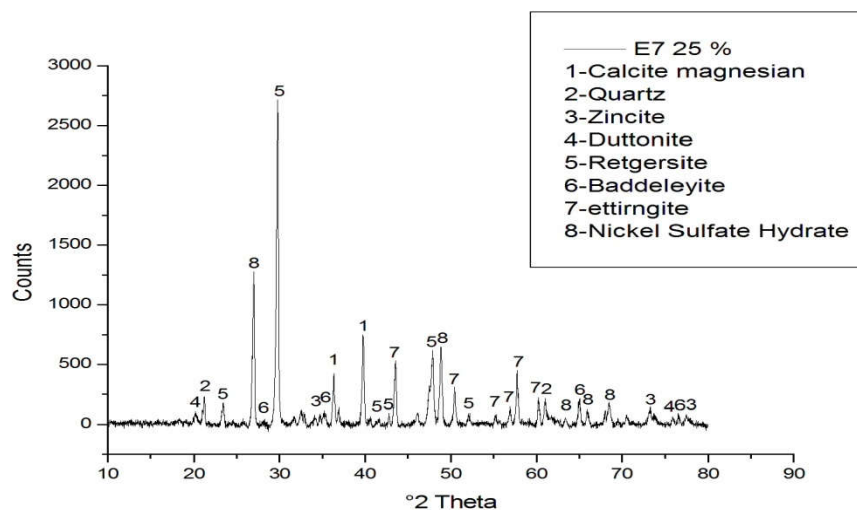


Figure III.60 Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E7 25%

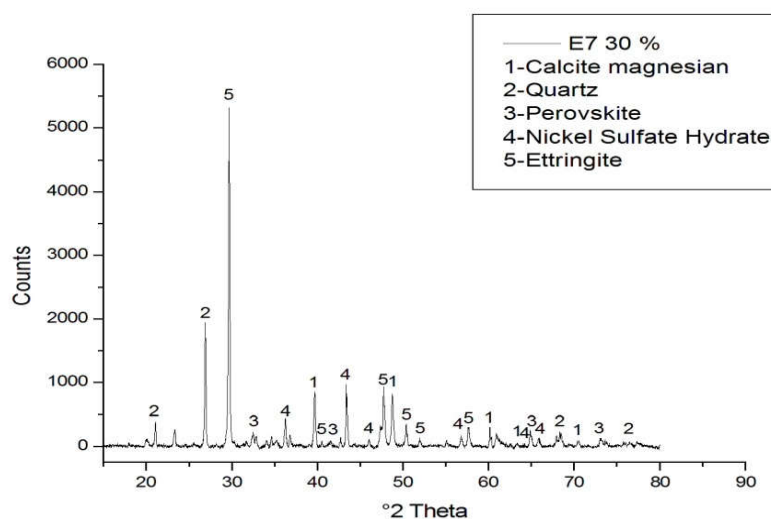


Figure III.61 Spectre DRX de matériaux S/S pour l'échantillon E7 30%

Le tableau III.7 synthétise les résultats obtenus par DRX sur l'ensemble des échantillons de sol traité par le procédé S/S. Les diffractogrammes obtenus après le procédé de stabilisation / solidification nous permet de constater une différence de composition dans les échantillons avant et après S/S. Ainsi que l'apparition de nouvelle phase comme la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), d'ettringite ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26(\text{H}_2\text{O})$) .

Tableau III.7 Phases identifiées pour les matériaux S/S.

Phases minérales	Formule chimique	Échantillons identifiée
Quartz	SiO_2	E4, E7
Calcite	CaCO_3	E4 E7 10%,15%,20%,
Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	E7 20%
Ettringite	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26(\text{H}_2\text{O})$	E4, E7
Nickel Sulfate Hydrate	$\text{Ni}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	E4 10%,30%, E7 10%, 15%, 25%, 30%
Retgersite	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	E4 15% E7 25%
Hydrohonessite	$\text{Ni}_6\text{Fe}_{2+3}(\text{SO}_4)(\text{OH})_{16} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	E7 10%
Dwornikite	$\text{NiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	E4 25% E7 15%
Perovskite	CaTiO_3	E7 30%
Zincite	ZnO	E7 25%
Duttonite	$\text{V}_4\text{O}(\text{OH})_2$	E7 25%
Baddeleyite	ZrO_2	E7 25%
Paraotwayite	$\text{Ni}(\text{SO}_4)_{0.3}(\text{OH})_{1.4}$	E4 30%
Nickel Hydroxide	$\text{Ni}(\text{OH})_2$	E7 20%
Nickel OxideHydroxide	$\text{Ni}_{1.94}\text{O}_3\text{H}_{.81}$	E4 25%, 20%
Carrboydite	$\text{Ni}_{14}\text{Al}_9(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_{43} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	E7 20%
Morenosite	$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	E4 20%
Grimaldite	HCrO_2	E7 20%
Calcite magnesian	$(\text{Mg}_{.064}\text{Ca}_{.936})(\text{CO}_3)$	E7 25%, 30%

En terme de comparaison des diffractogrammes obtenus avant et après stabilisation/ solidification de différents échantillons de sol, on distingue une différence notable dans les intensités des pics caractéristiques de différentes phases minéralogiques de sol (quartz, calcite) qui est dû à la formation de nouvelles phases tel que Nickel Sulfate Hydrate $\text{Ni}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, Retgersite $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$...etc. Nous avons remarqué aussi la disparition de certaines phases à savoir : Jakobiste (Fe_2MnO_4)...etc.

III.4.2. Caractérisation de lixiviats obtenus par TCLP après S/S

III.4.2.1. Teneur en Nickel

Le résultat obtenu pour la concentration du nickel après S/S est illustré dans la figure III.62. On constate que la concentration de Ni^{2+} est significativement réduite pour l'échantillon 4 à 20% de sol, cette concentration après S/S était au-dessous de la norme qui est de l'ordre 50 mg/kg, ce qui justifie l'efficacité du procédé utilisé dans le traitement de sol contaminé.

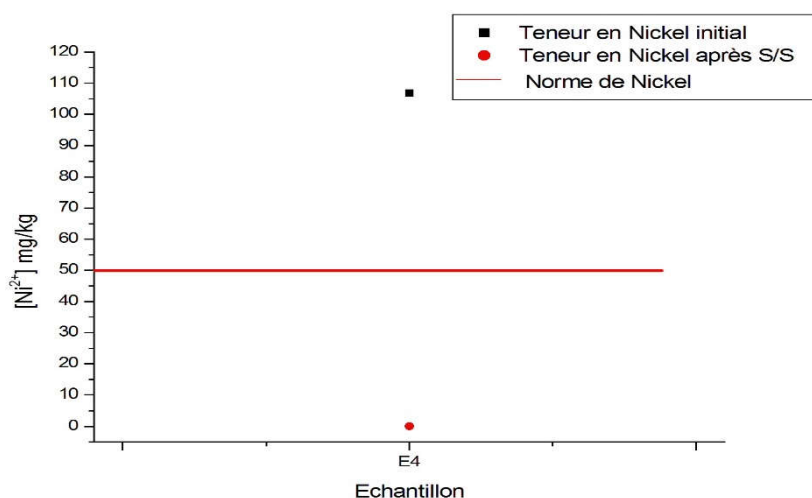


Figure III.62 Évolution de la concentration du nickel dans l'échantillon 4 à 20% après S/S

III.4.2.1.1. Taux de rétention du nickel

D'après le résultat enregistré dans le tableau III.8, on remarque que la concentration de nickel dans l'échantillon 4 à 20% de sol après S/S a été diminuée d'une quantité remarquable par rapport à la concentration du sol brut. Un taux de rétention de 99,98 % a été enregistré, cela s'explique par le fait qu'une partie du nickel est piégée efficacement par les phases minéralogiques formées pendant l'hydratation et l'opération de la S/S de l'échantillon brut. Ce résultat est bien confirmé par les spectres obtenus par DRX.

Tableau III.8 Taux de rétention du nickel en (%) dans la matrice cimentaire.

Désignation	$[\text{Ni}^{2+}]$ avant s/s (mg/kg)	$[\text{Ni}^{2+}]$ après s/s (mg/kg)	Quantité (mg/kg)	Taux de rétention (%)
E4 (20%)	106,756	0,02	106,736	99,98

NB : À cause d'une panne matériel on n'a pas pu analyser les autres échantillons obtenus par la TCLP après S/S.

Conclusion

Enfin, d'après les résultats obtenus par S/S on peut conclure que l'ajout du ciment portland aux sols contaminé a eu un effet positif sur la réduction de la toxicité et la mobilité des métaux lourds dans l'environnement. En général, cela est réalisé par le piégeage physico-chimique et mécanique de ces derniers et leurs emprisonnements au sein de la matrice cimentaire.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est d'étudier la capacité et l'efficacité du traitement par Stabilisation / solidification par liants hydrauliques du sol contaminé d'une décharge sauvage par les métaux lourds situé à BOULIMAT dans la ville de Bejaia

Notre étude expérimentale a été divisée en deux parties :

✓ La première partie a été consacrée à la caractérisation du sol et du lixiviat dans le but de déterminer les caractéristiques physiques et chimiques de ces derniers et de proposer un traitement adéquat. Les résultats ont montré que:

- L'analyse granulométrique a montré un sol d'une classe granulométrique variée et non homogène.
- L'analyse par Diffraction des Rayons X nous a permis d'identifier plusieurs phases minérales distinctes, principalement la calcite, le quartz, et d'autres caractérisant signifient la présence des métaux lourds tel que le nickel, le plomb et le zinc.
- L'analyse par spectroscopie infrarouge mis en évidence la présence de la matière organique dans le sol et la boue, caractérisée par les liaisons $-CH=CH-$ d'un cycle aromatique et C-N d'Amine Aromatique.
- Les résultats obtenus pour le lixiviat et le test TCLP pour le sol et la boue on abouti aux résultats suivants:
 - Des concentrations élevées en chlorure pour le lixiviat et de faibles concentrations pour le sol.
 - Des concentrations élevées en nickel qui dépassent la norme exigé qui est de l'ordre de 50 mg /kg pour la boue et le sol.
 - Des concentrations élevées en fer qui dépassent largement la norme exigé qui est de l'ordre de 3 mg/l pour le lixiviat.

✓ Dans la seconde partie une caractérisation du sol et du lixiviat Stabilisés/solidifiés par le liant hydraulique (ciment portland) a été réalisé et cela en utilisant des pourcentages variables du ciment pour le sol et des éprouvettes de (4*4*16 cm³) pour le lixiviat dans le but de diminuer la mobilité et la teneur des métaux et ainsi de comparer l'efficacité de ce dernier.

Les résultats obtenus sont :

- L'analyse DRX a montré que la composition minéralogique des matériaux S/S, est principalement composée de la portlandite et de l'ettringite. Nous avons remarqué aussi la disparition de certaines phases comme Jacobsite et Nickel Alumite et l'apparition de nouvelles phases comme Nickel Sulfate Hydrate et Iron Oxyde Hydrate.
- Les résultats de résistance mécanique à la compression et à la flexion obtenus sur éprouvettes, sont très intéressants car ils mettent en avant que les propriétés mécaniques sont influencées par la présence des polluants inorganiques. Il apparaît que le nickel accélère la prise.
- Les résultats de TCLP ainsi réalisés après S/S on montrés que la concentration en Nickel (Ni^{2+}) pour l'échantillon du sol S/S atteint un taux de rétention de l'ordre de 99.9 (%).

De ce fait, on conclut que le procédé de solidification/stabilisation adapté pour la réhabilitation du sol contaminé est adéquat et satisfaisant.

En perspectives, on projette d'étudier les mécanismes réactionnels des espèces chimiques (Métaux lourds) dans les matrices cimentaires S/S par liants hydrauliques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[01] BELLE E, 2008 - Évolution de l'impact environnemental des lixiviats d'ordures ménagères sur les eaux superficielles et souterraines, approche hydrobiologique et hydrogéologique. Site d'étude : décharge d'Étueffont (Territoire de Belfort – France). Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 250 p.

[02] Sidi OuldAloueimine, 2006 - Méthodologie de caractérisation des déchets ménagers à Nouakchott (Mauritanie) : contribution à la gestion des déchets et outils d'aide à la décision, Thèse de doctorat, Université de Limoges, 195p.

[3] Rogaume, T, 2006. Gestion des déchets: réglementation, organisation, mise en œuvre, ellipses. Techno scup, Paris.

[04] <http://www.amblans-et-velotte.fr/index.php?IdPage=1349182733>

[05] BERTHE C, 2006 - Etude de la Matière Organique contenue dans des lixiviats issus de différentes filières de traitement des déchets ménagers et assimilés. Thèse de Doctorat, Université de Limoges. 196 p.

[06] KHATTABI H, 2002 - Intérêts de l'étude des paramètres hydrogéologiques et hydrobiologiques pour la compréhension du fonctionnement de la station de traitement des lixiviats de la décharge d'ordures ménagères d'Etueffont (Belfort, France), Thèse de Doctorat, Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Franche Comté. 167 p

[07] COLIN, F., Étude des mécanismes de la genèse des lixiviats. Inventaire et examen critique des tests de laboratoire, Nancy IRH - Rapport RH 84-136, 1984.

[08] GLANDIER S, 2002 - Risques sanitaires liés aux fuites de lixiviats des centres de stockage des déchets ménagers et assimilés, Mémoire de fin d'études, l'École Nationale de la Santé Publique, 92 p.

[09] Sposito. G. 1997. The Chemical Composition Of Soils. The Chemistry Of Soils. Oxford University Press. New-York: P3-27

[10] Nortcliff. S. (2002). Standardisation Of Soil Quality Attributes agriculture. Ecosystems & Environment 88(2) P161-168

[11] Information, exemple, sensibilisation, réflexion, méthodologie, état des lieux, point de vue». Technique. LE RESEAU « PEDOLOGIE », Fiche du CNIG n°126 - 2009 LE RESEAU

PEDOLOGIE

- [12] Sposito g, the chemistry of soil ,newyork :oxford university press inc,277 p,1989
- [13] Calvet, R., Le sol propriétés et fonctions, Tome 1, France agricole DUNOD, 455 p. (2003).
- [14] Mr Baba Ahmed Abderrazzak, étude de contamination et d'accumulation de quelques métaux lourds dans des céréales, des légumes et des sols agricoles irrigués par des eaux usées de la ville de boughirara, universite aboubakr belkaid- année universitaire 2011/2012
- [15] SOLTNER, D :Distribution Liquid Et Voie Métabollique Chez Quatre Bactéries Gramnégative Hydrocarbonoclaste. Variation En Fonction De Sources De Carbone. Docteur De L'université PARIS 6 2004
- [16] GOBAT .J.M, ARAGNO M Et MATTHEY W : Le Livre (Le Sol Vivant : Base De Pédologie Et Biologie Des Sols). 3eme Edition Revue Et Augmentée P150-165/2010
- [17] REDLICH G/C Et VERDURE - Le Comportement Physique Des Tourbes En Cours De Culture PHM.Revue Horticole.160 ; P 13-20 1975
- [18] KOLLER EMILIAN. Traitement Des Pollutions Industrielles. Edition DUNOD Paris.P 277-347, 2004.
- [19] BLANC D. Les Structures Hors Sol INRA Ed Louis.Paris.409p 1985
- [20] BOUDOUCHE.O. « Étude De Dépollution Des Sols Par Extraction Sous Pression Réduite .Application Au Traitement Des Composés Organiques Volatiles ». Thèse De Doctorat. Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon. 2009.
- [21] BASOL, [Http://Basol.Ecologie.Gouv.Fr/Home.Htm](http://Basol.Ecologie.Gouv.Fr/Home.Htm)
- [22] Guides Méthodologiques Pour L'analyse Des Sols Pollués, R. Jeannot, B. Lemiére, S. Chiron Avec La Collaboration De F. Augustin, D.Darmendrail. Éditions BRGM 2001
- [23] BENGUEDDA-RAHAL Wacila, Contribution à l'étude de la bioaccumulation métallique dans les sédiments et différents maillons de la chaîne trophique du littoral extrême ouest algérien, thèse, page 15.
- [24] Le Goff F, Bonnomet V, 2004. Devenir et comportement des métaux dans l'eau - biodisponibilité et modèles BLM, Rapport Technique Direction des Risques Chroniques Unité «Evaluation des Risques Écotoxicologiques », Paris, 85p. NH.

- [25] Darmendrail, D. ; Baize, D. ; Barbier, J. ; Freyssinet, P. ; Mouvet, C. ; Salpéteur, I. ; Wavrer, P. Fonds géochimique naturel : État des connaissances à l'échelle nationale. BRGM/RP-50518- FR, 93 p. (2000).
- [26] Miquel, M. Rapport sur les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, N° 2979 Assemblée Nationale, N°261 Sénat. (2001)
- [27] L. Sigg, W. Stumm, P. Behra, Chimie des milieux aquatiques. Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement. Edition MASSON, p391, Paris, France, 1992.
- [28] J. L. Lassaigne, Abrégé élémentaire de chimie 2ème édition « Béchet jeune » Tome I, 1836.
- [29] M. Di Benedetto, méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisations, livre 1997, page 23.
- [30] OECD, Indicateurs environnementaux pour l'agriculture Méthodes et résultats .Volume 3, éditeur : OECD publishing , p.440, 2001.
- [31] Jeannot R., Lemièrre B., Chiron S., Augustin F. & Darmendrail D., 2001. Guide Méthodologique Pour L'analyse Des Sols Pollués. Editions BRGM, Orléans, France, 85 Pp
- [32] C. Bliefert And R. Perraud. Chimie De L'environnement. Air, Eau, Sols, Déchets. De Boeck Université, Paris, Bruxelles, 1re édition, 2008.
- [33] http://www.ecosociosystemes.fr/pollution_diffuse_sols.html
- [34] Denis Baize. Petit Lexique De Pédologie. INRA Editions, Paris, 2004.
- [35] BAIZE. D. « Teneurs Totales En Eléments Traces Métalliques Dans Les Sols » .Edition INRA, (France) P408. 1998.
- [36] Manceau, A., Marcus, M.A & Tamura, N., Quantitative speciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques, in Applications of synchrotron radiation in low temperature. Geochemistry and environmental science; Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Mineralogical Society of America, 49, 341-428. (2002).
- [37] Sirven J B, 2006. Détection de métaux lourds dans les sols par spectroscopie d'émission sur plasma induit par laser, Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, pp : 252.

- [38] TOUZE .S,CHARTIER. R, GABORIAU .H, « Etat De L’art Sur Les Barrières Perméables Réactives (BPR) ». Réalisations,Expériences, Critères Décisionnels Et Perspectives.BRGM/RP 52973-FR, P131.2004.
- [39] Sahnoune Rachid .Mémoire de Master Prés .Thème : Analyse et Caractérisation physico-chimique des Sols d’Entreposage de la station de Pétrole (Bejaia).
- [40] BENAÏSSA Meriem et MEDDOOUR Rahma, caractérisation et traitement par stabilisation/solidification au liant hydraulique d’un résidu pétrolier, en vue de l’obtention de diplôme de master en chimie, spécialité : analyses chimiques, université de Bejaia 2016.
- [41] (Procédés de traitements physiques et chimiques des sols pollués Auteur(s) : Marie-Odile SIMONNOT, Véronique CROZE Date de publication : 10 déc. 2008)
- [42] APICHAT Imiyim, D’évaluation environnementale des déchets stabilisés/solidifiés par liants hydrauliques, thèse, l’institut national des sciences appliqué de Lyon, Décembre 2000, page 61, 62, 63, 64, 65, 65.
- [43] PEYRONNARD Olivier, Apports méthodologiques pour la modélisation du comportement à la lixiviation de résidus minéraux. Application aux solidifiats de boues d’hydroxydes métalliques, Thèse, L’Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Année 2008, page 62, 63, 75.
- [44] Freeman. H.M Harries. F, « Solidification/Stabilization of Organics and Inorganics. In: Hazardous waste remediation - Innovative treatment technologies», Pennsylvania (USA), p261 (2005)
- [45] Moyeux. V, « Evaluation des procédés de stabilisation », la démarche française. In : Actes du congrès international sur les procédés de solidification et de stabilisation des déchets ; Grenoble ; Société Alpine de Publications, p49. (2001).
- [46] Site Internet Du Groupe SITA FD : [Www.Sitagroup.Com](http://www.sitagroup.com)
- [47] « Conférence Mâchefers Et REFIOM, Retours D’expérience Et Perspectives De Traitement », Pollutec 96, Ademe, ATEE, 22 Octobre 1996, 191 P.
- [48] Federal Remediation Technologies Roundtable. 2007. « The Remediation Technologies Screening Matrix ». En Ligne. < [Http://Www.Frtr.Gov/Scrntools.Htm](http://www.frtr.gov/scrntools.htm) >. Consulté Le 4 Février 2012.
- [49] J.P. Cerdan, « La Vitrifaction Des Cendres Issus De L’incinération Des Ordures Ménagères », TSM N°5, Mai 95 CfValenti)

- [50] P. Fourcy, « Stabilisation / Solidification De REFIOM Par Une Cendre Volante De Lit Fluidisé : Performances Et Mécanisme De Transfert » Thèse De Doctorat De L'ust Lille, 316 P, 2000
- [51] Deschamps, T., M. Benzaazoua, B. Bussière, T. Belem, M. Mbonimpa, P. Boudes, G. Belem, B. Sarrasin, C. Figuière Et CbrmRatrimoarivony. 2006. « Mécanismes De Rétention Des Métaux Lourds En Phase Solide: Cas De La Stabilisation Des Sols Contaminés Et Des Déchets Industriels ». Vertigo - La Revue Electronique En Sciences De L'environnement. En Ligne. Vol. 7, No 2. <[Http://Vertigo.Revues.Org/Index2171.Html](http://Vertigo.Revues.Org/Index2171.Html) >.
- [52] United States Environmental Protection Agency. Technical Resource Document: Solidification/ Stabilization and Its Application To Waste Materials. EPA/530/R- 93/012. Washington, DC, 372 P. 2006.
- [53] Conner, Jesse R., Et Steve L. Hoeffner. « A Critical Review Of Stabilization/Solidification Technology ». Critical Reviews In Environmental Science And Technology, Vol. 28, No 4, P. 397-462. 1998a.
- [54] Knox, Robert C., David A. Sabatini Et Larry W. Canter. Subsurface Transport And Fate Processes. Boca Raton, FL: Lewis, 430 P. 2000.
- [55] Jonathan Rémillard, Influence De L'altération Physique Sur Les Caractéristiques Physico-Chimiques De Monolithes De Sols Contaminés Traités Par stabilisation/Solidification Au Ciment Montréal, 2012
- [56] Van Der Sloot, H. A., Et J.J. Dijkstra. Development Of Horizontally Standardized Leaching Tests For Construction Materials : A Material Based Or Release Based Approach?, ECN-C--04-060, Energy Research Centre Of The Netherlands. Petten, Netherlands, 56 P. 2004.
- [57] Johnson, R. L., C. D. Palmer Et W. Fish. « Subsurface Chemical Processes ». In Transport And Fate Of Contaminants In The Subsurface. (Cincinnati, OH And Ada, OK), P. 41-56. United States Environmental Protection Agency. EPA/625/4-89/019. 1991.
- [58] Rahman, K. S. M., Et M. A. V. Murthy. « Stabilization Of Chromium By Reductase Enzyme Treatment ». In Stabilisation/Solidification Treatment And Remediation: Advances In S/S For Waste And Contaminated Land, Sous La Direction De Al-Tabbaa, Abir, Et Julia A. Stegemann, P. 347-355. A.A. Balkema Publishers. (London, UK, Cambridge, 12-13 Avril 2005).

- [59] S. Maraval, « Stabilisation / Solidification De Déchets Ultimes, Etude Comparative De Divers Liants Hydrauliques Et De La Vittrification. Cas Des Cendres D'incinération Des Ordures Ménagères », Thèse INSA Lyon, 316 P, 1994.
- [60] S. Rémond, « Evolution De La Microstructure Des Bétons Contenant Des Déchets Au Cours De La Lixiviation », Thèse De Doctorat De L'ens Cachan, 243 P, 1998.
- [61] F. Sanchez, « Etude De La Lixiviation De Milieux Poreux Contenant Des Espèces Solubles : Application Au Cas De Dechets Solidifiés Par Liants Hydrauliques. », Thèse De Doctorat De L'insa De Lyon, 225p, 1996.
- [62] S. Rémond, D.P. Bentz, P. Pimienta, J.P. Bournazel, « Cement Hydratation In The Presence Of Municipal Silid Waste Incineration Fly Ash », Material Science And Concrete Properties, First International Meeting, Toulouse, March 5-6, 1998
- [63] Spence. R. D, Gilliam. T. M, MrganE, I.L, and Osborne. S, « Stabilization/solidification of wastes containing volatile organic compounds in commercial cementitious waste forms»Philidephia: ASTM, p 61. (2000)
- [64] Agence Française de Normalisation. « Essai de lessivage d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification. Normalisation Française. N° X31-211. Paris : AFNOR, p13, (2002).
- [65] Cabane. N, « Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation», Thèse de doctorat, Centre des Matériaux de Grande Diffusion de l'Ecole des Mines d'Alès, (2004).
- [66] NFP 15-301, Liants Hydrauliques: Définition, Classification et Spécifications de Ciments, AFNOR, Paris, (1998).
- [67] SPENCE, R. D. GILLIAM, T.M. MRGANE, I.L, AND OSBORNE, S. C. «Stabilization/Solidification Of Wastes Containing Volatile Organiccompounds In Commercial Cementitious Waste Forms ». Philidephia: ASTM, Pp. 61-72. 1997.
- [68] ADASKA .W. S, TRESOUTHICK. S.W, WEST, P. B, « Solidification And Stabilization Of Wastes Using Portland Cement». Skokie: Portland Cements Association, 17 P, (2001).
- [69] TAYLOR, H.F.W. « Cement Chemistry ». 2ème Edition. London: Academic Press, (2001).

[70] Amaril aothmane, bouchettout fatah, mémoire fin d'études, étude de la stabilité des agrégats des sols de la station boulimat de la côte ouest de bejaia, université Abderrahmanemire – Bejaia, 2007/2008.

[71] Gueguen, L & Martin, A., Apports nutritionnels conseillés pour la population française, Paris, tec et doc –Lavoisier .P.131-140, (2001).

[72] <https://www.lachimie.fr/organique/technique/filtration.php>

[73] Centre D'études Sur Les Réseaux, Les Transports, L'urbanisme Et Les Constructions Publiques, Comparaison De Méthode D'analyse Des Eléments Traces Métalliques Etm Et Des Hydraucarbures Aromatiques Polycycliques Hap Qur Les Sols Et Les Végétaux.

[74] <https://www.retsch.fr>

[75] S.Dudka, And; D.C.A.;Driano. Environmental Impacts Of Metal Ore Mining And Processing: A Review, J. Environ Qual.26 590-602. 1997

[76] Association (apha), american water works association (awwa), water environment federation (wef), Standard Methods for the Examination of Water dans Wastewater; 21e édition, 2005, 4500B.)

[77] L. Hernandez, A. Probst, J.L. Probst And E. Ulrich. Heavy Metal Distribution In Some French Forest Soils, Evidence Form Atmospheric Contamination. J. Sci. Total Environ. 312 (2003)195-219.

[78] EN 196-1. Méthodes d'essais des ciments. Détermination des résistances mécaniques. Avril 2006.

[79] Centre D'expertise En Analyse Environnementale Du Québec Ma. 100 – Lix.Com. 1.1 Protocole De Lixiviation Pour Les Espèces Inorganiques Edition : 2010-09-08.

[80] M.TARDAT-HENRY, J.PAUL-BEAUDRY, Chimie des eaux, Edition Le Griffon d'argile, livre, 1984, Page 45.

[81] Jean RODIER Bernard LEGUBE, Nicole MERLET et coll. L'Analyse de l'eau **9e édition** Dunod, Paris, 2009 © Dunod Paris, 1959, pour la 1re édition

[82] Frejsek., Analyse de l'eau: aspect réglementaire et technique, p358, édition CRDP d'aquitaine France, (2002).

[83] Rouessac. F., Rouessac, A & Cruche D., Analyse chimique, Méthodes et techniques instrumentales modernes, Livre, Edition Dunod,(2004).

- [84] Pradyt, P. Dean's Analytical Chemistry Handbook (McGraw-Hill Handbooks). Second edition. 1114 p. ISBN: 0071410600. (2004).
- [85] TATANGELO Adeline, Optimisation de la précipitation des Métaux lourds en mélange et valorisation des boues d'hydroxydes : application aux effluents de traitement de surfaces, Thèse, l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, février 2013, page 116, 227.
- [86] Smiciklas, I., Dimovic, S., Plecas, I & Mitric M., Removal of Co^{2+} from aqueous solutions by hydroxy apatite. Water Research, 40:pp. 2267 – 2274, (2006).
- [87] Petit.S., Madejova, J., Decareau, A., Martin, F. "Characterization Of Octahedral Substitutions In Kaolinites Using Near Infrared Spectroscopy." Clays And Clay Minerals 47(1): 103_108. 1999.
- [88] <http://www.lrmh.fr/Diffractometrie-de-rayons-X-DRX.html>
- [89] Deniau, I., Caractérisation Géochimique du Kerogene Associe A L'argile Oligocène De Boom (Mol, Belgique) Et Evolution Sous Divers Stress Thermiques. Thèse Doctorat, Université De Paris VI, France, (2002).
- [90] Rehmann, L., Ivanova, E., Ferguson, J., Gunaratne, H.Q.N., Seddon K., & Stephens, G., supplementary information measuring the effect of ionic liquids on lactase activity using a simple, parallel method, Electronic Supplementary Material (ESI) for Green Chemistry, The Royal Society of Chemistry, (2012).
- [91] Bouhamou N, Belas N, Mesbah H, Jauberthie R, Ouali A, Mebrouki A (2009) Influence des rapports eau/ciment et fines/ciment sur le comportement à l'état durci du béton autoplaçant à base de matériaux locaux algériens. Canadian Journal of Civil Engineering 36 :1195-1206.
- [92] Bellache Dihia. Thèse de l'étude et traitement des eaux de purge des bacs d petrol RTC BEJAIA.
- [93] Bob, H., Product Group Manager, Sylvania, Joe Howley, Environmental Marketing Manager, GE Lighting February 24, 2003.
- [94] Azeggagh faiza, Amari zaina. Mémoire de master, Exploration du site « décharge de BOULIMAT » en vue de protection du milieu environnant des risques de contamination minérale et /ou organique, université de bejaia 2017

- [95] Voglar, G.E & Leštan, D., Solidification/stabilization of metals contaminated industrial soil from former Zn smelter in Celje, Slovenia, using cement as a hydraulic binder, *Journal of Hazardous Materials*, (2010).
- [96] Immi N., Fekhaoui M., Foutlane A., Bourchic H., EL Mmaroufy M., Benazzout & T., Hasnaoui M., Relazione plankton-parametri fisici chimici in un bacino dimaturazione (laguna mista Beni Slimane-Marocco. *Rivista Di Idrobiologia*. Università de gli studi di perugia, Dipartimento di Biologia Animale ed Ecologia laboratorio Di Idrobiologia “G.B. Grassi”, 110–111p.). (2003).
- [97] Vierling, E., Aliment et boissons : filière et produit. 3^{ème} édition. Dolin éditeur. Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine, France, p 230, (2008).
- [98] Chofqi A., Mise en évidence des mécanismes de contamination des eaux souterraines par les lixiviats d'une décharge incontrôlée (El. Jadida-Maroc) : géologie, hydrologie, géoélectrique, Géochimie et Epidémiologie. Thèse Univ. El Jadida, Maroc 250p (2004).
- [99] Mattias B. A., Nilson P., Seasonal changes of leachate production and quality from test cells. *J. Envir. Eng. Div. Assce*, P 892-900 (1997).
- [100] Tazi H. Déchets solides : Etude d'impact sur l'environnement (sol, eaux souterraines) et traitement par voies de compostage. Thèse Univ. El Jadida, Maroc, 224p (2001).
- [101] Sayyad, G., Afyuni, M., Mousavi, S.-F., Abbaspour, K. C., Richards, B. K & Schulin R., Transport of Cd, Cu, Pb and Zn in a calcareous soil under wheat and safflower cultivation-A column study. *Geoderma*, vol. 154 pp. 311-320, (2010).
- [102] Hlavackova, P., Evaluation du comportement du cuivre et du zinc dans une matrice de type sol à l'aide de différentes méthodologies. Thèse de Doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 207p, (2005).
- [103] Chiou, C.T & Shoup, T.D., Soil Sorption of Organic Vapors & Effects of Humidity on Sorptive Mechanism & Capacity. *Env. Sci. Technol.*, vol. 18, pp. 4-10. (1985).
- [104] Moral, R., Cortes A., Gomez I & Mataix-Beneyto J. Assessing changes in Cd phytoavailability to tomato in amended calcareous soils. *Bioresource Technology* vol. 85, n° 1, pp. 63-68, 2002.
- [105] Journal Officiel de la République Algérienne N° 26, DÈcret exÈcutif n° 06-141 du 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels.

- [106]** Baize. D, Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France)
Références et stratégies d'interprétation 1997, INRA Éditions, p50
- [107]** Zaydoun.S, Université Mohammed V-Agdal, Faculté des Sciences,SMC5,cours de spectroscopie, TABLES IR.

Annexe I : Production et composition des déchets en Algérie

a. Production des déchets

La quantité des déchets ménagers produits en Algérie varie entre 10 à 12 millions de tonnes par an. La production par tête et par habitant est en constante augmentation. (Voir tableau 1).

Tableau 1 : Évolution de la quantité journalière générée des déchets (Kg/h) (MATET, programme national pour la gestion intégrée des déchets municipaux ,2005)

Année	Villes moyennes	Grandes villes
1980	0,5	0,9
2009	0,76	1,2

b. Composition des déchets

Les déchets ménagers sont un ensemble hétérogène de matériaux. Le tableau suivant présente la composition des déchets dans certaines villes algériennes.

Tableau 2 : Composition des déchets ménagers dans certaines villes algériennes (Municipal solid waste in Mostaganem city (western Algeria), 2005).

Catégories	Mostaganem	Bejaia	Annaba	Djelfa
Matières organiques	64,4 %	69 ,4 %	68,2 %	83,5 %
Papier carton	15,9 %	11,1 %	12,6 %	7,9 %
Plastiques	10,5 %	12,3 %	11,2 %	2,4 %
Métaux	1,9 %	2,7 %	3,7 %	1,7 %
Verre	2,8 %	0,7 %	1,1 %	1,2 %
Textile	2,3 %	3,3 %	2,1 %	1,4 %
Divers	2 %	0,5 %	1,1 %	1,9 %

Le gisement des déchets ménagers produits annuellement par les ménages algériens comporte une fraction récupérable non négligeable que les services du MATET estiment comme suit :

Papier : 385 000 tonne / an

Plastique : 130 000 tonne / an

Métaux : 100 000 tonne / an

Verre : 50 000 tonne / an

Matières diverses : 95 000 tonne / an

Annexe II : Les normes des métaux lourds et les paramètres physiques dans les eaux

I. Les normes algériennes de rejet des effluents

Les eaux usées collectées, dans les réseaux urbains ou les usées directement émises par les industries, ne doivent être rejetées dans un milieu récepteur naturel (rivière, lac, littoral marin, ou terrain dépendage) que lorsqu'elles correspondent à des normes fixées par voie réglementaire.

Le décret exécutif n° 93-160 du 10 Juillet 1993, de Journal Officiel de la République Algérienne réglementant les rejet d'effluents liquides dans son chapitre I, article 2, fixe, en son annexe 1, les valeurs limites de ce rejet. Ces mêmes valeurs viennent d'être renforcées par un nouveau texte réglementaire ; le Décret Exécutif n° 06-141 du 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 Avril 2006, section 1, article 3. Les valeurs limites maximales de rejet d'effluents fixées par ces deux décrets sont regroupées dans le tableau 3.

Avant qu'elle soit rejetées dans le milieu naturel et ne le dégradent, les eaux usées doivent impérativement obéir à des normes établies pour protéger les milieux récepteurs contre tout type de pollution.

Tableau 3. Valeurs limites des paramètres de rejet dans un milieu récepteur (Journal Officiel de la République Algérienne, 2006).

Paramètres	Valeurs limites	Unités
Température	30	mg/l
Ph	6.5 à 8.5	mg/l
MES	35	mg/l
DBO5	35	mg/l
DCO	120	mg/l
Azote kjeldahl	30	mg/l
Phosphates	0.2	mg/l
Phosphore total	10	mg/l
Cyanures	0,1	mg/l
Aluminium	3	mg/l
Cadmium	0,2	mg/l
Fer	3	mg/l
Mercure total	0,01	mg/l
Nickel total	0,5	mg/l
Plomb total	0,5	mg/l
Cuivre total	0,5	mg/l
Zinc total	3	mg/l
Huiles et grasses	20	mg/l
Hydrocarbures totaux	10	mg/l
Indice phénol	0,3	mg/l
Fluor et composés	15	mg/l

Etain total	2	mg/l
Composés organiques chlorés	5	mg/l
Chrome total	0,5	mg/l
(*)Chrome III+	3	mg/l
(*)Chrome VI+	0,1	mg/l
(*)Solvants organiques	20	mg/l
(*)Chlore actif	1	mg/l
(*)PCB	0,001	mg/l
(*)Détergents	2	mg/l
(*)Tensioactifs anioniques	10	mg/l

(*) Valeurs fixées par le décret exécutif n° 93-160 du 10 juillet 1993.

Tableau 4. Les normes physico-chimiques de rejets de l'OMS (1989)

Paramètres		Normes
T	°C	30
PH	mg/l	6,5-8,5
O2	mg/l	5
DBO5	mg/l	30
DCO	mg/l	90
MES	mg/l	30
Zinc	mg/l	2
Azote total	mg/l	50
Phosphates	mg/l	2
Détergents	mg/l	10
Hydrocarbures	mg/l	1
Huiles et graisses	mg/l	20

II. Norme des métaux lourds et les paramètres physiques dans les sols

Différentes normes et références françaises de teneurs totales en métaux lourds dans les sols exprimées en mg/Kg /MS.

	Cd	Co	Cr	Cu	No	Pb	Zn	Mn
Seuil d'anormalité	2	30	150	100	50	100	300	270
Seuil d'investigation	4	60	300	200	100	200	600	
Seuil de traitement	10	150	750	500	250	500	1500	
Seuil d'urgence	20	300	1500	1000	500	1000	3000	3000
Norme AFNOR NF U44-041(1985)	2	150	100	150	50	100	300	10
Article 11 de l'arrêté du 8/1/1998	2		150	100	50	100	300	

Résumé

En Algérie, les décharges sauvages produisent chaque jour des quantités importantes de polluants. Ces polluants souvent sont chargés en hydrocarbures et en métaux lourds dont les teneurs dépassent les normes en vigueur. Cependant, la prise en charge de cette problématique afin de trouver un procédé adéquat au traitement de cette pollution de la décharge de boulimat bejaia est l'un des objectifs majeurs de notre étude.

À travers l'étude réalisée sur la caractérisation du sol et du lixiviat de la décharge sauvage de boulimat bejaia, il ressort que le sol est contaminé par les métaux lourds, de ce fait un traitement est proposé pour remédier à cette problématique à savoir l'incorporation des polluants au sein d'une matrice cimentaire ce que on appelle le procédé de stabilisation/solidification par un liant hydraulique pour but de la réhabilitation du sol.

Mots clés: lixiviat, stabilisation/solidification, décharge, liants hydrauliques.

Abstract

In Algeria, wild dumps produce large quantities of pollutants every day. These pollutants are often loaded with hydrocarbons and heavy metals whose contents exceed the standards in force. However, the management of this problem in order to find an adequate process to treat this pollution of the boulimat bejaia landfill is one of the major objectives of our study.

Through the study carried out on the characterization of the soil and the leachate of the wild dump of boulimat bejaia, it appears that the soil is contaminated by heavy metals, therefore a treatment is proposed to remedy this problematic namely the incorporation of pollutants into a cementitious matrix what is called the stabilization / solidification process by a hydraulic binder for the purpose of soil rehabilitation.

Key words: leachate, stabilization / solidification, landfill, hydraulic binders.