

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté des sciences exactes
Département de chimie
Laboratoire de Technologie des Matériaux et de Génie des Procédés (LTMGP)

THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT LMD

Domaine : Sciences exactes Filière : Chimie
Spécialité : Chimie appliquée.

Présentée par
CHERIBET DROUCHE Mira

Thème

**CARACTERISATION ET VALORISATION DES BOUES DU
CENTRE D'ENFOUISSEMENT TECHNIQUE DE SIDI-
BOUDREHHEM -BEJAIA PAR LE PROCEDE DE
STABILISATION/SOLIDIFICATION**

Soutenue le : 14/07/2022

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mr. Abdelhamid BOUKERROUI	Professeur	Univ. de Bejaia	Président
Mr. Karim MOUSSACEB	Professeur	Univ. de Bejaia	Rapporteur
Mme. laila AIT BRAHAM	Professeur	Univ. de Bejaia	Examinatrice
Mr. Kamel BOUDEGHDEGH	Professeur	Univ. de Jijel	Examinateur
Mr. Cherif BELEBCHOUCHE	MCA	Univ. de Constantine-1	Examinateur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au Laboratoire de Technologie des Matériaux et de Génie des Procédés (LTMGP) de l'Université Abderrahmane Mira-Bejaia, sous la direction de Monsieur le professeur **Karim MOUSSACEB**.

Je remercie le Bon Dieu pour tout ce qui m'a offert dans cette vie.

Je voudrais remercier particulièrement Mon Professeur et Encadreur Monsieur **Karim MOUSSACEB**, qui par sa collaboration et sa motivation a permis l'existence de ce projet de thèse. Ses compétences ont constitué un atout majeur pour cette étude et je lui sais gré de la confiance et de la liberté d'action qu'il m'a accordé

Je présente ma profonde gratitude à Monsieur le Docteur **Abdelhamid BOUKEROUI** d'avoir bien voulu présider mon jury de thèse.

Je tiens également à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'en faire partie et d'avoir évalué ce travail, messieurs **Kamel BOUDEGHDEGH, Abdelghani MERDAS** et madame **laila AIT BRAHAM** en tant qu'examineurs.

Je remercie également le personnel technique et administratif du laboratoire LTMGP, ainsi un grand merci à monsieur **MAHINDAD Hanafi** qui nous a accueillis avec gentillesse et patience au sein du centre d'enfouissement de SIDI-BOUDRAHEM, ainsi que tout l'ensemble des travailleurs qui nous ont transmis leurs savoir-faire.

Je voudrais enfin remercier mes parents et ma famille qui m'ont soutenu, même dans les moments les plus difficiles et qui m'ont permis d'arriver jusqu'à l'écriture de cette thèse que je leur dédicace.

Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie cette thèse de Doctorat à :

A Ma tendre Mère Razika : Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour toi. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

Au meilleur des pères, Mon très cher Père Ibrahim : Tout l'encre du monde ne pourrait suffire pour exprimer mes sentiments envers un être très cher .Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

A mes chères sœurs, Abir, Souzi : pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères, Adel, Khaled, Issam : pour leur appui et leur encouragement,

A mes chères amies, Hanane, mounia, ilhem, kenza, kahina : En souvenir des moments heureux passés ensemble, avec mes vœux sincères de réussite, bonheur, santé et de prospérité.

CHERIBET DROUICHE Mira

SOMMAIRE

Table des figures	i
Liste des Tableaux.....	ii
Liste des abréviations	iii
Introduction générale	1

CHAPITRE I.

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. GENERALITE SUR LES DECHETS SOLIDES	6
I.1.1. Définition du terme déchet.....	6
I.1.1.1. Approche juridique	7
I.1.1.2. Approche économique	7
I.1.2. Classification des déchets	7
I.1.2.1. Déchets ménagers	8
I.1.2.2. Déchets industriels	8
✓ Déchets industriels spéciaux (DIS)	8
✓ Déchets industriels banals (DIB)	8
✓ Déchets industriels inertes	9
✓ Déchets hospitaliers	9
I.1.2.3. Déchets liés à l’agriculture et aux industries agroalimentaires	9
I.1.3. Gestion des déchets	9
I.1.3.1. Déchets ménagers	9
I.1.3.2. Déchets dans les pays du Nord	9
I.1.3.3. Déchets dans les Pays En Développement (PED)	10
I.1.4. Flux des déchets en Algérie	11
I.1.4.1. Composition des déchets solides en Algérie	12
I.1.4.2. Production des déchets	12
I.1.4.2.1. Déchets solides urbains.....	12
I.1.4.2.2. Déchets industriels spéciaux	13
I.1.4.2.3. Déchets d’activités de soin.....	14
I.1.4.2.4. Déchets inertes	14
I.1.4.3. Elimination des déchets.....	14

I.1.5. Les métaux lourds.....	15
I.1.5.1. Définition	15
I.1.5.2. Métaux lourds dans les ordures ménagères	15
➤ Cuivre	16
➤ Zinc	16
➤ Mercure.....	16
➤ Cadmium	16
➤ Plomb.....	16
➤ Nickel	16
➤ Arsenic.....	17
I.2. CENTRE D'ENFOUISSEMENT TECHNIQUE	17
I.2.1. Définition et classification des Centres d'enfouissement techniques (CET).....	17
I.2.2. Classification des Centres d'enfouissement techniques (CET).....	17
➤ CET de classe 1	17
➤ CET de classe 2	18
➤ CET de classe 3.....	18
I.2.3. Critères de choix des sites d'implantation	18
I.2.3.1. Critères d'exclusion	19
I.2.3.2. Critères de comparaison	20
I.2.4. Potentiel polluant des centres de stockages de déchets	20
I.2.4.1. Lixiviats des décharges	20
I.2.4.1.1. Définition	20
I.2.4.1.2. Composition de lixiviat	21
I.2.4.2. Biogaz de décharges	22
I.2.4.2.1. Composition du biogaz	22
I.2.5. Risques sanitaires et environnementaux	22
I.2.5.1. Pollution par les lixiviats	22
I.2.5.2. Risque liés au biogaz.....	23
I.3. PROCÉDES DE STABILISATION/SOLIDIFICATION (S/S)	24
I.3.1. Définition de la technique de Stabilisation/Solidification	24
I.3.2. Objectifs de la Stabilisation/Solidification	24
I.3.3. Stabilisation/Solidification à base de liants hydrauliques.....	24
I.3.3.1. Liants hydrauliques	25

I.3.3.2. L'hydratation du ciment	26
I.3.4. Type de déchets à stabiliser/solidifier	27
I.3.5. Incorporation de déchets dans les matrices cimentaires	28
I.3.5.1. Cas des chlorures	28
I.3.5.2. Cas des métaux lourds	28
➤ Plomb	28
➤ Zinc	29
➤ Cadmium	29
➤ Nickel	29
I.3.6. Lixiviation des déchets stabilisés	29
I.3.6.1. Test de l'eau des pores (EP)	30
➤ Principe du test	30
I.3.6.2. Test de capacité de neutralisation acide (CNA)	31
➤ Principe du test	31
I.3.6.3. Test de lixiviation sur monolithe (TLM)	31
➤ Principe du test	31
I.4. ETAT DE L'ART SUR LA S/S PAR LIANTS HYDRAULIQUES	31
I.4.1. Stabilisation/Solidification des déchets solides.....	31
I.4.2. Stabilisation/Solidification des déchets liquides	34
I.5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	35

CHAPITRE II.

METHODOLOGIE GENERALE

II.1. METHODES D'ECHANTILLONNAGE AU NIVEAU DU CET.....	43
II.1.1. Prélèvement du lixiviat	45
II.1.2. Prélèvement de boue	45
II.2. FORMULATION ET ELABORATION DES MONOLITHES	45
II.2.1. Différents constituants	45
II.2.2. Mise en œuvre	46
II.3. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX ET TECHNIQUES D'ANALYSES	48
II.3.1. Analyse des échantillons liquides	48
II.3.1.1. pH et conductivité	48
II.3.1.2. Analyse des métaux et cations majeurs (ICP-MS)	48

II.3.1.3. Analyse des anions	49
➤ Dosage des sulfates.....	49
➤ Dosage des phosphates.....	49
II.3.1.4. Dosage des chlorures : Méthode de Mohr	50
II.3.2. Analyse des échantillons Solides	50
II.3.2.1. Matière sèche	50
II.3.2.2. Teneur en matière organique	51
➤ Principe	51
➤ Mode opératoire	51
➤ Expression des résultats	51
II.3.2.3. Mise en solution par TCLP test (Procédure de lixiviation des caractéristiques de toxicité)	51
II.3.2.4. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)	52
II.3.2.5. Analyse par Infra-Rouge à Transformateur de Fourier (IRTF)	53
II.3.2.6. Microanalyse X couplée au microscope électronique à balayage (MEB- EDX)	54
II.3.2.7. Analyse élémentaire par Fluorescence X (FX).....	56
II.3.3. Analyse des matériaux stabilisés/solidifiés)	57
II.3.3.1. Résistances mécaniques.....	58
II.3.3.2. Analyse Thermogravimétrique et Analyse thermique différentielle (ATG/ATD)	58
II.3.3.3. Comportement à la lixiviation	59
II.3.3.3.1. Essai d'influence du pH (IpH).....	60
II.3.3.3.2. Essais de l'eau de pore (EP) et la fraction maximale mobilisable	60
II.3.3.3.3. Essai de lixiviation sur monolithe (TLM)	60
II.4. CONCLUSION	62
II.5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	64

CHAPITRE III.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. CARACTERISATION DES DECHETS DU CET	67
III.1. 1. Composition chimique élémentaire des échantillons	67
III.1.2. Analyse par Fluorescence X (FX) des boues du CET.....	68

III.1.3. Composition minéralogique de la boue – par le Diffractomètre aux Rayons X (DRX)	69
III.1.4. Analyse par Infra-Rouge (IR) de la boue	70
III.1.5. Microstructure et composition élémentaire (MEB-EDX) de la boue	72
III.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX STABILISES/SOLIDIFIES.....	74
III.2.1. Résistance mécanique	74
III.2.2. Composition minéralogique des matériaux	77
III.2.3. Analyse des matériaux par Infra-Rouge (IRTF)	79
III.2.4. Analyse Thermogravimétrique (ATG) et (ATD)	83
III.2.5. Analyse par microscope électronique à balayage (MEB-EDX)	87
III.2.6. Comportement à la lixiviation des matériaux solidifiés/stabilisés	89
III.2.6.1. Test de l'influence du pH (IpH)	89
▪ Sulfates	89
▪ Potassium	90
▪ Chlorure	90
▪ Zinc	90
▪ Plomb	90
▪ Fer	91
▪ Cadmium	91
▪ Nickel	91
III.2.6.2. Tests de l'eau de pores (EP) et de la fraction maximale mobilisable (FMM)	93
▪ Potassium et chlorure	93
▪ Sulfates.....	93
▪ Plomb, zinc, fer, nickel et cadmium.....	94
III.2.6.3. Test de lixiviation sur monolithe (TLM).....	96
III.3. SYNTHESE DES RESULTATS.....	99
III.4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	101
CONCLUSION GENERALE	107
PERSPECTIVES	109
Annexes	110
Travaux de recherche de la thèse	A
Abstract	
Résumé - ملخص	

Liste des figures

Figure I.1. Schéma type de la gestion des déchets dans les pays du Nord	10
Figure I.2. Schéma de gestion des déchets commun aux PED	11
Figure I.3. Modes d'élimination des déchets en Algérie	15
Figure II.1. Vue satellitaire par Google Maps de la zone d'étude	44
Figure II.2. Schéma de montage d'un diffractomètre à rayons X pour une géométrie θ - 2θ ...	52
Figure II.3. Appareillage d'un spectromètre Infrarouge de Fourier	53
Figure II.4. Interferogramme a la sortie du détecteur	54
Figure II.5. Schéma d'un MEB équipé d'un détecteur EDS	56
Figure II.6. Schéma de principe d'un appareil de fluorescence X dispersif en longueurs d'onde	57
Figure II.7. Presse hydraulique de type Control	58
Figure II.8. Schéma de base d'un appareil d'ATG	59
Figure II.9. Dispositif du test de lixiviation sur bloc monolithique	61
Figure III.1. Spectre DRX de l'échantillon 1	70
Figure III.2. Spectre DRX de l'échantillon 2	70
Figure III.3. Spectres FT-IR de la boue (Echantillon 1)	71
Figure III.4. Spectres FT-IR de la boue (Echantillon 2)	71
Figure III.5. Morphologie et spectres EDX des échantillons de boue, (a)Echantillon 1, (b) Echantillon 2	73
Figure III.6. Evolution des résistances mécaniques des matériaux stabilisés/solidifiés des lixiviats.	76
Figure III.7. Evolution des résistances mécaniques des matériaux stabilisés/solidifiés des boues	76
Figure III.8. Diffractogramme DRX du matériau F0M à 28 jours	77
Figure III.9. Diffractogramme DRX du matériau F0P à 28 jours.....	77
Figure III.10. Diffractogramme DRX du matériau F1P à 28 jours.....	78
Figure III.11. Diffractogramme DRX du matériau F5P à 28 jours	78
Figure III.12. Diffractogramme DRX du matériau F6P à 28 jours.....	78
Figure III.13. Diffractogramme DRX du matériau F2M à 28 jours.....	78
Figure III.14. Spectres IR des matériaux témoins F0P et F0M	79
Figure III.15. Spectres IR des matériaux F1P et F5P	81

Figure III.16. Spectres IR des matériaux F6P et F2M	82
Figure III.17. Thermogrammes ATG/ATD des matériaux F0M et F0P	84
Figure III.18. Thermogrammes ATG/ATD des matériaux F1P et F5P obtenues par analyse thermogravimétrique à l'âge de 28 jours	85
Figure III.19. Thermogrammes ATG/ATD des matériaux F6P et F2M obtenues par analyse thermogravimétrique à l'âge de 28 jours	86
Figure III.20. Micrographies et spectres EDX des matériaux témoins F0P et F0M	87
Figure III.21. Morphologie et spectres EDX des matériaux F1P et F5P	88
Figure III.22. Morphologie et spectres EDX des matériaux F6P et F2M	89
Figure III.23. Solubilité des espèces chimiques en fonction du pH	93
Figure III.24. L'évolution du pH en fonction du rapport L/S	94
Figure III.25. Concentration en mg/L des éléments suivis du test EP et FMM	95
Figure III.26. Flux de relargage des éléments suivis (Pb^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} et Cd^{2+}) en fonction du temps moyen T_i pour les matériaux F1P et F5P.....	98
Figure III.27. Evolution des flux relargués de plomb (Pb^{2+}) en fonction du temps moyen T_i pour les matériaux F6P et F2M	99

Liste des tableaux

Tableau I.1. Production des déchets par habitants dans plusieurs villes.....	11
Tableau I.2. Évolution de la production des DMA en Algérie	12
Tableau I.3. Composition des déchets urbains de trois sites (nord, semi-aride et aride) en 2014	12
Tableau I.4. Répartition des déchets spéciaux par région	13
Tableau I.5. Teneur moyenne des déchets en métaux lourds	16
Tableau I.6. Composition des lixiviats de décharge	21
Tableau I.7. Notations cimentières des différentes phases et principaux produits d'hydratation de ciment	27
Tableau I.8. Liste des déchets industriels spéciaux ultimes à stabiliser/solidifier	28
Tableau II.1. Caractéristiques chimiques du ciment portland CEM I, CKD et MK	46
Tableau II.2. Données de granulométrie du sable normalisé	46
Tableau II.3. Constituants des Formulations des lixiviats traités (Echantillons 1 et 2).....	47
Tableau II.4. Constituants des Formulations des boues traitées (Echantillons 1 et 2).....	48
Tableau II.5. Conditions opératoires du test de lixiviation sur monolithe (TLM)	61
Tableau III.1. Caractéristiques physico-chimiques des lixiviats du CET	68
Tableau III.2. Caractéristiques physico-chimiques des boues du CET	68
Tableau III.3. Composition chimique des échantillons selon l'analyse par FX.....	69
Tableau III.4. Identification des bandes apparues sur les spectres infrarouges des matériaux stabilisés/solidifiés	80
Tableau III.5. Flux totaux de rétention des espèces chimiques pour les formulations F1P, F5P, F6P et F2M pendant 64 jours de lixiviation	97

Liste des abréviations

AFNOR : Association Française de Normalisation.

ATG : Analyse Thermo-Gravimétrique.

CET : Centre d'Enfouissement Technique.

CEM I: Ciment Portland

CPA : Ciments Portland Artificiels

CKD : Poussière du Four a Ciment.

DIB : Déchets Industriels Banals.

DIS : Déchets Industriels Spéciaux.

DRX : Diffraction des rayons X.

E/C : Rapport Eau/Ciment

E/S : Rapport Eau/Solide

EP : Eau des pores.

FX : Fluorescence X.

IpH : Influence du pH.

IR-TF : Spectrophotométrie Infra-rouge a Transformé de Fourier.

MEB-EDX : Microanalyse X couplée au Microscope Electronique à Balayage.

MK : Métakaolin.

NS : Sulfates de sodium

S/S: Stabilisation/Solidification.

TCLP: Toxicity characteristic for Leaching Procedure.

TLM : Test de Lixiviation sur Monolithe.

ONG : Organisation Non Gouvernementale.

MATE : Ministère de l'aménagement du territoire et de l'Environnement.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La production des déchets ne cesse d'augmenter en quantité et en qualité engendrant ainsi d'énormes risques sur la santé humaine et la qualité des milieux naturels. La gestion des déchets solides générés est devenue une question de plus en plus préoccupante dans le monde que les populations urbaines continuent d'augmenter et les habitudes de consommation changent.

La gestion des déchets dans les pays en voie de développement (PED), rencontre de très nombreuses difficultés et des anomalies, tant du point de vue technique, économique, que méthodologique et organisationnel. Donc les problèmes causés par l'augmentation de taux de pollution sont plus grave dans ces pays où les possibilités de traitements sont très faibles et du fait du retard enregistré dans la prise en charge de cette problématique et par conséquent, un service de collecte n'est pas développé ce qui conduit à un volume important de déchets n'est pas collecté de façon rationnelle [1]. L'élaboration des centres d'enfouissement technique reste l'une des solutions pour effectuer le traitement et la valorisation des déchets, ces derniers sont équipés par des installations qui répondent à l'objectif de minimiser l'impact environnemental et social de cette infrastructure de service public.

L'augmentation de la production de déchets et leur prolifération dans l'espace urbain, les émissions de gaz nocifs, la production de déchets dangereux et les eaux non traitées engendrées par l'activité industrielle posent de sérieux problèmes de pollution en Algérie. L'Algérie est confrontée à des problèmes de planification, de gestion et de financement. Le gouvernement Algérien a décidé en 2001 d'allouer une enveloppe financière pour faire face à cette situation et pour atteindre les objectifs du Plan National d'actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD) [2].

Dans le cadre d'améliorer la gouvernance environnementale, plusieurs projets ont été lancés tel que le programme de Gestion Intégrée des déchets Ménagers (PROGDEM) élaboré par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement en 2001, le PROGDEM a permis la construction de 80 Centre d'enfouissement Technique (CET) [3]. La wilaya de Bejaia a bénéficié du CET de SIDI-BOUDRAHEM, ce dernier est de classe II, il reçoit les déchets ménagers et assimilés de la commune de Bejaia, mais malheureusement, l'élimination des déchets dans ce CET se limite à un simple emplacement mal géré ce qui présente des risques de contamination des eaux souterraines et de surface et de pollution de l'air. Dans ce cas, la phase aqueuse constitue le principal vecteur de mobilisation et de transport des polluants vers la chaîne trophique engendrant in fine des risques sanitaires.

Au cours de ces dernières années, différentes méthodes et techniques de traitement des déchets solides ont été développées afin de réduire les volumes de résidus à stocker et de prévenir tout risque de dispersion des polluants. Parmi ces techniques les plus utilisées actuellement on cite essentiellement le procédé de stabilisation / solidification à base de liants hydrauliques qui offre de multiples avantages [4], tels que sa facilité de mise en œuvre, son faible coût et sa résistance mécanique relativement élevée du matériau conçu.

Le procédé S / S permet de transformer un matériau en un monolithe solide ayant une bonne intégrité physique ce qui permet de réduire le potentiel dangereux et la lixivibilité de ce matériau, cette technique stabilise les métaux lourds par sorption, incorporation dans les hydrates de ciment, et précipitation pendant l'hydratation du ciment [5-7].

Plusieurs études ont été menées par différents chercheurs sur les matériaux S / S [8-12], ces matériaux peuvent représenter une source de pollution dans le milieu de stockage. La pollution résulte de l'exposition des polluants contenus dans les déchets S/S à l'eau ou aux milieux chimiquement agressifs, la dispersion des polluants dans l'environnement dépendra de la solubilité des espèces polluantes et des qualités intrinsèques du matériau stabilisé/solidifié [13].

La maîtrise des mécanismes de lixiviation est très importante afin de prédire le comportement à long terme des matériaux s/s. Actuellement, les tests utilisés pour la détermination des propriétés intrinsèques de ces matériaux sont : Test de l'eau de pore (EP), test de dépendance au pH (IpH), et test de lixiviation monolithique (TLM) pour suivre le relargage à long terme d'espèces chimiques polluantes [14-15].

Dans cette optique, il est proposé dans le cadre de cette thèse de trouver une voie de traitement pour les boues résiduaires et surtout les lixiviats issus du centre d'enfouissement technique de SIDI-BOUDRAHEM – Bejaia. En effet, ces déchets peuvent entraîner de gros problèmes environnementaux du fait de leur forme liquide. Pour cela, ces déchets seront caractérisés chimiquement, minéralogiquement et physico chimiquement. En fonction des résultats obtenus sur les déchets brutes, une voie de traitement sera investiguée essentiellement par la stabilisation /solidification à l'aide de liants hydrauliques (ciment Portland). En fin, les objectifs visés sont : (i) caractérisation fine des déchets, (ii) développement de formulation de liants hydrauliques à base de déchets, (iii) caractérisation et détermination des propriétés d'usages en usage courant ou en milieux agressifs, et (iv) détermination des impacts environnementaux et sanitaires des matériaux avant et après stabilisation.

Ces travaux de thèse sont effectués au Laboratoire de Technologie des Matériaux et de Génie des Procédés (LTMGP) à l'université de Bejaia –Algérie, en collaboration avec

laboratoire du Groupement de Recherche Eau, Sol, Environnement (GRESE) à Université de Limoges –France.

Ce mémoire est composé de trois chapitres structurés comme suit :

Le premier chapitre porte un regard bibliographique sur le sujet. Cette étude bibliographique portant sur la définition et la classification des déchets, un rappel sur les centres d'enfouissement techniques (CET), ainsi que la description du procédé de Stabilisation/Solidification et les tests de lixiviation utilisés pour l'évaluation environnementale du comportement de matrices cimentaires, puis les travaux de recherches consacrés à l'immobilisation des polluants inorganiques par le procédé de Stabilisation/Solidification à base de liants hydrauliques.

Le deuxième chapitre, « **Méthodologie générale** », sera consacré à la partie expérimentale. En premier lieu, nous présentons les matériaux d'études et les formulations des déchets stabilisés /solidifiés confectionnés, ensuite, nous présenterons les méthodes et les techniques de caractérisation expérimentales utilisées dans le cadre de ce travail de thèse pour la caractérisation des échantillons avant et après modification.

Le troisième chapitre, « **Résultats et discussions** », ce chapitre regroupe les résultats des différents essais de caractérisation menée sur le déchet du CET ainsi que les résultats issus des différentes caractérisations mécaniques et physico-chimiques appliquées sur les matériaux s/s.

Enfin, Une conclusion générale qui confronte l'ensemble des résultats obtenus et une présentation de diverses perspectives concluront ce travail.

Références bibliographiques

- [1] BOTTA H, BERDIER C, DELEUIL JM. Enjeux de la propreté urbaine. Press. Polytech. Univ. Romandes. Lausanne 11-16p, 2002.
- [2] MATE (2002) : « Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD) », janvier 2002.
- [3] DJEMACI B. La gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse prospective et éléments d'efficacité. Thèse de doctorat. Rouen, 2012.
- [4] BOUTOUIL M, LEVACHER D. Traitement et valorisation des vases de dragages par solidification/stabilisation Vème Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier. Caen. France, 2002.
- [5] CHENG KY, BISHOP PL. Sorption, important in stabilised/solidified waste forms. Hazardous Waste and Hazardous Materials 9:289–296, 1992.
- [6] GLASSER FP. Fundamental aspects of cement solidification and stabilisation. Journal of Hazardous Materials 52: 151-170, 1997.
- [7] CONNER JR, HOEFFNER SL. The history of stabilization/solidification technology. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 28:325-396, 1998.
- [8] BARNA R, SANCHEZ F, MOSZKOWICZ P, MÉHU J. Leaching behavior of pollutants in stabilized/solidified wastes. J. Hazard. Mater 52: 287-310, 1997.
- [9] BELEBCHOUCHE C, MOUSSACEB K, TAHAKOURT A, AÏT-MOKHTAR A. Parameters controlling the release of hazardous waste (Ni^{2+} , Pb^{2+} and Cr^{3+}) solidified/stabilized by cement-CEM I. Materials and Structures 48: 2323–2338, 2014.
- [10] HALIM CE, AMAL R, BEYDOUN D, SCOTT JA, LOW G. Evaluating the applicability of a modified toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) for the classification of cementitious wastes containing lead and cadmium. Journal of Hazardous Materials 103: 125–140, 2003.
- [11] MOUSSACEB K, AÏT-MOKHTAR A, MERABET D. Influence of leaching conditions on the release kinetics of lead, chromium and nickel from solidified/stabilized cementitious materials. Environmental Technology 33: 2681-2690, 2012.

[12] MIJNO V, CATALAN LJJ, MARTIN F, BOLLINGER JC. Compositional changes in cement-stabilized waste during leach tests—comparison of SEM/EDX data with predictions from geochemical speciation modelling. *Journal of Colloid and Interface Science* 280 : 465–477, 2004.

[13] CATHERINE FM. Etude de matériaux à base de liant hydraulique contenant des polluants organiques modèles : propriétés structurales et de transfert, thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Lyon, 2003.

[14] TIRUTA-BARNA L, IMYIM A, BARNA R. Long-term prediction of the leaching behavior of pollutants from solidified wastes. *Advances in Environmental Research* 8: 697–711, 2004.

[15] TIRUTA-BARNA L, RETHY Z, BARNA R. Release dynamic process identification for a cement based material in various leaching conditions. Part II. Modelling the release dynamics for different leaching conditions, *J. Environ. Manage* 74: 127–139, 2005.

CHAPITRE I.
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I.

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Plusieurs logiques interviennent autour du terme déchets, entité complexe de par la variété de ses caractéristiques, de ses sources de production, des environnements avec lesquels ils interagissent et des contextes économiques, juridiques et technologiques. Elles interviennent également sur les modes de gestion et de traitement qui sont très divers. Ce chapitre a pour objectif de cerner l'état de l'art concernant le procédé de traitement des déchets par Stabilisation/Solidification à l'aide de liants hydrauliques.

Nous présenterons d'abord des généralités autour de la notion de déchets afin de cibler différentes approches et définitions, notamment juridiques et économique. Puis nous aborderons les différentes classifications des déchets ainsi que les modèles d'organisation de la gestion de ces derniers qui ont sensiblement varié selon les approches considérées. Dans les parties suivantes, nous présenterons quelques généralités et caractéristiques des centres d'enfouissement technique tout en évoquant leurs intérêts en termes de protection de l'environnement et de la santé humaine. Nous nous intéresserons aussi au traitement de déchets par le procédé de Stabilisation/solidification à l'aide de ciment portland. Enfin, Nous effectuons un état de l'art concernant la stabilisation/solidification des déchets par liants hydrauliques, nous présenterons les résultats des travaux antérieurs réalisés sur les déchets solides et liquides. Ces études nous permettent de mieux interpréter les résultats expérimentaux de notre étude.

I.1. GENERALITE SUR LES DECHETS SOLIDES

I.1.1. Définition du terme déchet

Du point de vue étymologique, remontant au XIII^e siècle, le terme « déchet » provient, d'une part, de « dechiet », un dérivé du verbe déchoir et, d'autre part, du mot « dechié » qui correspond à ce qui tombe d'une matière qu'on travaille. De la sorte, sur un plan étymologique, le terme renvoie tant à un objet ayant perdu de sa valeur qu'à un sous-produit issu d'un processus de production. Dans la langue anglaise, le terme « waste » provient du mot latin « vastus ». Dérivés des verbes « fallen » et « vallen », les termes allemands « Abfaall » et néerlandais « afval » évoquent aussi la chute d'une matière [1].

Selon le journal officiel de la république Algérienne N°77 paru le 15 décembre 2001, dans son article 3, un déchet par définition est tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien

meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer[2].

Au sens de la loi en France, 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 est 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 [3].

I.1.1.1. Approche juridique

On distingue une conception subjective et une conception objective de la définition juridique du déchet. Selon la conception subjective, un bien devient un déchet lorsque son propriétaire a la volonté de s'en débarrasser. Il demeure lui appartenir tant qu'il n'a pas quitté la propriété de cette personne ou l'espace qu'elle loue. Ce bien devient une propriété de la municipalité lorsqu'il est déposé sur la voie publique ou dans une poubelle, car par cet acte son propriétaire peut avoir clairement signifié sa volonté d'en abandonner tout droit de propriété. Selon la conception objective, un déchet est un bien dont la gestion doit être contrôlée au profit de la protection de la santé publique et de l'environnement, indépendamment de la volonté du propriétaire et de la valeur économique du bien : les biens recyclables qui sont des matières premières secondaires entrent dans cette définition objective. Ainsi, le détenteur d'un bien est soumis à la réglementation et il ne peut se décharger de ses responsabilités envers la gestion de ce déchet sous prétexte de sa valeur économique [4].

I.1.1.2. Approche économique

Sur le plan économique, un déchet est une matière ou un objet dont la valeur économique est nulle ou négative pour son détenteur à un moment et dans un lieu donné. Cette définition exclut une bonne part des déchets recyclables, qui possèdent une valeur économique, même faible. Certaines entreprises peuvent ainsi être tentées de faire passer certains déchets pour des sous-produits pour les soustraire à la loi [5].

I.1.2. Classification des déchets

Les déchets solides peuvent être classés en plusieurs catégories selon les objectifs et selon l'intérêt des informations qui peuvent en être tirées. Leur classification est très importante car elle permet de déterminer le type de gestion et de traitement adéquat pour chaque type de déchet.

L'appellation générique de déchet recouvre trois principales catégories :

- Les déchets ménagers qui comprennent notamment les ordures ménagères (OM) ;
- Les déchets industriels qui se décomposent en déchets dangereux ou toxiques, déchets industriels banals (DIB), déchets inertes et déchets hospitaliers ;
- Les déchets liés à l'agriculture et aux industries agroalimentaires ;

Reste deux catégories qui font l'objet d'une approche particulière : les déchets d'origine médicale et les déchets nucléaires [6].

I.1.2.1. Déchets ménagers [7]

Les déchets ménagers(ou des ménages) : ce sont comme leur nom l'indique, les déchets engendrés par les ménages, les familles et qui sont liés à la vie quotidienne des citoyens. Ces déchets comprennent :

- Les ordures ménagères : il s'agit de tout ce que nous jetons chaque jour à la poubelle (reste de nourriture, verre, papier, carton, plastique,...etc),
- Les déchets encombrants : ce sont les déchets produits par les ménages, mais qui ne trouvent pas de place dans les poubelles ménagères en raison de leur taille (frigos, cuisinières, matelas, téléviseurs, radios, photocopieuses, ordinateurs,...etc).

I.1.2. 2. Déchets industriels

Dans l'industrie, on trouve des déchets de différentes sortes, qui ne peuvent pas être traités comme les déchets ménagers. Certains de ces déchets ne posent pas de problèmes particuliers, mais d'autres sont des déchets à risques, à contrôler [8].

✓ Déchets industriels spéciaux (DIS)

Les déchets industriels spéciaux ou dénommés plus communément maintenant « déchets dangereux » regroupent les déchets qui nécessitent un traitement particulier en raison de leurs caractères nocifs et dangereux pour l'homme et son environnement, ceci pour différentes raisons à savoir : toxicité due à la présence de substances chimiques ou biologiques, risque d'incendie et d'explosion par exemple [9].

✓ Déchets industriels banals (DIB)

Les déchets industriels banals sont issus des industries, des commerces qui ont les mêmes caractéristiques que les ordures ménagères. Ils regroupent principalement les plastiques, les papiers-cartons, les textiles, le bois non traité, les métaux et les verres et matières organiques. Ils sont souvent produits en mélange. Ils peuvent être éliminés avec les ordures ménagères ou

dans des installations spécifiques, car les communes n'ont pas d'obligations de traiter les DIB [9].

✓ **Déchets industriels inertes**

Les déchets industriels inertes sont les résidus des activités extractives, des déblais et produits de démolition (terre, gravats, sables...). En général, ils sont constitués d'éléments minéraux stables ou inertes au sens de leur « éco-compatibilité » avec l'environnement. Cela signifie qu'en cas de stockage ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Ils ne présentent donc pas de risque de pollution de l'eau et des sols. Ils peuvent être utilisés pour le remblaiement et les travaux routiers [9].

✓ **Déchets hospitaliers**

La notion de déchet hospitalier recouvre plusieurs types de déchets : ceux produits dans les hôpitaux, cliniques, laboratoires d'analyse, ainsi que ceux produits par les médecins et infirmières dans leur cabinet ou chez leurs patients [10].

I.1.2.3. Déchets liés à l'agriculture et aux industries agroalimentaires

Ce sont les déchets qui proviennent de l'élevage ou de l'abattage des animaux et de la récolte des vergers et des champs. En fait, ce sont des déchets industriels, mais ils diffèrent suffisamment des autres déchets industriels pour constituer une catégorie séparée [7].

I.1.3. Gestion des déchets

I.1.3.1. Déchets ménagers

La nécessité de gestion des déchets est dictée par les impératifs sanitaires et environnementaux. Ceci est d'autant plus important que la quantité des déchets générés ne cesse d'augmenter et de se diversifier. Ce caractère d'hétérogénéité des déchets représente le principal obstacle pour une généralisation d'une filière de gestion et de traitement de ces refus.

I.1.3.2. Déchets dans les pays du Nord

La mise en place d'outils réglementaires et juridiques dans certains pays, et particulièrement dans les pays du Nord, a joué un rôle essentiel dans la gestion rationnelle des déchets. Ainsi, un arsenal de textes régulant la gestion des déchets a vu le jour depuis les années 1990 dans l'UE, en France en s'appuyant respectivement sur les directives européenne et la législation française et notamment les lois françaises [11,13]. En général, la gestion des déchets dans ces pays est du ressort des collectivités locales [14].

En France, comme le prévoit la loi, les communes doivent organiser l'élimination des déchets municipaux [15]. Dans plusieurs pays l'intervention d'entreprises privées agréées par

les services publics s'est avérée d'une utilité capitale dans la gestion de certaines composantes des déchets.

Selon l'ADEME, aujourd'hui presque toute la population bénéficie d'un service de collecte des OM (poubelles traditionnelles, sacs ou bacs roulants). Une grande partie de la population participe à la collecte sélective multi-matériaux. Les fractions de déchets concernées par cette collecte sont les emballages en papier- carton, verre, plastiques, métaux en plus des journaux et des revues. Ces déchets collectés sélectivement sont acheminés vers les installations industrielles spécialisées ou centres de tri. Les différents matériaux y sont séparés et amenés à un niveau de qualité compatible avec les activités de recyclage. Les centres de tri peuvent générer des déchets. Les refus ne pouvant être valorisés sont envoyés pour le traitement ou le stockage (Figure I.1).

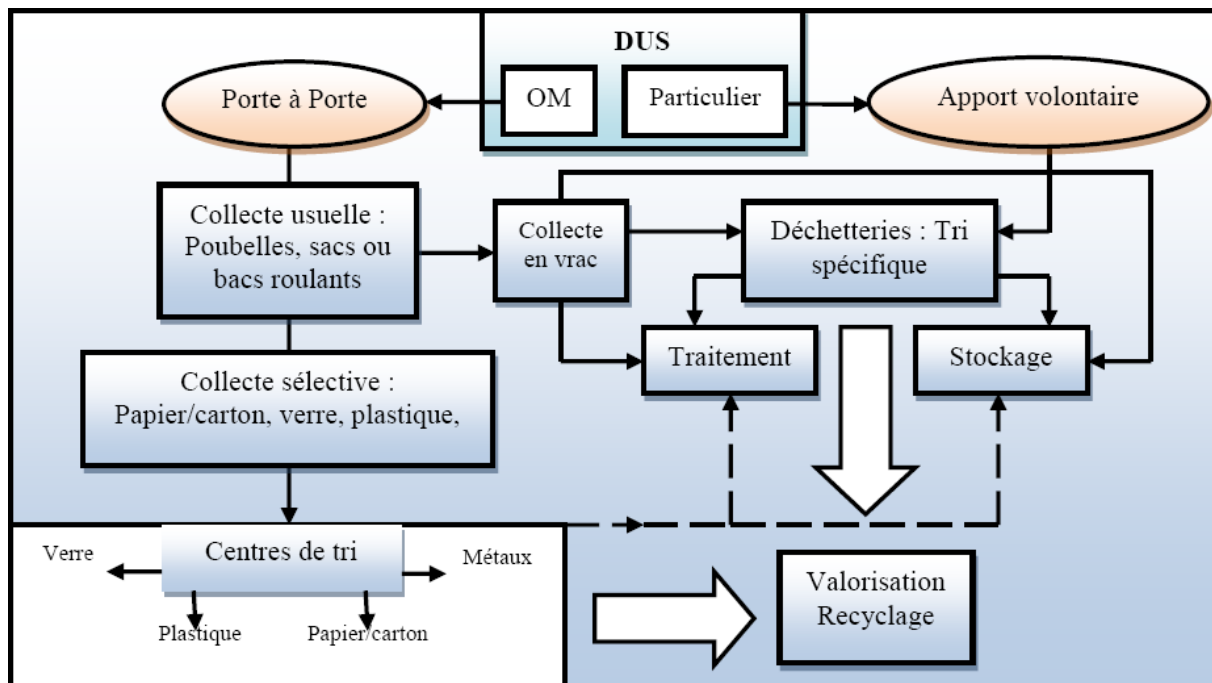


Figure I.1. Schéma type de gestion des déchets dans les pays du Nord [4].

Les déchetteries sont des espaces aménagés, gardiennés et clôturés. Elles sont destinées à recevoir les déchets encombrants des particuliers (commerçants, artisans et autres) ou tout autre déchet par apport volontaire. Les déchets apportés doivent être répartis dans des conteneurs spécifiques en vue de la gestion (valorisation), du traitement ou du stockage éventuellement des matériaux qui les composent [14].

I.1.3.3. Déchets dans les PED

Dans les PED, l'élimination des déchets se limite souvent à la collecte primaire assurée par des associations, des ONG ou des PME (Figure I.2). La collecte secondaire, souvent sous la responsabilité des services techniques des communes, est mal assurée par manque de

matériels. Le site de regroupement à la périphérie de quartiers est alors l'exutoire final qui, compte tenu de l'extension de la ville, se retrouve au milieu de nouvelles zones d'habitation.

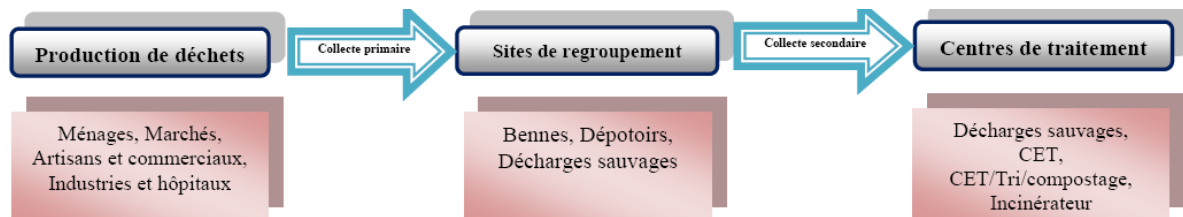


Figure I.2. Schéma de gestion des déchets commun aux PED [16].

Certaines capitales d'Afrique de l'Ouest ont malgré tout pu bénéficier de l'aide internationale pour installer des centres de traitement final des déchets combinant tri, compostage de la fraction fermentescible et enfouissement technique [14].

I.1.4. Flux des déchets en Algérie

Le développement urbain rapide dans les pays en développement est devenu parmi les sérieux défis environnementaux dans la mesure où il est synonyme de production accrue de déchet urbain. En effet, la production des déchets est inhérente aux activités humaines, qu'elles soient domestiques, agricoles, industrielles ou commerciales. Mais, en Afrique, comme partout ailleurs, ce n'est qu'avec le fait urbain qu'elle devient véritablement une problématique publique [17].

La quantification des déchets solides est essentielle pour une planification du système de gestion et par conséquent des centres de stockages de déchets, maillon ultime de toute filière de traitement. A noter que le ratio de production par habitant est variable suivant les pays et les villes [18]. Le tableau I.1 présente la production des déchets dans différentes villes.

Tableau I.1. Production des déchets par habitants dans plusieurs villes [19].

Villes	Pays (PED)	Production de déchets (Kg/hab./j)
Alger	Algérie	0.75-1
Ouagadougou	Burkina Faso	0.62
Uberlândia	Brésil	0.51
Yaoundé	Cameroun	0.85
Hong-Kong	Chine	0.7
(Moyenne nationale)	Inde	0.41
Kuala Lumpur	Malaisie	1.7
Grand Casablanca	Maroc	0.89

I.1.4.1. Composition des déchets solides en Algérie

Principalement les déchets sont produits par les ménages, les industries, et les hôpitaux. Le développement de l'industrie alimentaire et de l'emballage a modifié sensiblement la composition des déchets ménagers ainsi que les habitudes de consommation en Algérie [19].

La matière organique enregistre, depuis 1980, une baisse substantielle au profit d'autres produits d'emballages comme les papiers et cartons, les plastiques et l'apparition de textiles sanitaires, (Tableau I.2 et I.3).

Tableau I.2. Évolution de la production des DMA en Algérie [20].

Les chiffres sont en pourcentage (%)	1983	2000	2007	2010
Matière organique	80.00	74.00	68.00	62.12
Papiers	7.45	7.00	8.50	9.39
plastique	3.10	3.00	11.00	12.00
Métaux	4.90	2.00	5.50	1.63
Verre	0.60	1.00	2.00	1.36
Inertes et autres	3.95	13.00	5.00	12.62

Tableau I.3. Composition des déchets urbains de trois sites (nord, semi-aride et aride) en 2014 [20].

Les chiffres sont en pourcentage (%)	Zone nord Boumerdès	Zone semi-aride Bordj Bou Arreridj	Zone aride Biskra	Composition moyenne annuelle
Putrescibles	55.01	56.50	51.70	54.40
Papiers-cartons	10.65	8.88	9.72	9.75
Textiles	11.76	12.83	13.26	12.62
Plastique	16.51	15.57	18.56	16.88
CNC	1.67	1.11	1.74	1.51
Verres	0.86	1.49	1.13	1.16
Métaux	2.52	3.01	3.01	2.84
INC	0.75	0.41	0.41	0.52
Déchets spéciaux	0.41	0.18	0.30	0.29

I.1.4.2. Production des déchets

I.1.4.2.1. Déchets solides urbains

La génération des déchets solides urbains est déjà évaluée à environ 8.5 millions de tonnes par an, soit 23 288 tonnes par jour en 2005[21], et cette production connaît une progression sensible. Selon le Ministère de l'Aménagement du territoire de l'Environnement (MATE), le seuil des 12 millions de tonnes de déchets solides urbains est certainement franchi en 2010.

Il est à souligner que les villes du littoral algérien, plus dense en population génèrent des quantités de déchets nettement supérieures à celles des Hauts Plateaux et du Grand Sud.

Quant à la capitale, elle a produit plus de 0.87 million de tonnes en 2008 [21]. Une dizaine de villes émettent entre 200 et 300 000 tonnes de déchets solides municipaux (DSM) par an : c'est le cas notamment des principales villes comme Oran à l'Ouest, Constantine à l'Est et Tizi Ouzou au Centre. Une vingtaine de villes moyennes produisent entre 100 et 190 000 tonnes par an [21]. Enfin, quelques villes produisent des quantités de DSM inférieures à 50 000 tonnes par an ; celles-ci sont généralement concentrées dans le Grand Sud (Sahara) et sont caractérisées par de faibles densités de population.

I.1.4.2.2. Déchets industriels spéciaux

En 2002, selon le cadastre national des déchets spéciaux, la production de déchets industriels spéciaux est de 325 000 t/an, et la quantité en stock est de 2 008 500 tonnes. Les 12 plus grands générateurs de déchets se trouvent dans les régions Centre, Est et Ouest. Ils produisent près de 87% de déchets au niveau national soit 282 800 tonnes par an, et près de 95% en stock soit 1 905 200 tonnes [22]. Le tableau I.4 montre la répartition des déchets spéciaux sur les différentes régions.

Tableau I.4. Répartition des déchets spéciaux par région [22].

Région	Production t\an	%	Stock tonnes	%
Est	145000	45	1100800	54
Ouest	98550	30	521800	26.8
Centre	77007	23.6	378000	18,8
Sud- Est, Sud-Ouest	4500	1.4	-	0.4

Afin de faire face aux risques liés aux déchets spéciaux, l'Algérie a adopté toute une série de mesures. Une réglementation dans le domaine de la gestion écologique des déchets spéciaux, basée sur la prévention, l'organisation des différents modes de collecte et de traitement. Une nomenclature qui a comme objectif de classer les déchets selon des critères et qui permet à l'administration, aux entreprises et aux clients de doter d'une terminologie commune de référence et de responsabilité. La déclaration des déchets spéciaux dangereux par les détenteurs et les générateurs est désormais obligatoire afin d'assurer une traçabilité des produits. Un programme national de la gestion des déchets spéciaux PNAGDES a été mis en place par le MATE pour assurer un suivi des flux et de maîtriser les coûts de gestion [21].

I.1.4.2.3. Déchets d'activités de soin

En 2002, le cadastre des déchets de soins a recensé plus de 40190 tonnes de déchets hospitaliers qui se répartissent sur les différentes régions, 43% dans la région sanitaire du Centre, 29% dans la région sanitaire Est, 22% dans la région sanitaire Ouest, 4% dans la région sanitaire Sud-est, et 2% dans la région sanitaire Sud- Ouest [23].

En outre, sur 236 incinérateurs existant au niveau des établissements hospitaliers sur le territoire national, 64 incinérateurs ne fonctionnent pas. Une taxe incitative au déstockage des déchets issus des activités de soins a été mise en place, elle est d'un montant de 24 000 DA/tonne de déchet stocké. Une étude nationale sur la gestion et l'élimination des déchets d'activités de soins à risque infectieux (DASRI) a été lancée sur 48 wilayas d'Algérie avec un budget de 35 Md de centimes. Quelques expériences ont été menées par des entreprises algériennes pour éliminer les déchets hospitaliers. Une enquête réalisée par le service de l'hôpital Mustapha à Alger en 2003 indique que le poids des DAS rejetés est évalué à 1763 kg/jour par chaque service [21].

I.1.4.2.4. Déchets inertes

Les principales sources de ces déchets sont notamment les chantiers de bâtiment, de travaux publics et de particuliers qui réhabilitent leurs maisons. Ils sont composés essentiellement de gravats, décombres, déblais et autres rebuts de démolition et de chantiers (bois, acier, plâtres...). Face à cette situation des dépotoirs sauvages sont apparus dans tous les communes et parfois même au sein des quartiers et des villages. Une estimation a été effectuée par le Centre National d'Étude et de Recherche Intégrée en Bâtiment (CNERIB) sur les déchets inertes de quatre wilayas de la région de centre (Alger, Blida, Boumerdès et Tipaza.) il l'estime entre 300 mille à 500 mille t/an dont 12% d'acier et 40% de béton. En 2003, suite au séisme qui a touché la wilaya de Boumerdès plus de 2,5 M de tonnes de déchets inertes ont été enregistrées. À l'image des autres villes algériennes, la wilaya de Constantine compte plus de 64,8 t /an des déchets inertes. Cependant, la valorisation est basée uniquement sur la réutilisation de ce type de déchets dans le remblayage [21].

I.1.4.3. Elimination des déchets

L'élimination reste la solution appliquée à 97% des déchets produits en Algérie (figure I.3). Les déchets destinés à l'élimination sont mis en décharges sauvages à (57%), brûlés à l'air libre dans des décharges publiques ou communales non contrôlées (30%), en décharges contrôlées et des centres d'enfouissement technique(CET) (10%). Le nombre de décharges

sauvages est passé de 2000 en 1980 à 3130 en 2007[21]. Par contre, les quantités destinées à être valorisées sont trop faibles, dont seulement 2% par recyclage, et 1% par compostage.

L'objectif pour 2025 est d'augmenter le taux de recyclage global et par matière, d'éradiquer les décharges sauvages. Depuis 2001, le gouvernement a opté pour l'enfouissement comme mode le plus adéquat à l'élimination des déchets municipaux. Ces derniers aspects seront traités avec plus de détails un peu plus loin [21].

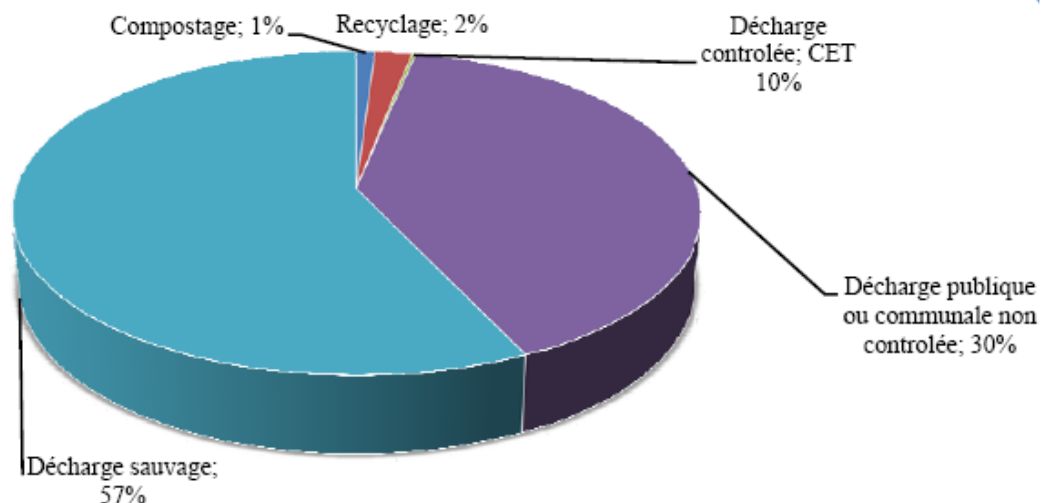


Figure I.3. Modes d'élimination des déchets en Algérie [22].

I.1.5. Métaux lourds

I.1.5.1. Définition

L'organisation mondiale de la santé (O.M.S) [24], désigne sous le nom de métaux lourds l'ensemble des métaux présentant un caractère toxique pour la santé et l'environnement. Les métaux lourds sont présents dans tous les compartiments de l'environnement, mais en général en quantités très faibles. KEBIR, 2012 [25], définit comme "métaux lourds", les 65 éléments traces qui présentent une masse volumique supérieure à 5 g/cm^3 pouvant avoir un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes végétaux et animaux. On dit que les métaux sont présents « en traces ». Ils sont aussi « la trace » du passé géologique et de l'activité de l'Homme. Certains sont indispensables au déroulement des processus biologiques des végétaux et des animaux à des quantités infinitésimales.

I.1.5.2. Métaux lourds dans les ordures ménagères

La composition des ordures ménagères, en mg/kg de matière sèche est présentée dans le tableau I.5.

Tableau I.5. Teneur moyenne des déchets en métaux lourds [26].

Eléments traces dans les Ordures ménagères	Teneur moyenne (mg/kg de matière sèche)
Arsenic	2.5
Cadmium	1.3
Mercure	0.1
Nickel	20
Cuivre	56

L'origine des métaux lourds dans les déchets ménagers est très variée :

- **Cuivre** : Provient essentiellement des produits de protection du bois, des encres d'imprimerie, des fils électriques, du matériel électronique [27].
- **Zinc** : Est issu principalement des piles, du cuir et du caoutchouc [27].
- **Mercure** : Actuellement, on peut toujours trouver de mercure dans les déchets urbains, notamment sous formes de piles, thermomètres, amalgames dentaires, tubes fluorescents ou interrupteurs à mercure [28].
- **Cadmium** : Le cadmium est détecté dans la plupart des déchets solides d'origines domestique, industrielle, hospitalière, agricole [28].

On le trouve notamment dans :

- Les batteries et accumulateurs, les piles ;
- Les PVC et autres plastiques (le cadmium est utilisé comme stabilisant et colorant couvrant une gamme allant du jaune au rouge) ;
- Les résidus d'engrais phosphatés ;
- Les équipements électroniques ;
- Certaines peintures ;
- **Plomb** : Il est présent dans les déchets solides et provient [28] :
 - De la ferraille ;
 - Des piles et batteries ;
 - Des matières plastiques (caoutchouc renfermant du PbO) ;
 - Des pigments de peinture ;
 - Des papiers et cartons ;

On le trouve donc dans les déchets industriels banals et dans les déchets managers.

- **Nickel** : Le nickel est contenu dans les pièces métalliques (déchet de chantiers), les aciers inoxydables, les piles et les batteries, les céramiques, les aimants [28].

➤ **Arsenic** : L'arsenic est à la base une impureté significative de nombreux minerais [28].

Le trioxyde d'arsenic est utilisé :

- En métallurgie (dans les alliages des grilles des batteries, dans les métaux de soudure) ;
- Dans la fabrication des pesticides, fongicides, insecticides ;
- Dans les sels de protection des bois ;
- En chimie (produits pharmaceutiques, pigments de peinture, tannerie) ;
- Dans l'industrie du verre (comme dégazeur ou colorant).

I.2. CENTRE D'ENFOUISSEMENT TECHNIQUE

Le dépôt des ordures ménagères dans le milieu naturel, en dehors des espaces de vie est le mode « d'élimination » des déchets le moins coûteux et le plus répandu [29-30]. Les décharges contiennent d'énormes masses de déchets en constante évolution qui sont susceptibles de déséquilibrer le milieu naturel. Elles peuvent être considérées comme de gigantesques bioréacteurs dans lesquels des réactions biologiques et chimiques ont lieu simultanément.

I.2.1. Définition et classification des CET [31]

Les CET sont définis comme un site d'élimination des déchets par dépôt des déchets sur ou dans la terre (c'est à dire en sous-sol), y compris :

- Les décharges internes (les décharges où un producteur de déchets procède lui-même à l'élimination des déchets sur le lieu de production) ;
- Un site permanent (pour une durée supérieure à un an) utilisé pour stocker temporairement les déchets, à l'exclusion : des installations où les déchets sont déchargés afin de permettre leur préparation à un transport ultérieur en vue d'une valorisation, d'un traitement ou d'une élimination en un endroit différent ;
- Du stockage des déchets avant valorisation ou traitement pour une durée inférieure à trois ans en règle générale ;
- Du stockage avant élimination pour une durée inférieure à une année.

I.2.2. Classification des CET

Selon la nature des déchets admis et en fonction de leur perméabilité les centres de stockage de déchets sont répartis en trois classes

- ✓ **CET de classe 1** : Pour déchets dangereux, toxiques (déchets industriels spéciaux traités et stabilisés, les cendres volantes des usines d'incinération, etc...) ;

- ✓ **CET de classe 2** : Pour déchets ménagers et assimilés (ordures ménagères, encombrants, déchets verts, déchets industriels banals, etc...);
- ✓ **CET de classe 3** : Pour les déchets inertes (déchets, déblais, gravats, etc...) issus d'entreprises du bâtiment et des travaux publics et de travaux de bricolage de particuliers ;

En raison des risques potentiels de nuisances et de pollution, le choix du site est un facteur déterminant pour tout projet de décharge contrôlée [32].

I.2.3. Critères de choix des sites d'implantation

Le choix du site d'implantation d'un CET ne peut se faire par hasard. Différents paramètres doivent être étudiés afin de s'assurer que le CET, une fois en exploitation et après fermeture, aura une incidence la plus faible possible sur l'environnement. Il est souvent important de considérer d'emblée plusieurs sites potentiels et d'en étudier en profondeur les caractéristiques, avant de sélectionner le plus approprié qui accueillera le CET. Au premier abord, la recherche des sites potentiels doit considérer quelques priorités bien établies :

- Favoriser la stabilité (du point de vue géologique et hydrogéologique) à long terme des dépôts ;
- Tenir compte qu'une activité biologique est susceptible de se développer dans le CET. Éviter par conséquent les conditions qui pourraient entraîner des dérèglements de cette activité ;
- Éviter toute interaction entre le CET et l'environnement en protégeant notamment le réseau hydrographique et les réserves d'eau et en évitant la dispersion de gaz nocifs dans l'atmosphère ;
- Tenir compte de l'accessibilité du site ;
- Tenir compte de l'impact sur l'environnement humain et écologique ;
- Tenir compte du volume disponible et utilisable. Par la suite, les sites potentiels doivent être évalués selon des critères prédéfinis pour dégager leurs avantages et leurs faiblesses. Pour cela, il faut distinguer deux types de critères :
- Les critères d'exclusion qui définissent les conditions minimales d'acceptation d'un site d'implantation pour un CET. Certaines de ces conditions pourraient toutefois être rencontrées mais au prix est relativement cher pour l'investissement d'aménagement et d'isolement du site ;
- Les critères de comparaison qui vont permettre de différencier les sites potentiels sur base de cotations relatives à des considérations techniques plus ou moins favorables.

Ces critères, qu'ils soient d'exclusion ou de comparaison, font partie de différents domaines scientifiques et socio-économiques tels que la géologie, l'hydrogéologie, l'hydrologie, la chimie et l'aménagement du territoire. Ils ne constitueront pas un outil de sélection, dans le sens le plus restrictif du terme, mais plutôt un moyen pour classer les sites potentiels selon un ordre de préférence après un minimum d'étude [33].

I.2.3.1. Critères d'exclusion

Un site sera sélectionnable s'il répond à l'ensemble des conditions suivantes, et ce, après aménagements éventuels pour satisfaire un ou des critères particuliers (ex. : apport d'argile pour assurer une meilleure imperméabilité de la base du CET) [33].

1. Perméabilité du sol (naturel ou après aménagements) inférieure ou égale à 10^{-9} m/s¹ sur une épaisseur minimum de 1 m.
2. Ne pas implanter un CET dans une zone présentant une faiblesse géologique active (sismique, volcanique, etc.).
3. Ne pas implanter un CET sur le bassin-versant d'une nappe phréatique exploitée ou exploitable dépourvue d'une isolation naturelle par rapport au terrain superficiel (1 m de sol de perméabilité 10^{-9} m/s).
4. Pente du terrain inférieure à 1/3 (1 vertical sur 3 horizontal = 18° sur l'horizontale).
5. Niveau piézométrique de la nappe phréatique sous le CET fortement instable (battement).
6. Ne pas implanter un CET dans une zone inondable ou en dessous du niveau de la mer.
7. Ne pas implanter un CET dans une carrière (exploitée ou abandonnée) autre qu'argilière.
8. Le site ne doit pas être situé à moins de 50 m d'une installation de captage et, en milieu karstique (présence abondante de calcaire), la zone de site ne peut renfermer des points de pénétration préférentiels (dolines, chantoirs, etc...) et ne peut se situer sur les axes de circulation préférentiels alimentant le captage.
9. Le débit des eaux susceptibles de s'écouler (écoulement hypodermique, percolats, etc...), si la gestion du site présente des défaillances, à partir du site en direction d'une rivière environnante, doit être au moins 100 fois inférieur au débit de la rivière (en période d'étiage), d'alimentation du lac, etc. On parle d'un taux de dilution supérieur à 100.
10. Ne pas implanter un CET dans une zone saline ou dont le sous-sol renferme du gypse (source d'une activité sulfato-réductrice néfaste sur le plan économique et environnemental et source de dissolution biologique ou chimique des roches).

11. L'implantation du CET ne doit pas être à l'origine de la destruction d'un écosystème particulier.
12. La distance entre le site et les habitations ou un site d'intérêt (naturel, historique, etc.) doit être supérieure à 100 m.
13. La distance entre le site et les zones agricoles ou des voies et plans d'eau doit être supérieure à 25 m.

I.2.3.2. Critères de comparaison

La base du système de cotation est de donner une valeur nulle pour un site présentant les «conditions minimum» pour pouvoir être exploité (satisfaction à tous les critères dits «d'exclusion»). Les critères de comparaison donneront des valeurs soit positives, soit négatives, selon le cas particulier de chaque site. La cote maximum est de 50. La cote minimum est de -50. Les différentes cotes seront attribuées par un comité d'experts ayant des compétences respectives dans les différents domaines concernés (biologie, géologie, hydrogéologie, etc.). Afin d'effectuer un choix sans équivoque, il convient de constituer un groupe d'experts commun à la sélection de tous les sites potentiels associés à une même zone de collecte voire, dans les cas où la superficie le permet, un comité commun à tous les sites d'un pays. Il convient également, afin de motiver les choix, d'effectuer des tests de sensibilité sur la cotation générale en faisant varier sensiblement l'importance relative de certains critères par rapport aux autres. Par exemple, il peut être préférable de choisir un site beaucoup plus éloigné, mais dont les caractéristiques géologiques sont meilleures (diminution de la cote du premier critère et augmentation de celle du second), si les problèmes de transports sont facilement gérables [33].

I.2.4. Potentiel polluant des centres de stockages de déchets

Le stockage des déchets, revient à concentrer dans un volume réduit un ensemble varié de matériaux évolutifs. Dès la phase de dépôt, les déchets sont soumis à des processus de dégradation liés à des réactions bio-physico-chimique complexes. Une partie des produits de la dégradation se retrouve en phase gazeuse, le biogaz, l'autre est transportée par les eaux de pluie qui s'infiltrent dans les déchets, le lixiviat.

I.2.4.1. Lixiviats des décharges

I.2.4.1.1. Définition

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 ». La composition des déchets enfouis, leur degré de décomposition, leur taux d'humidité et l'âge de la décharge sont les principaux paramètres influençant la composition du

lixiviat. La production massive de celui-ci engendre des risques de pollution des sols, des rivières et des nappes phréatiques, il est donc nécessaire de le collecter et de le traiter avant son rejet dans le milieu naturel [34].

I.2.4.1.2. Composition de lixiviat

Le lixiviat se charge mécaniquement, bactériologiquement et surtout chimiquement de substances minérales et organiques [35-36]. Selon ADEME (2005) [37], on retrouve dans les lixiviats différents types de polluants organiques, minéraux et les micro-organismes. Le tableau I.6 donne un ordre de grandeur des concentrations rencontrées.

Tableau I.6. Composition des lixiviats des décharges [37].

Paramètre (unités en mg/l)	Variations
pH (sans unité)	3.7-9
Quantité de lixiviats (l/min/ha)	1-8
MES	100-500
DCO	40-152000
DBO5	20-57000
Carbone organique total	30-29000
Azote ammoniacal	50-2200
Azote organique	14-2500
Phosphore total	0.1-50
Chlorures	45-5000
Sulfates	50-5000
Sodium	60-7700
Potassium	28-3700
Calcium	10-7200
Fer	0-5500
Cadmium	0-17
Chrome	0-1.5
Cuivre	0-10
Plomb	0-5
Magnésium	100-2000
Manganèse	0.03-1400
Nickel	0-13
Zinc	0-1000
Hydrocarbures totaux	0 à plusieurs dizaine de ppm
phénols	
Pesticides	

La composition des lixiviats n'est pas constante au cours du temps, elle évolue en fonction de l'état de dégradation des déchets. En effet, la différence de bio-dégradabilité des déchets provoque une évolution temporelle de la qualité des lixiviats [38].

I.2.4.2. Biogaz de décharges

Le phénomène de digestion anaérobie s'installe dans les installations de stockage après une première phase de dégradation aérobie. Celui-ci aboutit à la production de biogaz, essentiellement constitué de méthane et dioxyde de carbone. Suivant les sites, la nature et la quantité de biogaz seront variables. Son captage est rendu nécessaire par la nuisance qu'il présente pour les riverains [39].

I.2.4.2.1. Composition du biogaz

La composition du biogaz évolue au cours des différentes phases de biodégradation qui se déroulent dans la décharge [40]. Les dangers principaux engendrés par la production du gaz de décharge sont : les nuisances et les odeurs, l'influence sur le climat global, pollution de l'eau et du sol, le risque d'incendie et d'explosion [41].

Le gaz de décharge contient, en général, plus de 30% de méthane [42]. D'autres phases gazeuses sont présentes dans des proportions variables. Il apparaît que certains composés sont responsables des odeurs dégagées. Les constituants du biogaz peuvent être classés en composés inorganiques et organiques, qui provoquent une évolution temporelle de la qualité des lixiviats. Les principaux paramètres inorganiques sont le dioxyde de carbone (CO₂), le monoxyde de carbone (CO), l'Hydrogène (H₂), l'oxygène (O₂), l'Azote (N₂), l'Ammoniac (NH₃) et l'Hydrogène sulfuré (H₂S). Le gaz de décharge contient d'autres éléments organiques. Ces éléments sont principalement des hydrocarbures dont notamment des alcanes ou alcènes et leurs produits d'oxydation (aldéhydes, cétones, alcools et esters). Les gaz contiennent aussi des produits halogènes, soufrés (mercaptans) ou aromatiques qui provoquent une évolution temporelle de la qualité des lixiviats [37].

I.2.5. Risques sanitaires et environnementaux

Dans les décharges d'ordures ménagères, c'est la décomposition des bio-déchets qui génère, au contact des autres déchets, les principales pollutions.

I.2.5.1. Pollution par les lixiviats

Les lixiviats contiennent des bactéries, des matières organiques, des hydrocarbures, des composés minéraux et des métaux lourds [43]. Les eaux souterraines selon une étude du BUREAU VERITAS (1990) [44] au contact des lixiviats se dégradent chimiquement et bactériologiquement. Cette pollution des eaux souterraines est le résultat de l'infiltration et de la diffusion de lixiviats en sous-sol perméable [45].

Sur les sites de décharges on rencontre essentiellement trois types de pollution : pollution par les matières organiques et/ou minérales, pollution par les métaux lourds et pollution par les microorganismes [46].

D'après une étude toxicologique officielle conduite dans 56 décharges de déchets municipaux au Cameroun, 133 produits chimiques toxiques (dont 32 causent le cancer, 10 causent des malformations et 21 causes des endommagements génétiques) ont été mis en évidence comparés à 72 produits dans les décharges de déchets industriels [47-48].

I.2.5.2.Risques liés au biogaz

Le biogaz représente une source d'énergie et de chaleur mais il a cependant un impact non négligeable sur l'environnement. En effet, le méthane participe activement à l'effet de serre et l'émission issue des décharges d'ordures ménagères est l'une des sources anthropogéniques les plus importantes [49]. La réglementation européenne et française impose, comme pour le lixiviat, la collecte et le traitement du biogaz afin de protéger l'environnement par la réduction des nuisances olfactives et des émissions de gaz à effet de serre, afin d'assurer la sécurité du site en évitant les risques d'explosion liés à l'accumulation de biogaz et afin de réduire les coûts d'exploitation du site par valorisation du biogaz produit [50]. Le biogaz contient également des composés toxiques : hydrogène sulfuré, les mercaptans et les composés organiques volatils (COV : benzène, chlorure de vinyle, toluène etc...). Le biogaz migrant par le sol peut diffuser dans des eaux souterraines. Certains de ses composants (CO₂, benzène) sont hydrosolubles et peuvent polluer ces eaux et le biogaz migrant par le sol peut provoquer l'asphyxie des racines et l'assèchement du sol. Certains des composants de biogaz sont toxiques pour des plantes (p.ex. H₂S, composés halo-organiques) [51].

Peu de recherches ont étudié l'impact direct de l'exposition des humains à l'ensemble des substances formant le biogaz. Cependant, des recherches ont été effectuées aux environs de l'ancienne carrière de Miron à Montréal et les résultats ont montré d'après GOLBERG et al. (1995a, 1995b)[52-53], Cité par BACHAND (2003) [54], que le risque de développer un cancer du foie et un cancer du pancréas serait plus élevé pour les hommes résidant à l'intérieur d'un rayon de 1,25 km du lieu d'enfouissement des déchets. Chez les femmes, le risque de développer un cancer de l'estomac et un cancer de l'utérus serait plus élevé. De plus, les études ont trouvé des naissances prématurées, des malformations congénitales et des avortements spontanés chez les personnes riveraines de décharges [45].

I.3. PROCÉDES DE STABILISATION/SOLIDIFICATION (S/S)

I.3.1. Définition de la technique de Stabilisation/Solidification

Définie selon deux fonctions principales : la première, la stabilisation, se réfère à un processus dans lequel un déchet est converti en une forme plus stable chimiquement. Ceci pourrait inclure la formation de composés insolubles qui piègent les éléments ou les composés toxiques. La seconde fonction, la solidification, est un processus dans lequel des matériaux sont ajoutés à un déchet pour produire une masse solide et monolithique à partir du déchet liquide, avec une intégrité structurelle et des caractéristiques physiques améliorées [55].

I.3.2. Objectifs de la Stabilisation/Solidification

Les procédés de stabilisation/solidification doivent répondre aux objectifs suivants :

- Transformer le déchet en un solide plus facile à transporter et à stocker ;
- Diminuer la surface d'exposition à l'environnement des contaminants ;
- Limiter la solubilité des contaminants en cas de contact avec un fluide lixiviant ;

Ils excluent le simple « lavage » destiné à entraîner suffisamment les contaminants pour rendre le déchet « stable », dans le cas de déchets présentant initialement un caractère solide. En effet, dans ce cas il n'est plus question de traitement de déchet mais de transfert de contaminants dans la phase lixivante.

Un matériau liant est utilisé pour atteindre les objectifs de stabilisation/solidification. La matrice liante 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. Cependant le terme de stabilisation est plus souvent retenu pour les matrices qui interagissent chimiquement avec le déchet en immobilisant les polluants [56].

I.3.3. Stabilisation/Solidification à base des liants hydrauliques

Selon les problématiques de chaque déchet, c'est-à-dire selon la nature des polluants considérés et des scénarios environnementaux envisagés, les formulations élaborées seront différentes [57].

Généralement, les procédés de stabilisation / solidification sont classés selon le type de liants utilisés :

- Stabilisation / solidification par liants hydrauliques ou minéraux,
- Encapsulation par liants organiques.

Nous nous intéresserons uniquement aux procédés utilisant les liants hydrauliques et plus particulièrement les ciments. Ces procédés sont utilisés pour des déchets inorganiques (ou

à très faible contenu en organiques) dont les principales problématiques sont souvent une forte fraction soluble et/ou un taux élevé en métaux lourds.

La mobilité des espèces polluantes peut être réduite de deux façons :

- Elles peuvent être piégées physiquement dans la structure même du ciment ;
- Elles peuvent également réagir avec un des constituants du ciment, provoquant ainsi un changement de spéciation, de solubilité et donc de mobilité.

Parmi les différents processus de fixation chimique, on peut citer :

- La précipitation en hydroxydes métalliques (cas de plusieurs métaux) favorisée par le milieu alcalin engendré par la pâte de ciment ;
- L'adsorption par les hydrates du ciment, dont les C-S-H qui ont une grande surface spécifique chargée négativement en milieu basique ;
- l'incorporation dans les hydrates par addition favorisée par les structures en feuillets (cas des C-S-H) ou par substitution du calcium ou du sulfate par exemple.

Selon la nature des espèces polluantes, les réactions d'hydratations peuvent être perturbées. Les sels métalliques, tels que les sels de manganèse, de cuivre, de plomb, d'étain et de zinc sont connus pour perturber le temps de prise du matériau et sa dureté finale. De la même façon, les sels de sodium agissent comme retardateurs [58].

I.3.3.1. Liants hydrauliques

Les ciments sont des liants hydrauliques, formés de constituants anhydres, contenant essentiellement de la silice, de l'alumine et de la chaux. Les principaux constituants sont les suivants : clinker, laitier de haut fourneau, pouzzolane, cendres volantes, fillers. A ces principaux constituants peuvent être ajoutés des additifs en petites quantités, tels que du sulfate de calcium pour régulariser la prise, des sels solubles pour améliorer certaines caractéristiques et des agents de mouture pour faciliter le broyage [59].

La combinaison de ces composés anhydres avec l'eau provoque un durcissement de la pâte, dû à la formation d'aluminosilicates de calcium hydratés très instables et très peu solubles dans l'eau. La norme AFNOR NF P15-301 [59] relative aux liants hydrauliques définit les différents ciments et leurs constituants et en indique la classification et les spécifications.

Parmi les différents ciments, les plus utilisés dans la stabilisation / solidification des déchets sont le Ciment Portland Artificiel (CPA-CEM I) et le Ciment Portland Composé (CPJ – CEMII).

Le CEM I contient au moins 97 % de clinker, le reste étant du gypse et le CEM II contient au moins 65 % de clinker, le reste étant l'un ou plusieurs des constituants énumérés plus haut [60].

La norme NF P 15-301 classe les ciments en fonction de la résistance à la compression minimale et la résistance maximale à 28 jours d'hydratation dans des conditions opératoires spécifiées. Les résistances sont exprimées dans le système international SI d'unités de mesure, en mégapascals : 1 Mpa, qui vaut 1 N/mm² ou encore 10⁶ N/m².

Les principales catégories de ciment sont classées ci-après selon la norme NF P 15-301 [59]

- CPA : Ciments Portland Artificiels. Ils contiennent au moins 97 % de clinker et éventuellement 3 % de filler.
- CPJ : Ciments Portland composés. Ils sont constitués d'au moins 65 % de clinker, le reste étant l'un ou plusieurs des constituants énumérés ci-dessus.
- CLC : Ciments au laitier et aux cendres. Ils contiennent 25-60% de clinker, 20-45% de cendres volantes et 20-45% de laitier avec 3% de filler.
- CHF : Ciments de haut fourneau. Ces ciments contiennent entre 40- 75% de laitier, 3% de filler, le reste étant du clinker.
- CLK : Ciments de laitier au clinker. Ils contiennent au moins 80% de laitier, 3% de filler, le reste étant du clinker.

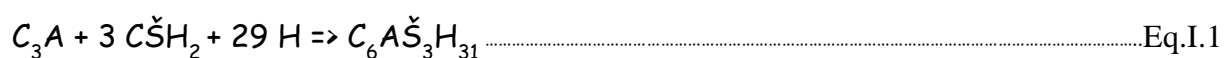
I.3.3.2. Hydratation du ciment [61]

La formation de la "pierre ciment" provient du durcissement de la matrice par formation d'hydrates provenant des réactions chimiques entre le clinker et l'eau.

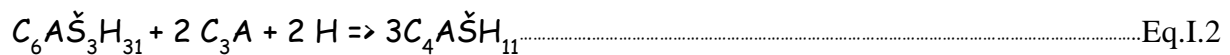
Le clinker est constitué principalement de 4 phases :

- le silicate tricalcique $(CaO)_3 SiO_2 // (C_3S)$,
- le silicate bicalcique $(CaO)_2 SiO_2 // (C_2S)$,
- l'aluminate tricalcique $(CaO)_3 Al_2O_3 // (C_3A)$,
- l'aluminoferrite tetracalcique $(CaO)_4 Al_2O_3 Fe_2O_3 // (C_4AF)$.

A ces phases, il faut ajouter le gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O // (C\check{S}H_2)$ pour le ciment Portland. Ces éléments réagissent avec l'eau pour former les hydrates. Au démarrage, les aluminates ou/et aluminoferrites calciques s'hydratent si rapidement qu'il faut ralentir ces réactions. C'est le rôle du gypse, qui va réagir avec les aluminates pour donner de l'ettringite $(C_6A\check{S}_3H_{31})$ selon la réaction Eq.I.1:



L'ettringite ainsi formée entoure les aluminates, ralentissant l'accès de l'eau d'hydratation. Une fois tous les sulfates épuisés par cette réaction, on assiste aux réactions suivantes :



En parallèle, les silicates (C_3S ou/et C_2S) réagissent avec l'eau pour former le véritable réseau résistant de la matrice, les C-S-H : Ils confèrent au matériau sa tenue mécanique.

Les différents produits de l'hydratation de ciment portland sont présentés dans le tableau I.7.

Tableau I.7. Notations cimentières des différentes phases et principaux produits d'hydratation de ciment.

	Désignations	Formules chimiques	Notation cimentière
Les phases de ciment portland	Alite	3CaO, SiO ₂	C ₃ S
	Belite	2CaO, SiO ₂	C ₂ S
	Celite I (aluminates tricalciques)	3CaO, Al ₂ O ₃	C ₃ A
	Celite II (alumino-ferrite tetracalciques)	4CaO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
Produits d'hydratation	Portlandite	Ca(OH) ₂	CH
	L'ettringite	Ca ₆ .Al(SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ .25H ₂ O	C ₆ AS ₃ H ₃₂
	Monosulfate	3CaO, Al ₂ O ₃ , 3 CaSO ₄ , 12H ₂ O	C ₄ ASH ₁₂
	Silicate de Calcium hydraté	3CaO, 2SiO ₂ .3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃

I.3.4. Type de déchets à stabiliser/solidifier

Les déchets ultimes à stabiliser/solidifier sont classés par la législation française [62] en deux catégories correspondant à deux échéances (tableau I.8). Les catégories A et B regroupent des déchets ultimes pour lesquels la stabilité constitue un critère d'acceptabilité en centre de stockage respectivement à partir du 30 mars 1995 et du 30 mars 1998.

Tableau I.8. Liste des déchets industriels spéciaux ultimes à stabiliser/solidifier [62]

<p>Déchets de la catégorie A (30 mars 1995)</p>	<p>-Résidus de l'incinération (suies, cendres, déchets de l'épuration des fumées) ; -Résidus de la métallurgie (poussières, scories et crasses de seconde fusion, boues d'usinage) ; - Résidus de forage (suite à l'emploi de fluides de forage à base d'hydrocarbures) ; -Déchets minéraux de traitement chimique (oxydes et sels métalliques, sels minéraux et catalyseurs usés).</p>
<p>Déchets de la catégorie B (30 mars 1998)</p>	<p>-Résidus de traitement d'effluents et d'eaux industriels, de déchets ou de sols pollués (boues et résidus d'épuration d'effluents, résidus de traitement de sols pollués, résines échangeuses d'ions) ; -Résidus de l'incinération (mâchefers) ; -Résidus de peinture ; -Résidus de la métallurgie (scories, crasses, sables de fonderie) ; -Résidus d'amiante ; -Réfractaires et autres matériaux minéraux usés ; -Résidus de recyclage d'accumulateurs et de batteries ;</p>

I.3.5. Incorporation de déchets dans les matrices cimentaires

L'incorporation de déchets dans les matrices cimentaires induit des perturbations dans l'hydratation, et peut avoir des conséquences sur les propriétés physiques et chimiques de la matrice [61], Dans un premier temps nous recenserons l'effet de l'ajout des déchets contenant une forte fraction soluble à travers l'étude du cas des chlorures. Ensuite, nous présenterons les interactions particulières avec les métaux lourds.

I.3.5.1. Cas des chlorures

Les chlorures font partie des problématiques des déchets contenant une forte fraction soluble. Dans la matrice solide, ils peuvent s'intégrer entre les couches des C-S-H grâce à la structure en feuillets de ces silicates [63].

I.3.5.2. Cas des métaux lourds

➤ *Plomb*

Le plomb a un effet retardateur bien connu sur l'hydratation et donc la prise du ciment. Deux mécanismes ont été mis en évidence.

Le premier mécanisme est la précipitation d'un gel (à base de $\text{Pb}(\text{OH})_2$) à la surface des grains de ciment anhydre, créant ainsi une barrière de diffusion entre ces derniers et l'eau nécessaire à l'hydratation. La prise est alors ralentie [64-65].

Le second mécanisme est l'incorporation du plomb dans les C-S-H, par addition ou substitution du calcium [66].

➤ *Zinc*

Pendant l'hydratation du ciment, le zinc peut se déposer sur la surface des grains de ciment sous forme d'hydro-zincate de calcium $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ce qui expliquerait l'effet retardateur sur la cinétique d'hydratation du ciment. Mais ce composé se révèle être un produit intermédiaire car n'étant plus détecté après quelques jours.

Le zinc sous sa forme cationique Zn^{2+} est également susceptible de se substituer au Ca^{2+} dans les C-S-H et dans l'ettringite formés lors de l'hydratation des composés C_3A et C_4AF . De plus, pour expliquer l'incorporation du zinc dans les C-S-H, certains auteurs suggèrent un mécanisme faisant appel à une solution solide (incorporation du zinc dans la structure), mais en n'écartant pas la thèse d'une sorption en surface. En effet, la solubilité du zinc n'est contrôlée ni par le zincate de calcium, ni par l'oxyde de zinc, les concentrations mesurées étant significativement plus basses que celles prévues [58]. Au cours de l'hydratation, il peut se retrouver sous forme d'hydroxyde ($\text{Zn}(\text{OH})_2$) qui a une très faible solubilité en milieu alcalin.

➤ *Cadmium*

Au cours de l'hydratation, il se trouve sous forme d'hydroxyde ($\text{Cd}(\text{OH})_2$) qui a une très faible solubilité en milieu alcalin [61], le Cd peut se déposer également à la surface des grains du ciment sous forme d'hydroxydes mélangés $\text{CaCd}(\text{OH})_4$ [67]. La présence de cadmium augmente la formation d'ettringite [68].

➤ *Nickel*

Les études menées sur le nickel montrent que la présence de ce dernier pendant l'hydratation du ciment conduit à une accélération de l'hydratation du ciment. Il a été observé que l'augmentation de la quantité du nickel dans les matrices cimentaires engendre une augmentation de la résistance en compression aux jeunes âges [69].

I.3.6. Lixiviation des déchets stabilisés

L'évaluation des impacts environnementaux potentiels d'une utilisation de déchets stabilisés / solidifiés se fait principalement à travers l'étude du relargage des polluants. L'objectif des tests de lixiviation est de déterminer les phénomènes de fixations des contaminants et de comprendre les mécanismes de relargage. Dans le rapport n°42 de

l'académie des sciences (IFAS 1998) [70], on trouve la définition suivante de la lixiviation : « la lixiviation est l'extraction par voie liquide d'éléments ou de molécules inorganiques ou organiques contenus ou fixés sur une matrice solide, mettant en œuvre des mécanismes chimiques ou biologiques « extraction chimique ou bactérienne de métaux) ». De son côté, l'AFNOR présente l'essai de lixiviation de la manière suivante : il s'agit d'une extraction liquide-solide, d'un échantillon de déchet mis en contact avec une solution aqueuse lors de laquelle certains constituants du matériau sont extraits afin de caractériser et évaluer les constituants pouvant être lixiviés à partir du déchet ou de matériau synthétisé. Selon les objectifs recherchés, l'essai peut comprendre une ou plusieurs extractions successives [70-74].

Plusieurs programmes de recherche ont été conduits à l'INSA de Lyon sur l'interprétation des tests de lixiviation, de façon à développer des outils pour évaluer le relargage à long terme des polluants contenus dans les déchets stabilisés / solidifiés. Il a ainsi été proposé et mis au point une boîte à outils de tests de lixiviation pour l'évaluation du flux de polluants émis d'un déchet solide [58,75]. Elle se compose de deux essais "à l'équilibre" et d'un essai de lixiviation dynamique :

- La simulation de la composition de l'eau des pores (EP) par extrapolation à partir des concentrations obtenues en mettant en contact le matériau finement broyé avec de l'eau à des ratios L/S différents,
- L'influence du pH sur la solubilisation des éléments (IpH), qui consiste à mettre en contact du matériau broyé avec différentes quantités d'acide ou de base,
- Le test de lixiviation sur monolithe (TLM) qui vise à caractériser les mécanismes de transfert de masse en mettant le bloc en contact avec un lixiviant renouvelé périodiquement.

Les tests proposés sont des tests paramétriques car ils permettent de déterminer certaines caractéristiques physico-chimiques des matériaux. Ces tests sont proposés pour des matériaux homogènes de type mortiers [69].

I.3.6.1. Test de l'eau des pores (EP) et de la fraction maximale mobilisable (FMM) [69]

On distingue plusieurs méthodes de caractérisation de l'eau de pores. L'une consiste en l'extraction de cette eau des pores du matériau et de l'analyser.

➤ Principe du test

Le test consiste en une mise en contact du matériau finement broyé (dont on suppose qu'on pourra extraire toute l'eau par une installation de filtration) avec des volumes différents d'eau déminéralisée. L'analyse physico-chimique des éluats nous permet de déterminer

l'évolution des concentrations des espèces chimiques en fonction de la variation des rapports L/S.

I.3.6.2. Test de capacité de neutralisation acide (CNA) [69]

Ce test a pour but la détermination de la capacité à neutraliser les solutions acides ou basiques du matériau ainsi que la solubilisation des polluants en fonction du pH.

➤ Principe du test

Le matériau est fragmenté et mis en contact, pendant un certain laps de temps, avec des solutions contenant un acide fort ou une base forte.

I.3.6.3. Test de lixiviation sur monolithe (TLM) [69]

Les tests comportementaux sont des tests de caractérisation fondamentale du comportement à la lixiviation de matériaux monolithiques. Nous mettons en place des tests dynamiques qui se caractérisent par un fort renouvellement en lixiviant suivie par la macération qui incluent éventuellement un phénomène de saturation du lixiviant.

➤ Principe du test

Le test TLM vise à caractériser les mécanismes de transfert de masse par l'observation des flux d'éléments chimiques relargués par les blocs monolithiques poreux. Le bloc est mis en contact avec un volume fixe de solution de lixiviation. La solution est renouvelée périodiquement et la dynamique du relargage de certains éléments est déterminée par l'analyse physico-chimique des éluats obtenues.

I.4. ETAT DE L'ART SUR LA S/S PAR LIANTS HYDRAULIQUES

Plusieurs études ont été effectués sur la stabilisation /solidification à base de liants hydraulique afin d'évaluer la performance de cette technique, Les technologies de S/S en utilisation incluent un large éventail de liants : ciment, chaux, polymère, matériaux pouzzolaniques..., avec ajout d'additifs tels que : la poussière du four à ciment (CKD) et l'objectif global est d'obtenir un taux d'immobilisation des contaminants élevé, avec des dosages en ciment et additifs faibles,

I.4.1. Stabilisation/solidification des déchets solides

La stabilisation/solidification des déchets solides par liant hydraulique a fait l'objet de nombreuses études, on résume l'essentielle de ces travaux dans les points suivants :

➤ Poon C.S.et al. (1986) ont étudié l'effet de trois métaux lourds différents sur la perméabilité et la résistance des matrices cimentaires. Les résultats obtenus montrent :(1) un effet cohérent de différents contaminants métalliques sur la perméabilité des matrices solidifiées ; (2) Les échantillons contaminés par le zinc avaient la perméabilité la plus élevée,

suis suivis successivement du cadmium et du mercure ; (3) La mesure de la porosité de l'intrusion de mercure sur les échantillons a montré une bonne corrélation entre la structure et la perméabilité des pores [76].

➤ Frank K. et al. (1990) ont évalué les mécanismes d'immobilisation de sels de Cd et de Pb par la stabilisation /solidification à l'aide d'agents de fixation du ciment Portland, dans cette étude ils ont préparé les boues (hydroxyde de plomb et hydroxyde de cadmium) par précipitation à partir de solutions aqueuses des nitrates correspondants, le comportement des sels de Cd et de Pb vis-à-vis de la solidification à base de ciment a été étudié à l'aide de test de lixiviation TCLP. Les concentrations de cadmium dans les lixiviats sont très faibles, tandis que les concentrations de plomb sont considérablement plus élevées et représenteraient une menace sérieuse pour les eaux souterraines [77].

➤ Bonen D. & Sarkar S.L. (1995) dans leur recherche ont évalué les effets des attaques agressives du CO₂ sur les matériaux à base de ciment Portland dopés avec des oxydes de métaux lourds, dans cette recherche des pâtes et des mortiers ont été préparés avec un rapport eau/ciment de 0,5, deux pourcentage de métal 1 et 4% par rapport à la masse du ciment ont été utilisés. Les matériaux stabilisés ont été immergés dans de l'eau saturée de chaux pendant 4 jours supplémentaires de polymérisation. À la fin de cette période de durcissement de 7 jours, les matériaux ont été placés dans des récipients en verre remplis d'eau distillée dans lesquels un gaz CO₂ a été maintenu en bouillie pendant toute la période expérimentale, afin d'étudier les effets de la corrosion précoce ou tardive sur le lessivage, les matériaux ont été soumis à ce type d'attaque pendant 7, 50 et 180 jours. Les résultats obtenus montrent que ces matériaux sont sensibles aux attaques agressives du CO₂ [78].

➤ Wang S.Y. & Vipulanandan C. (1996) ont éliminé les ions du plomb par la stabilisation/solidification à base de liant hydraulique, dans ce travail le ciment portland a été remplacé partiellement par les cendres volantes, le test de lixiviation TCLP a été utilisé pour étudier le relargage du plomb de la matrice cimentaire. Les résultats de cette recherche montrent que : (1) L'ajout de cendres volantes au ciment a réduit les temps de prise initiale et finale, mais avec l'ajout de temps de prise de nitrate de plomb, ils ont été augmentés ;(2) La résistance à la compression du ciment solidifié a diminué avec l'ajout de cendres volantes et de nitrate de plomb ; (3) Le plomb solidifié avec le mélange de cendres volantes de ciment présentait une lixiviation légèrement inférieure à celle du liant de ciment [79].

➤ Park C-K. (2000) a utilisé Trois matériaux à base de ciment : Ciment portland, ciment portland modifié par la poussière de four à ciment (CKD) et ciment portland modifié par le CKD et un agent de prise rapide (QSA), afin d'étudier la solidification et la stabilisation

de déchets dangereux contenant des métaux lourds. Il a trouvé dans sa recherche que les ions de métaux lourds lessivés à partir des pâtes de matériaux cimentaires sont inférieurs à ceux de ciment portland ordinaire et les matériaux à base de ciment modifiés par le QSA et le CKD, ces derniers présentent une grande capacité de fixation des métaux lourds, en particulier les déchets contenant des métaux lourds multiples [80].

➤ Palomo A. & Palacios M. (2003) ont testé la capacité de stabilisation / solidification d'une matrice cimentaire réalisée à l'aide d'une activation alcaline de cendres volantes, en présence des métaux lourds toxiques tels que le chrome et le plomb. Cette capacité a été comparée à celle du ciment Portland. d'après les tests de lixiviation effectués dans cette recherche, cette nouvelle matrice est capable de stabiliser et de solidifier le plomb de manière très efficace. Cependant, il ne se présente pas comme efficace en ce qui concerne la fixation du chrome car cet élément perturbe fortement le mécanisme d'activation alcaline des cendres [81].

➤ Zbigniew G. & Anna K. (2008) ont évalué le niveau d'immobilisation des métaux lourds (Pb^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{6+} , Cd^{2+} , Mn^{2+}) dans le ciment portland ordinaire ainsi que dans des liants contenant une grande quantité d'additifs minéraux dans sa composition, ils ont introduit ces métaux dans les matériaux à base de ciment sous forme de sels solubles ainsi que de composants de déchets dangereux (poussières métallurgiques, cendres volantes provenant de l'incinération de déchets médicaux). Ils ont indiqué que les métaux lourds (Pb, Cu, Zn, Cd, Mn) ajoutés sous forme de sels sont très efficacement immobilisés dans des matrices hydratées (de 99,82 % à 99,99%) ; Cr est une exception immobilisé avec un degré inférieur (de 85,97% à 93,33%). Dans ce travail L'efficacité de l'immobilisation a été démontrée [82].

➤ Cheng L et al. (2013) ont traité les boues d'épuration par la solidification / stabilisation à base de ciment. Pour réduire l'utilisation de ciment ils ont utilisé additifs inorganiques : calcium-bentonite, cendres volantes et kaolinite, les avantages de ces additifs pour les boues d'épuration traitées ont été évalués en termes de résistance à la compression non confinée et de lixiviation de polluants. Les résultats des tests montrent que la bentonite de calcium était un additif favorable pour améliorer l'efficacité du ciment à solidifier / stabiliser les boues d'épuration [83].

➤ Yamuna Rani M. and al. (2017) ont étudié l'immobilisation des métaux toxiques présents dans les boues d'épuration des effluents pharmaceutiques (ETP) par la technique de stabilisation /solidification. Ils ont utilisé différents mélanges de ciment, de chaux et de bentonite comme liants et les additifs (cendres de combustible pulvérisé (PFA), fumée de silice et poussières de carrière) sont utilisés pour réduire la mobilité du constituant métallique des

boues pharmaceutiques et renforcer la brique, puis ils ont fait subir le test TCLP pour ces matériaux afin d'étudier le comportement à la lixiviation des polluants. Les résultats obtenus montrent que la matrice de composition optimisée avait une forte capacité de fixation pour les métaux lourds comprenant Cu, Zn, Fe, Co, Pb, Ni et Cd. Les liants mélangés (ciment, chaux et bentonite) peuvent être recommandés pour la construction en brique, par exemple pour paver des voies piétonnes [84].

➤ Ghayda Y.AL-K. (2019) a testé la performance et l'efficacité de la méthode de solidification / stabilisation de sable contaminé par l'application d'un test de résistance à la compression non confiné et la méthode 1313 de TCPA de lixiviation de la toxicité. Il a constaté que la méthode de solidification / stabilisation est une technique efficace pour lutter contre la libération de métaux lourds (Fe, Zn, Fe et Cr) qui ont contaminé le sable et ajouté au ciment dans la conception du mélange [85].

I.4.2. Stabilisation/solidification des déchets liquides

L'application de la technique de S/S sur un échantillon liquide n'a attiré qu'un nombre limité d'études. L'essentielle des recherches menées sur la stabilisation/solidification d'un concentré de lixiviat de décharge sont citées dans les points ci-dessous :

➤ Hunce et al. (2012) ont traité le concentré de lixiviat de décharge obtenu après osmose inverse par le procédé de stabilisation/solidification, ils ont ajouté de la zéolite au ciment, les résultats montrent que les principaux polluants présents dans le concentré de lixiviat, le COT, le COD, le SDT et l'ammoniac se sont solidifiés avec succès et il reste environ 1% du COT, du COD, du SDT et de l'ammoniac dans le lixiviat. Ils ont conclu que l'utilisation de zéolite en tant que matériau d'agrégat ne présentait pas de différences significatives [86].

➤ Kallel et al. (2017) ont utilisé des déchets de briques comme substituant des agrégats grossiers dans la composition de mélanges de béton pour la stabilisation du concentré de lixiviat riche en zinc, le traitement de S/S avec le déchet de brique semble approprié et les résultats obtenus montrent que la concentration des contaminants a été diminuée dans le concentré de lixiviat, tous les métaux sauf le Cr étaient effectivement immobilisés dans les matrices [87].

I.5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] DE SADELEER. Nicolas. Droit des déchets de l'UE : De l'élimination à l'économie circulaire. Bruylant, 2016.
- [2] Journal Officiel de la République Algérienne(JORADP), N°77, 15/12/2001, 30 Ramadan 1422,page 8.
- [3] Journal Officiel de la République Française (JORF), Article 1 de la loi du 15 juillet 1975 (n°75-633).
- [4] ALOUEIMINE, Sidi. 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. Limoges, 2006.
- [5] BRUNO, D. Systèmes d'aide à la décision pour le traitement des déchets industriels spéciaux. Thèse de doctorat. Thèse de doctorat, STD, INSA de Lyon, 1977.
- [6] SIBIEUDE, Christophe et SIBIEUDE, Thierry. Les rouages économiques de l'environnement : 64 dossiers-clés, 58 cas concrets, 68 schémas, 397 définitions. Editions de l'Atelier, 1993.
- [7] WEBER, Marc. La gestion des déchets industriels et ménagers dans la communauté européenne : étude de droit communautaire. Librairie Droz, 1995.
- [8] BLIEFERT, Claus et PERRAUD, Robert. Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets. De Boeck Supérieur, 2007.
- [9] MOLETTA, René.Le traitement des déchets. Lavoisier, 2009.
- [10] TABEAUD, Martine et HAMEZ, Grégory (ed.). Les métamorphoses du déchet. Publications de la Sorbonne, 2000.
- [11] HOUOT, S. et ROSE, J. Déchets (agricoles, urbains, industriels). Prospective SIC, 2002.
- [12] FRANÇOIS, Véronique. Détermination d'indicateurs d'accélération et de stabilisation de déchets ménagers enfouis : Etude de l'impact de la recirculation de lixiviats sur colonnes de déchets. Thèse de doctorat. Limoges, 2004.
- [13] GARCIA, A. J., ESTEBAN, M. B., MARQUEZ, M. C., et al. Biodegradable municipal solid waste: Characterization and potential use as animal feedstuffs. Waste Management, vol. 25, no 8, p. 780-787, 2005.

- [14] KPLE, Melhyas. Étude des voies de valorisation des déchets ménagers au Bénin : cas de la ville d'Abomey-Calavi. Thèse de doctorat. Université d'abomey-calavi & Université de Lorraine, 2015.
- [15]ADEME. Déchets Municipaux : des chiffres clés. 2ème éditions : 12 pages, 2000.
- [16] MATEJKA, Guy, BOUVET, Yvette, EMMANUEL, Evens, et al. Gestion maîtrisée des déchets solides urbains et de l'assainissement dans les pays en voie de développement : Les besoins en études scientifiques et techniques spécifiques, et en outils méthodologiques adaptés. In : Colloque du développement durable à Ouagadougou, Brukina Faso. 2004.
- [17] CHALOT, F. De l'amont vers l'aval : l'émergence d'une filière de gestion des déchets adaptée aux villes africaines. Synthèse et analyse des actions relatives aux déchets in «Gestion durable des déchets et de l'assainissement urbain», Ministère des Affaires Etrangères, Paris, France, 2004.
- [18] AINA, Martin Pépin. Expertises des centres d'enfouissement des déchets urbains dans les PED : contributions à l'élaboration d'un guide méthodologique et à sa validation expérimentale sur sites. Thèse de doctorat. Limoges, 2006.
- [19] MEZOUARI-SANDJAKDINE, Fadila. Conception et exploitation des centres de stockage des déchets en Algérie et limitation des impacts environnementaux. Thèse de doctorat. Limoges, 2011.
- [20] Agence nationale des déchets. Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans les zones nord, semi-aride et aride d'Algérie. Rapport, 24p, 2016.
- [21] DJEMACI, Brahim. La gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse prospective et éléments d'efficacité. Thèse de doctorat. Rouen, 2012.
- [22] MATE. Atelier international sur le nouveau mode de gestion des déchets municipaux : Le Centre d'Enfouissement Technique (CET), 2004.
- [22] MATE. Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement en Algérie, 2003.
- [24] O.M.S. Health and environnement in sustainable development, 1997.
- [25] KEBIR, Tahar. Etude de Contamination, d'Accumulation et de Mobilité de Quelques Métaux Lourds dans des Légumes, des Fruits et des sols Agricoles Situés près d'une Décharge

Industrielle de l'usine Alzinc de la ville de Ghazaouet . Thèse de doctorat. Tlemcen, ALGERIA, 2012.

[26] ADEME « La composition des ordures ménagères et assimilées en France - Campagne nationale de caractérisation ».2007.

[27] NAKAMURA, Kazuo, KINOSHITA, Sayuri, et TAKATSUKI, Hiroshi. The origin and behavior of lead, cadmium and antimony in MSW incinerator. Waste Management, vol. 16, no 5-6, p. 509-517, 1996.

[28] BIOCCHI, S. Les polluants et les techniques d'épuration des fumées. Tec & Doc, Lavoisier, 1998.

[29] THONART, Philippe, STEYER, Emmanuel, DRION, Raphael, et al. La gestion biologique d'une décharge. Tribune de l'eau, vol. 590, p. 3-12, 1998.

[30] CHEN, Yen-Cho, CHEN, Kang-Shin, et WU, Chung-Hsing. Numerical simulation of gas flow around a passive vent in a sanitary landfill. Journal of Hazardous Materials, vol. 100, no 1-3, p. 39-52, 2003.

[31] MEZOUARI-SANDJAKDINE, Fadila. Conception et exploitation des centres de stockage des déchets en Algérie et limitation des impacts environnementaux. Thèse de doctorat. Limoges , 2011.

[32] KEHILA, Y. Rapport sur la gestion des déchets solides en Algérie. sweep net, 2014.

[33] PHILIPPE, Thonart, IBRAHIM, Diabaté Sory, SERGE, Hiligsmann, et al. Guide pratique sur la gestion des déchets ménagers et les sites d'enfouissement techniques dans les pays du Sud. Collection points de repères. 2005.

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

[35] AMOKRANE, Ahcene. Epuration des lixiviats de décharge : prétraitement par coagulation-floculation, traitement par osmose inverse, post-traitement par incinération. Thèse de doctorat. Lyon, INSA, 1994.

[36] NAVARRO, A., BERNARD, D., et MILLOT, N. Les problèmes de pollution par les lixiviats de décharges. TSM L'EAU, vol. 11, p. 541-546, , 1988.

- [37] ADEME. Remise en état des décharges : Méthodes et Techniques, Angers. ADEME éditions, Connaître pour agir, 37-38p, 2005.
- [38] MILLOT, Norbert. Les lixiviats de décharge contrôlée :-caractérisation analytique :-étude des filières de traitement. Thèse de doctorat. Lyon, INSA, 1986.
- [39] AINA, Martin Pépin. Expertises des centres d'enfouissement des déchets urbains dans les PED: contributions à l'élaboration d'un guide méthodologique et à sa validation expérimentale sur sites. Thèse de doctorat. Limoges, 2006.
- [40] REINHART, Debra R. et TOWNSEND, Timothy G. Landfill bioreactor design & operation. CRC press, 1997.
- [41] MERES, Matgorzata. Analyse de la composition du biogaz en vue de l'optimisation de sa production et de son exploitation dans des centres de stockage des déchets ménagers. Thèse de doctorat. Jagiellone de Cracovie, Pologne, 2009.
- [42] ADEME, Gérer le gaz de décharge. Techniques et recommandations, Guides et cahiers techniques, ADEME, Angers, 148 p, 2001.
- [43] HAKIZIMANA, Gabriel. L'enfouissement des déchets et la santé de la population. Revue de la littérature : rapport-Québec : Direction de la santé publique et d'évaluation de Lanaudière, 2005.
- [44] BUREAU VERITAS. Sénégal-Ministère du Tourisme et de la Protection de la Nature, Direction de l'Environnement. Etude des impacts de la décharge de Mbeubeuss sur l'environnement – Plan d'assainissement et de gestion écologique du site. Rapport du département de l'environnement du bureau VERITAS de Dakar. 146p, 1990.
- [45] MBODJI, Malick. Impact de la décharge de Mbeubeuss sur la santé et la productivité des élevages avicoles riverains dans la commune d'arrondissement de Malika. Thèse de doctorat. Dakar, 2008.
- [46] KEHILA, Y., AINA, M., MEZOUARI, F., et al. Quelles perspectives pour l'enfouissement technique et le stockage éco-compatible des résidus solides dans les PED vis-à-vis des impacts sur l'hydrosphère urbaine. Acte des JSIRAUF, Hanoi, p. 6-9, 2007.
- [47] FOO, K. Y., HAMEED, B. H. An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process. Journal of hazardous materials, vol. 171, no 1-3, p. 54-60, 2009.

- [48] BERTHE, Céline. Etude de la Matière Organique contenue dans des lixiviats issus de différentes filières de traitement des déchets ménagers et assimilés. France : Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2006.
- [49] EL-FADEL, M. et MASSOUD, M. Emissions from landfills: A methodology comparative assessment. *Environmental technology*, vol. 21, no 9, p. 965-978, 2000.
- [50] WILLIAMS, Paul T. *Waste treatment and disposal*. John Wiley & Sons, 2005.
- [51] CHRISTENSEN, T.H., COSSU, R., STEGMAN, R., *Landfilling of waste: biogas*, E&FN SPON, London, 840 p, 1996.
- [52] GOLDBERG, Mark S., AL-HOMSI, Nohal, GOULET, Lise, et al. Incidence of cancer among persons living near a municipal solid waste landfill site in Montreal, Quebec. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, vol. 50, no 6, p. 416-424, (1995a).
- [53] GOLDBERG, Mark S., GOULET, L. I. S. E., RIBERDY, Helene, et al. Low birth weight and preterm births among infants born to women living near a municipal solid waste landfill site in Montreal, Quebec. *Environmental research*, vol. 69, no 1, p. 37-50, (1995b).
- [54] BACHAND, N. Les risques sanitaires et socio-économiques du lieu d'enfouissement sanitaire de La chénaie. Mémoire présenté par le comité de citoyens de presqu'île. Canada, 2003.
- [55] BARENDS, Frans BJ. *Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure: Theory and Practice, Planning and Design, Construction and Maintenance: Proceedings of the Twelfth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Amsterdam, Netherlands, 7-10 June 1999. CRC Press, 1999.
- [56] SING-TENIÈRE, Christelle. Etude des procédés de stabilisation/solidification (des déchets solides poreux) à base de liants hydrauliques ou de liants bitumineux. Thèse de doctorat. Lyon, INSA, 1998.
- [57] SPENCE, Roger D. *Chemistry and microstructure of solidified waste forms*. Crc Press, 1992.
- [58] GWÉNAËLLE, Bröns-Laot. Evaluation environnementale de la valorisation de mâchefer s d'incinération d'ordures ménagères en remplissage de carrière. Thèse de doctorat. INSA de Lyon, 2002.

- [59] Agence Française de Normalisation Liants Hydrauliques - Définitions, classification et spécifications des ciments. N°NF P15-301. 11-15-301p. 1981.
- [60] DREUX, Georges. Composition des bétons. Techniques de l'ingénieur C, vol. 2, p. 220, 1982.
- [61] CAUCHETEUX, Antoine. Evolution au cours de la lixiviation des propriétés physico-chimiques d'un REFIOM humide stabilisé aux liants hydrauliques. Thèse de doctorat. PhD thesis, The National School of mines of Saint-Etienne and National polytechnic institute of Grenoble, France, 2002.
- [62] Arrêtés du 18 février 1994. Journal officiel de la République Française, NOR : ENVP9430072A et 3A. 6117-24p. (26 avril 1994).
- [63] BEAUDOIN, James Joseph, RAMACHANDRAN, Vangipuram Seshachar, et FELDMAN, Raouf F. Interaction of chloride and C-S- H. cement and concrete research, vol. 20, no 6, p. 875-883, 1990.
- [64] ZHAO, B., DAUGHERTY, K. E., ZHANG, L., et al. Portland cement doped with lead compounds. In : Proc. Cement Industry Solutions to Waste Management. Canadian Portland Cement Association Calgary. p. 359-372, 1992.
- [65] THOMAS, N. L., JAMESON, Donald A., et DOUBLE, D. D. The effect of lead nitrate on the early hydration of Portland cement. Cement and Concrete Research, vol. 11, no 1, p. 143-153, 1981.
- [66] BHATTY, Muhammad SY. Fixation of metallic ions in Portland cement. Proc 4th National Conf. Hazardous Wastes and Hazardous Materials, Washington D.C., 140-145p. Superfund 1987, 1987.
- [67] COCKE, David L. et MOLLAH, M. Yousuf A. The chemistry and leaching mechanisms of hazardous substances in cementitious solidification/stabilization systems. Environmental Chemistry Laboratory, Lamar University, 1999.
- [68] POON, C. S., CLARK, A. I., PERRY, R., et al. Permeability study on the cement based solidification process for the disposal of hazardous wastes. Cement and concrete research, vol. 16, no 2, p. 161-172, 1986.

- [69] HEKAL E.E., HEGAZI W.S., KISHAR E.A., MOHAMED M.R. Solidification/stabilization of Ni (II) by various cement pastes. *Construction and Building Materials* 25:109-114, 2011.
- [70] Institut de France Académie des Sciences (IFAS). Contamination des sols par les éléments en trace : les risques et leur gestion, rapport de l'Académie des Sciences N°42. (Août 1998).
- [71] AFNOR Norme française(2000-1).Essai de lixiviation d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification, X31-211, Avril 2000.
- [72] AFNOR Norme française (2000-2).Essai de lixiviation d'un déchet solide massif granulaire », XP X 30-410, Avril 2000.
- [73] NF P 98-230-2. Essais relatifs aux chaussées–Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités–Partie 2: Fabrication des éprouvettes de sables ou de sols fins par compression statique. 1993.
- [74] EN 12457 1-4. Lixiviation – Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues, CEN Norme européenne. Mai 2002.
- [75] IMYIM, Apichat, MOSZKOWICZ, Pierre, TIRUTA-BARNA, Ligia, et al. Mise au point d'une boîte à outils de tests de lixiviation pour l'évaluation du flux de polluants émis d'un déchet solide. *Déchets, sciences et techniques*, vol. 18, p. 15-23, 2000.
- [76] POON, C. S., CLARK, A. I., PERRY, R., et al. Permeability study on the cement based solidification process for the disposal of hazardous wastes. *Cement and concrete research*, vol. 16, no 2, p. 161-172, 1986.
- [77] CARTLEDGE, Frank K., BUTLER, Leslie G., CHALASANI, Devi, et al. Immobilization mechanisms in solidification/stabilization of cadmium and lead salts using portland cement fixing agents. *Environmental science & technology*, vol. 24, no 6, p. 867-873, 1990.
- [78] BONEN, David et SARKAR, Shondeep L. The effects of simulated environmental attack on immobilization of heavy metals doped in cement-based materials. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 40, no 3, p. 321-335, 1995.
- [79] WANG, S. Y. et VIPULANANDAN, C. Leachability of lead from solidified cement-fly ash binders. *Cement and concrete research*, vol. 26, no 6, p. 895-905, 1996.

- [80] PARK, Choon-Keun. Hydration and solidification of hazardous wastes containing heavy metals using modified cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no 3, p. 429-435, 2000.
- [81] PALOMO, A. et PALACIOS, M. Alkali-activated cementitious materials: alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes: Part II. Stabilisation of chromium and lead. *Cement and concrete research*, vol. 33, no 2, p. 289-295, 2003.
- [82] GIERGICZNY, Zbigniew et KRÓL, Anna. Immobilization of heavy metals (Pb, Cu, Cr, Zn, Cd, Mn) in the mineral additions containing concrete composites. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 160, no 2-3, p. 247-255, 2008.
- [83] LIN, Cheng, ZHU, Wei, et HAN, Jie. Strength and leachability of solidified sewage sludge with different additives. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, no 11, p. 1594-1601, 2013.
- [84] BHAGAWAN, D., SARITHA, P., HIMABINDU, V., et al. Treatment of Hazardous Solid Waste Using Solidification and Stabilization Technique. *American Journal of Environmental Protection*, vol. 6, no 4, p. 94, 2017.
- [85] AL-KINDI, Ghayda Yaseen. Evaluation the solidification/stabilization of heavy metals by Portland cement. *Journal of Ecological Engineering*, vol. 20, no 3, 2019.
- [86] HUNCE, Selda Yigit, AKGUL, Deniz, DEMIR, Goksel, et al. Solidification/stabilization of landfill leachate concentrate using different aggregate materials. *Waste management*, vol. 32, no 7, p. 1394-1400, 2012.
- [87] KALLEL, Amjad, ELLOUZE, Mohamed, et TRABELSI, Ismail. Co-management of landfill leachate concentrate with brick waste by solidification/stabilization treatment. *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 10, no 4, p. 81, 2017.

CHAPITRE II.

METHODOLOGIE GENERALE

CHAPITRE II.

METHODOLOGIE GENERALE

L'évaluation du procédé de stabilisation/solidification des déchets nécessite de caractériser le déchet considéré avant et après l'application du traitement.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les méthodes d'analyses et les protocoles expérimentaux utilisés pour caractériser les déchets (Boue et lixiviat) du centre d'enfouissement technique de SIDI-BOUDERHAM- Bejaia ainsi que l'essai du traitement de ces déchets par le procédé de stabilisation/solidification à base de liant hydraulique.

Pour cela, nous exposerons initialement la méthode d'échantillonnage de la boue et du lixiviat du CET. Ensuite, nous présenterons les matériaux d'études et les formulations des déchets stabilisés /solidifiés confectionnés. Enfin nous exposerons les différentes techniques d'analyse pour la caractérisation des échantillons avant et après modification.

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Technologie des Matériaux et de Génie des Procédés (LTMGP)-université de Bejaia.

II.1. METHODES D'ECHANTILLONNAGE AU NIVEAU DU CET

Notre échantillonnage a été effectué au niveau du Centre d'Enfouissement Technique de Bejaia, situé à cheval entre les communes de Bejaia et d'Oued Ghir, C'est un CET de classe II, la présentation générale de la zone d'étude figure en (Annexe A).

L'échantillonnage est une étape importante pour tirer des informations sur la toxicité et la composition de chacun des échantillons.

. A chaque fois on prélève deux type d'échantillons, liquide (lixiviat) et solide (boue).

Deux campagnes de prélèvements ont été effectuées au niveau du CET de SIDI-BOUDERHAM- Bejaia :

- 1ère campagne (I), 18 Avril 2016
- 2e campagne (II), 27 Mars 2018.

Pour une meilleure représentativité des échantillons, ces derniers ont été collectés en plusieurs points, au niveau du premier bassin (Figure II.1). Ce bassin a été sélectionné pour permettre de travailler sur des lixiviat non dilués.

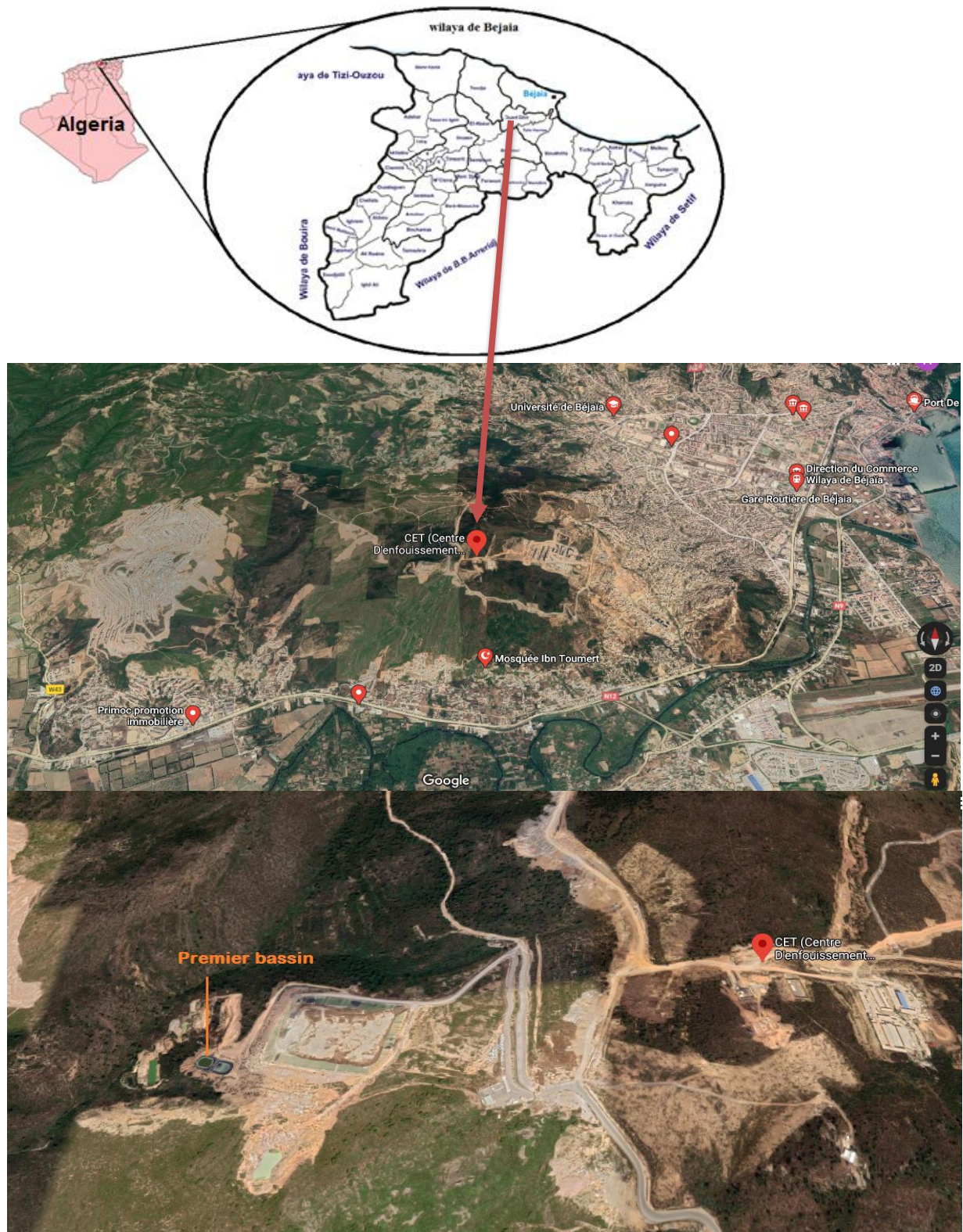


Figure II.1. Vue satellitaire par Google Maps de la zone d'étude.

II.1.1. Prélèvement du lixiviat

Les lixiviats ont été prélevés au moyen d'une canne de 3m de longueur équipée d'un béccher en polyéthylène puis ils sont conservés dans des bouteilles en PE préalablement nettoyées par l'acide nitrique (HNO_3) puis rincés à l'eau distillée et séchée. Cette méthode nous a permis de prélever l'échantillon sous la surface de l'eau à une profondeur d'environ 30-50 Cm sans atteindre le fond du bassin (sans prélèvement de solides). Nous avons effectué un prélèvement de quatre répliques de 1.5 L, soit un réplique à chaque coin du bassin de rétention des lixiviats (figure II.1). Une fois prélevés, les lixiviats sont mis dans une glacière gardant la température à 4°C pendant le transport au laboratoire, puis ils sont placés dans un réfrigérateur à 4°C.

Les échantillons destinés à la détermination des concentrations en métaux sont acidifiés à l'aide de HNO_3 jusqu'à pH égal ou inférieur à 2.

II.1.2. Prélèvement de boue

Les boues ont été prélevées au niveau des mêmes points d'échantillonnage des lixiviats (les 4 coins du bassin) afin d'obtenir un échantillon homogène. L'échantillonnage a été réalisé à l'aide d'une canne équipée d'un récipient en bronze, la quantité de la boue prélevée est environ de 5000 g, les échantillons sont conservés dans des sacs en plastique et transportés dans une glacière au laboratoire, les boues sont séchées à l'aide d'une étuve à 105°C pendant 24h jusqu'à élimination total de l'humidité. Une fois séchés, les échantillons sont broyés et tamisés à travers un tamis de 0,16 mm.

II.2. FORMULATION ET ELABORATION DES MONOLITHES

L'objectif du traitement au ciment est d'obtenir des meilleures caractéristiques physico mécaniques et un taux d'immobilisation des polluants élevé. Le procédé de stabilisation et solidification se fait grâce à hydratation des constituants du ciment, Nous nous attacherons à créer des matrices solides présentant une faible perméabilité et de bonnes propriétés mécaniques.

II.2.1. Différents constituants

Le ciment que nous avons utilisé pour toutes les formulations est un ciment Portland ordinaire (CEM I) de la cimenterie d'Ain El KEBIRA- Algérie, CEM I est le liant le plus utilisé du fait de son prix réduit et de sa disponibilité et de ces qualités [1],

La boue et le lixiviat du CET SIDI-BOUDERHAM- Bejaia sont les déchets à traités, la poussière du four à ciment (CKD) provenant de la cimenterie de HAMMAM DALAA-Msila, le sable utilisé est un sable normalisé conforme à la norme NF EN 196-1[2], conditionné

en sac plastique en dose de 1350 ± 5 g. La fraction 1.60 mm du sable a été substituée par une autre fraction préparée à partir de brique, et le kaolin a été fourni par SOALKA-Jijel sous forme de poudre, il a été calciné à 600°C pendant 5 heures pour obtenir du méta kaolin (MK).

Les caractéristiques chimiques du ciment, du CKD et du métakaolin sont présentées dans le tableau II.1 et les données de la granulométrie du sable normalisé sont illustrées dans le tableau II.2.

Tableau II.1. Caractéristiques chimiques du ciment portland CEM I, CKD et MK.

	Elément (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
CEM I	23,35	6,01	6,77	59,4	1,89	1,76	0,43	0,12
CKD	11,81	4,05	2,28	43,48	1,13	0,74	0,50	00
MK	48	36,5	1,01	0,07	0,3	0,32	2	0,1

Tableau II.2. Données de granulométrie du sable normalisé.

Ouverture du tamis (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Refus cumulés	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

II.2.2. Mise en œuvre

Les mélanges sont effectués conformément à la norme NF EN 196-1[2]. Le rapport E/C (Eau / Ciment) utilisé est de 0.5 pour les formulations de la boue traitée, ce rapport favorise le relargage des éléments chimiques [3,4], et pour les formulations du lixiviat le rapport E/S de 0.32. Ce dernier rapport a été choisi afin d'obtenir une hydratation suffisante pour une bonne homogénéité et une capacité d'écoulement satisfaisante. Des rapports E/C plus élevés n'ont pas été utilisés dans cette étude, car une teneur en eau plus élevée peut réduire la résistance mécanique des matériaux confectionnés [5].

Les formulations des boues du premier prélèvement (Echantillons 1) ont été réalisées à l'aide du ciment et de sable normalisé, et les formulations du lixiviat (Echantillons 1) ont été confectionnés par la substitution partielle du ciment portland par le CKD.

Concernant les matériaux confectionnés à partir de déchets (Boue et lixiviat) du deuxième prélèvement (Echantillons 2), un taux de 20% de métakaolin est substitué au ciment, la résistance mécanique est optimale pour ce taux de substitution de ciment [6-7]. Pour les formulations des boues traitées, le métakaolin a été substitué par la boue du CET avec différents pourcentages, et pour les formulations du lixiviat, ce dernier a été utilisé comme eau de gâchage.

Nous avons ajouté un activant qui est le sulfate de sodium (NS) avec un dosage de 4% du poids de liant [8], et cela pour connaître l'effet de l'ajout de Na_2SO_4 sur les résistances

mécaniques et la rétention des polluants. Les tableaux II.3 et II.4 montrent les différentes formulations réalisées.

Les constituants secs sont introduits dans un malaxeur de 3 kg de type (contrôles 65-L0005), l'ensemble est malaxé à sec pendant 10 min afin d'obtenir un mélange homogène. Le sulfate de sodium (NS) a été ajouté dans la phase anhydre, SAIDAT(2013) [8] constate qu'il est préférable d'ajouter l'activant directement dans le solide car l'utilisation de la solution activée préparée d'après la dissolution de l'activant dans l'eau a un effet néfaste sur la résistance. L'eau déminéralisée est enfin ajoutée, puis malaxés pendant 6 minutes environ. Les mélanges ont été placés dans des moules rectangulaires en acier (trois éprouvettes pour chaque matériau) de dimension 4cm × 4 cm × 16 cm, en deux fois, avec vibration sur une table à secousses entre chaque remplissage. Pour des raisons de simplification de la mise en œuvre, nous avons choisi de mettre des séparateurs en acier dans l'un des éprouvettes fabriqués pour obtenir des monolithes de dimension 4cm × 4cm × 4 cm plutôt que de tronçonner des blocs en vue d'un test de lixiviation sur monolithe (TLM). Afin de rendre nos résultats comparables, nous avons fabriqué des matrices de référence (sans ajouts de déchets). Les échantillons traités sont ensuite stockés dans une chambre où la température est de 23 ± 2 °C. Après 28 jours de cure, les éprouvettes confectionnées sont soumises à des analyses mécaniques et chimiques.

Tableau II.3. Constituants des Formulations des lixiviats traités (Echantillons 1 et 2).

Formulations de l'échantillon 1				
Dénomination	Ciment (g)	CKD (g)	Lixiviat (ml)	
F0P	1350	0	435 (eau distillée)	
F1P	1350	0	435	
F2P	1012.5	343,5	435	
F3P	675	675	435	
F4P	0	1350	435	
Formulations de l'échantillon 2				
Dénomination	Ciment (g)	MK (g)	NS(g)	Lixiviat (ml)
F5P	1080	270	54	435

Tableau II.4. Constituants des Formulations des boues traitées (Echantillons 1 et 2).

Formulations de l'échantillon 1					
Dénomination	Ciment (g)	Boue(g)	Sable avec Brique (g)	Eau (g)	
F0M	450	0	1350 (sans brique)	225	
F1M	450	0	1350	225	
F2M	405	45	1350	225	
F3M	360	90	1350	225	
F4M	315	135	1350	225	
Formulations de l'échantillon 2					
Dénomination	Ciment (g)	MK(g)	Boue (g)	NS(g)	Eau (ml)
F0P	1350	0	0	0	675
F6P	1080	243	27	54	675
F7P	1080	216	54	54	675
F8P	1080	189	81	54	675

II.3. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX ET TECHNIQUES D'ANALYSES

II.3.1. Analyse des échantillons liquides

II.3.1.1. pH et conductivité

Le pH des solutions a été mesuré sous agitation magnétique à l'aide d'un pH mètre (marque + « pH M210 Meterlab » de marque Tacussel/radiometer muni d'une électrode de verre combinée. L'étalonnage est effectué à l'aide de solutions tampons de pH 4 et 7 à 20°C. La précision sur la mesure donnée par le constructeur est de $\pm 0,1$ unité pH.)

La conductivité a été mesurée à l'aide d'un conductimètre de marque (WTW de modèle LF 538 et utilisant une cellule de mesure Tetracon 325.)

II.3.1.2. Analyse des métaux et cations majeurs par (ICP-MS)

L'analyse des métaux lourds permet de connaître le potentiel polluant que recèlent les déchets du CET. Les principaux métaux lourds étudiés sont : le nickel, le plomb, le cadmium,

le fer et le zinc, ces derniers étant les plus fréquemment retrouvés dans les déchets d'ordures ménagères.

La technique que nous avons utilisée est la spectrométrie à plasma à couplage inductif (ICP). Le principe de l'ICP-MS est l'ionisation de l'échantillon dans un plasma créé par induction. Les ions créés sont aspirés par un vide primaire puis accélérés. Après le passage d'un vide secondaire, le faisceau d'ions est dévié par un champ électrique E variable.

La déviation est inversement proportionnelle à la vitesse des ions, à leur masse et à leur charge. Pour des valeurs de E connues, un seul et unique ion vient frapper le collecteur et sera comptabilisé [3].

Le dosage des éléments majeurs et mineurs contenus dans des échantillons solides (Boues) est possible après leur mise en solution.

Les échantillons sont préalablement acidifiés à un pH 2 à l'aide de l'acide nitrique (HNO_3). Les concentrations en métaux et cations majeurs (Na^+ , K^+ et Ca^{2+}) sont ensuite mesurées à l'aide d'un spectrophotomètre à couplage inductif au plasma couplé à un spectromètre de masse (ICP-MS) de la marque (Elan 6000, Perkin-Elmer).

II.3.1.3. Analyse des anions

Les phosphates (PO_4^{3-}) et les sulfates (SO_4^{2-}) ont été dosés par spectrométrie UV-visible à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible de marque (Biotech Engineering Management co.ltd. (uk)).

➤ Dosage des sulfates

Le dosage des sulfates est basée sur la réaction en milieu acide, entre l'ion sulfate et le chlorures de baryum, qui conduit quantitativement à la formation de sulfate de baryum (sel très peu soluble) :

L'essai consiste à :

- Pélever 10 ml de l'échantillon ;
- Ajouter 0.2 ml d'acide chlorhydrique au 1/10 molaire ;
- Ajouter 1 ml de la solution de chlorure de baryum + tween 20 ;

Puis on verse la suspension dans la cellule de mesure. La lecture s'effectue à l'aide d'un appareil de mesure (la spectrophotométrie UV) avec une longueur d'onde 560 nm [9].

➤ Dosage des phosphates

L'essai consiste à introduire 40 ml d'eau à analyser dans une fiole jaugée de 50 ml ajouté 4 ml de solution de l'acide molybdate, puis on ajoute 10 gouttes de la solution de chlorure stanneux. Ajuster jusqu'au trait de jauge avec l'eau distillée, bien mélanger. Laisser 5 minutes puis effectuer les lectures au spectromètre à la longueur d'onde de 690 nm [10].

II.3.1.4. Dosage des chlorures : Méthode de Mohr [11]

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 de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent.

L'essai consiste à introduire 100 ml de la solution à analyser dans une fiole jaugée de 250 ml puis ajouter 1 ml d'indicateur coloré (K_2Cr_4 à 10%).

L'ensemble du mélange est ensuite titré par la solution nitrate d'argent ($AgNO_3$ de 0,1N) jusqu'à apparition d'une teinte rougeâtre, qui doit persister 1 à 3 minutes. La concentration de chlorures est ensuite calculée par la formule suivante :

➤ **Expression des résultats**

$$[Cl^-] = (V)_{AgNO_3} \times 3.55 \times 10 \dots \dots \dots \text{Eq. II. 1}$$

Avec :

- $[Cl^-]$: concentration de chlore en (mg/l).
- V_{AgNO_3} : Volume de nitrate d'argent ($AgNO_3$) en ml.

II.3.2. Analyse des échantillons Solides

II.3.2.1. Matière sèche

La méthode consiste à placer durant au moins 30 min une capsule d'évaporation ou un creuset vide dans l'étuve de séchage réglée à $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3$. Après refroidissement à la température ambiante dans le dessiccateur, puis on pèse l'échantillon pour avoir la masse m_a .

En fonction de la teneur en eau présumée, on pèse dans la capsule d'évaporation ou le creuset une quantité appropriée (m_b) de boues, de telle sorte que la matière sèche obtenue ait une masse au moins égale à 0,5 g. Puis on la capsule d'évaporation ou le creuset contenant l'échantillon dans l'étuve de séchage réglée à $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3$ jusqu'à ce que le résidu apparaisse sec, généralement 12h. Après refroidissement dans le dessiccateur, on pèse une première fois la capsule d'évaporation ou le creuset et son contenu, (m_c) [12].

La teneur en matière sèche (W_{dr}) a été exprimée en pourcentage massique selon la formule suivante :

$$W_{dr} \% = [(m_c - m_a) / (m_b - m_a)] * 100 \dots \dots \dots \text{Eq. II. 2}$$

Avec :

- W_{dr} : est la teneur en matière sèche de l'échantillon de boues, en pour cent ;
- m_a : est la masse de la capsule d'évaporation ou du creuset vide, en grammes ;

- m_b : est la masse de la capsule d'évaporation ou du creuset contenant l'échantillon de boues, en grammes ;
- m_c : est la masse de la capsule d'évaporation ou du creuset contenant la matière sèche de l'échantillon de boues, en grammes.

II.3.2.2. Teneur en matière organique [13]

➤ Principe

Le taux de matière organique est déterminé après calcination de l'échantillon au four pendant 6 heures à 600 °C, l'augmentation de température se fait par paliers thermiques, pour éviter la perte de l'échantillon par projection suite à sa brusque combustion.

➤ Mode opératoire

- On prélève 2 g de la boue humide et on le place dans un creuset, on porte le creuset à l'étuve à 105° C pendant 24h. On retire le creuset et on le laisse refroidir dans un dessiccateur puis on le pèse.

- On porte le creuset au four à 600° C pendant 6h, on retire le creuset et on le laisse refroidir dans un dessiccateur puis on le pèse à nouveau.

➤ Expression des résultats

La MO est exprimée en pourcentage (%) massique et elle est égal à :

$$MO(\%) = 100 \times (P_s - P_c) / P_s \dots \dots \dots \text{Eq. II. 3}$$

Où :

- P_s : Poids de l'échantillon sec
- P_c : Poids de l'échantillon après calcination

II.3.2.3. Mise en solution par TCLP test

L'essai de lixiviation a été réalisé selon le test américain TCLP (Procédure de lixiviation des caractéristiques de toxicité) défini par U.S.-EPA [14].

Ce test vise à caractériser le comportement du déchet en cours du temps, nous mettons en contact le déchet avec solution de lixiviation de volume fixe. La solution de lixiviation a été préparée comme suite : dans une fiole de 1000 ml on verse 5.7 ml d'acide acétique puis on dissout 2.572 g de NaOH dans l'acide acétique, et on complète avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Le pH de cette solution est égal à 4.93 ± 0.05 .

L'essai de lixiviation consiste à mettre en contact, sous agitation pendant 18 heures, l'échantillon à tester (10 g) avec 200 ml de la solution de lixiviation. La solution a été séparée de la fraction solide résiduelle par filtration en utilisant un filtre de porosité de 0,45 µm. Les lixiviats obtenus serviront ensuite pour les analyses chimiques.

II.3.2.4. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX) [15]

La Diffraction de Rayons X (DRX) sur poudre est une technique classiquement mise en œuvre en laboratoire pour caractériser et identifier les cristaux, Cette méthode d'analyse est basée sur la diffraction des rayons X par la matière cristalline. Elle identifie la nature et la structure des produits cristallisés.

Tout matériau irradié par un faisceau de photons X émet, selon le processus de diffusion, un faisceau de longueur d'onde égale à celle du faisceau incident (figure II.2). Si les atomes sont ordonnés selon un réseau périodique. Les ondes diffusées interfèrent de manière constructive pour donner lieu à des ondes diffractées dans des directions particulières. La condition de diffraction est donnée par la loi de Bragg (équation II.4) :

$$n\lambda = 2d_{(hkl)}\sin\theta \dots\dots\dots \text{Eq. II. 4}$$

Avec :

- λ : Longueur d'onde des rayons X ;
- n : L'ordre de la diffraction ;
- $d_{(hkl)}$: distance inter-réticulaire (distance entre deux plans successifs D'atomes) ;
- θ : angle d'incidence des rayons X.

Le diffractomètre utilisé est un X'Pert Pro PANalytical (université de Bejaia) dont les conditions de mesures sont les suivantes : $2^\circ < 2\theta < 100^\circ$ et un pas de $0,01^\circ$. Le traitement des diffractogrammes ont été réalisés avec le logiciel de support X'Pert High Score Plus.

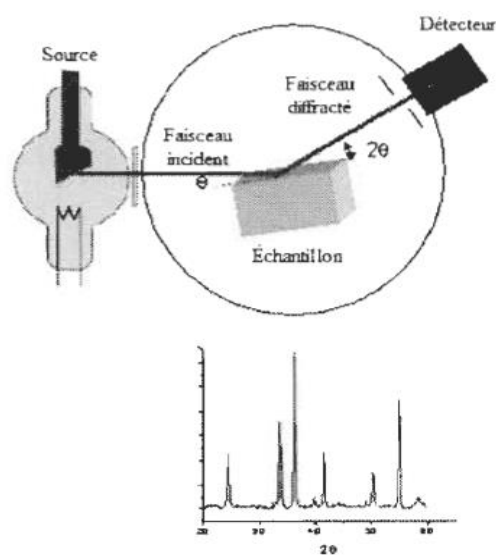


Figure II.2. Schéma de montage d'un diffractomètre à rayons X pour une géométrie θ - 2θ [16].

II.3.2.5. Analyse par Infra-Rouge à Transformée de Fourier (IRTF) [17]

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (ou FTIR : Fourier Transformed InfraRed Spectroscopy) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau. Les radiations infrarouges de fréquences (nombres d'ondes) comprises entre 4000 et 400 cm^{-1} sont absorbées par une molécule en tant qu'énergie de vibration moléculaire.

La radiation de la source est divisée en deux faisceaux par un séparateur de faisceaux (Figure II.3). Un des faisceaux parcourt un chemin optique fixe, l'autre un chemin optique de longueur variable à cause d'un miroir mobile, avant d'être recombinaisonnés, pour traverser l'échantillon et frapper le détecteur. Quand la différence de chemin optique entre les faisceaux correspond à un multiple entier de la longueur d'onde d'une bande, on obtient une interférence constructive. Une interférence négative est obtenue lorsque la différence correspond à un multiple entier impair du quart de la longueur d'onde.

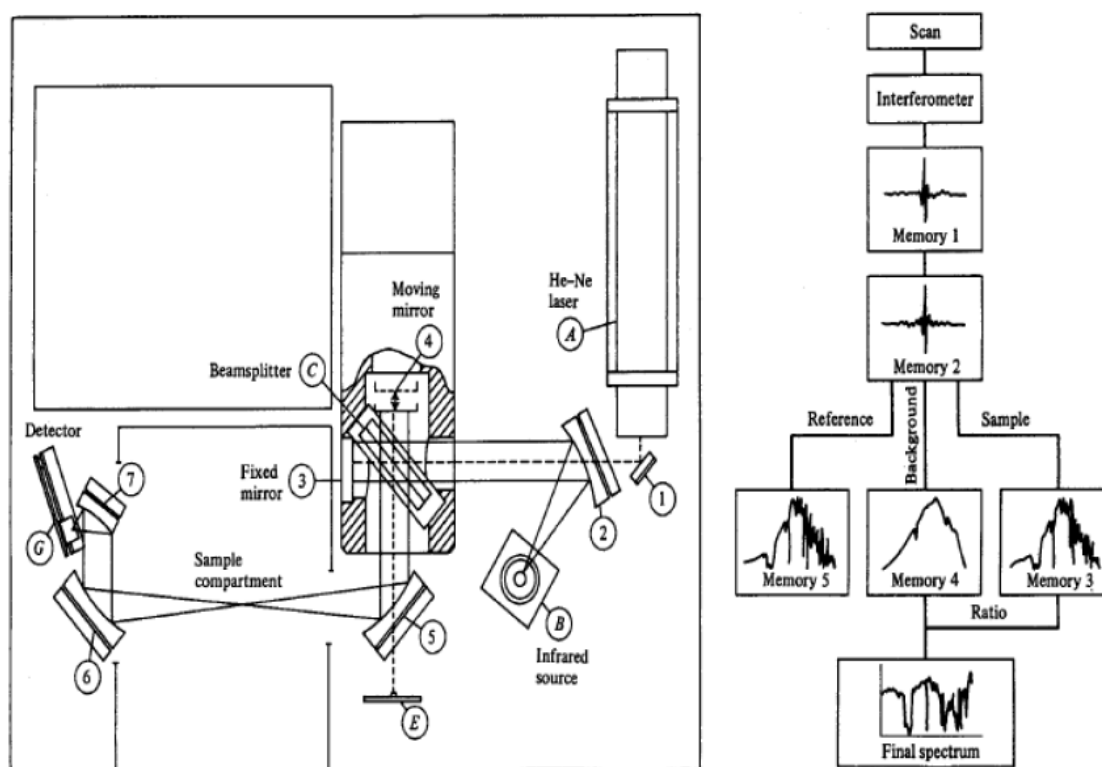


Figure II.3. Appareillage d'un spectromètre Infrarouge de Fourier.

L'ensemble des interférences positives et négatives produit un interférogramme comme l'indique la Figure II.4 (Signature de l'intensité en fonction de la position du miroir).

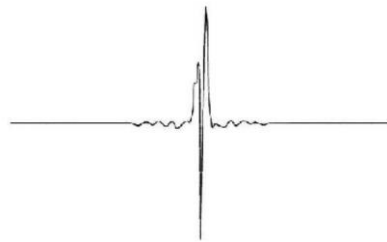


Figure II.4. Interferogramme a la sortie du détecteur.

La technique de spectroscopie infra-rouge est utilisée sur des échantillons poudre en mélange avec le bromure de potassium (KBr) avec un ratio de (2: 200, échantillon/KBr). Le mélange est ensuite pressé sous forme de pastilles. Les analyses ont été réalisées à l'aide d'un spectromètre FTIR SHIMADZU Affinité-1.

II.3.2.6. Microanalyse X couplée au microscope électronique à balayage (MEB-EDX)

[18]

La Microscopie Electronique à Balayage MEB (ou Scanning Electron Microscopy SEM) est une technique d'observation de la topographie des surfaces. Elle apporte des informations sur la structure et la texture d'un échantillon mais aussi sur la taille et la forme des grains élémentaires ou agglomérats selon le grossissement choisi.

Elle est fondée sur la détection des électrons secondaires émergents de la surface sous l'impact d'un faisceau très fin d'électrons primaires monocinétique qui balaye la surface d'un échantillon où se produisent des interactions électrons-matière dans une zone appelée poire d'interaction détectées par un capteur qui contrôle la brillance d'un oscilloscope cathodique dont le balayage est synchronisé avec celui du faisceau d'électrons. On distingue plusieurs types d'électrons réémis :

- Les électrons secondaires : sont des électrons initialement liés à l'atome et éjectés par absorption d'une partie de l'énergie d'un électron incident. Ces électrons servent en imagerie, pour donner des informations topographiques de la surface de l'échantillon d'une profondeur moins de 10 nm. Ce mode d'électrons permet d'obtenir des images rendant compte du relief de la surface et de renseigner sur la taille des grains et des agglomérats. C'est aussi une très bonne technique pour repérer les défauts présents tels que les porosités ou les fissures même si l'information acquise ne rend pas compte de l'étendue volumique des défauts sous la surface étudiée.

- Les électrons rétrodiffusés : sont des électrons produits par l'interaction entre les électrons primaires et les noyaux des atomes. Ils ont une énergie élevée et sont réémis dans une zone pouvant atteindre le micromètre de profondeur. Ce mode d'électrons permet d'obtenir des images en « contraste chimique ». Les éléments les plus lourds apparaissent plus clairs et les plus légers, plus sombres. Cela permet de repérer la répartition des différentes phases dans les matériaux composites mais on perd l'information sur le relief de la surface. Sauf indication contraire, les micrographes présentés dans ce rapport sont des clichés obtenus en mode électrons rétrodiffusés.
- Les photons X : émis par désexcitation du cortège électronique des atomes dont un électron de cœur a été attaché sous l'impact électronique. Ce type de rayonnement X, donne des informations chimiques qualitatives et quantitatives de l'atome cible (analyse EDS : Energy Dispersive Spectroscopy).

Donc L'analyse par EDS permet de déterminer la composition et la distribution des éléments chimiques dans l'échantillon analysé. Selon le mode choisi, il est possible d'effectuer une analyse élémentaire en un point précis (sur un volume de $1 \mu\text{m}^3$ environ) ou en moyenne sur une surface, de constituer un profil de concentrations sur une distance donnée ou de réaliser la cartographie élémentaire d'une surface.

Toutefois, l'analyse quantitative en EDS n'est fiable que pour les éléments lourds, typiquement à partir du sodium Na, et elle peut manquer de fiabilité pour les éléments plus légers (limite de détection au niveau du bore B).

La Figure II.5 illustre le schéma du principe d'un MEB équipé d'un détecteur EDS : une sonde électronique fine (faisceau d'électrons) est projetée sur l'échantillon à analyser. L'interaction entre la sonde électronique et l'échantillon génère des électrons secondaires, de basse énergie qui sont accélérés vers un détecteur d'électrons secondaires qui amplifie le signal. À chaque point d'impact correspond un signal électrique. L'intensité de ce signal électrique dépend à la fois de la nature de l'échantillon au point d'impact qui détermine le rendement en électrons secondaires et de la topographie de l'échantillon au point considéré. Il est ainsi possible, en balayant le faisceau sur l'échantillon, d'obtenir une image de la zone balayée.

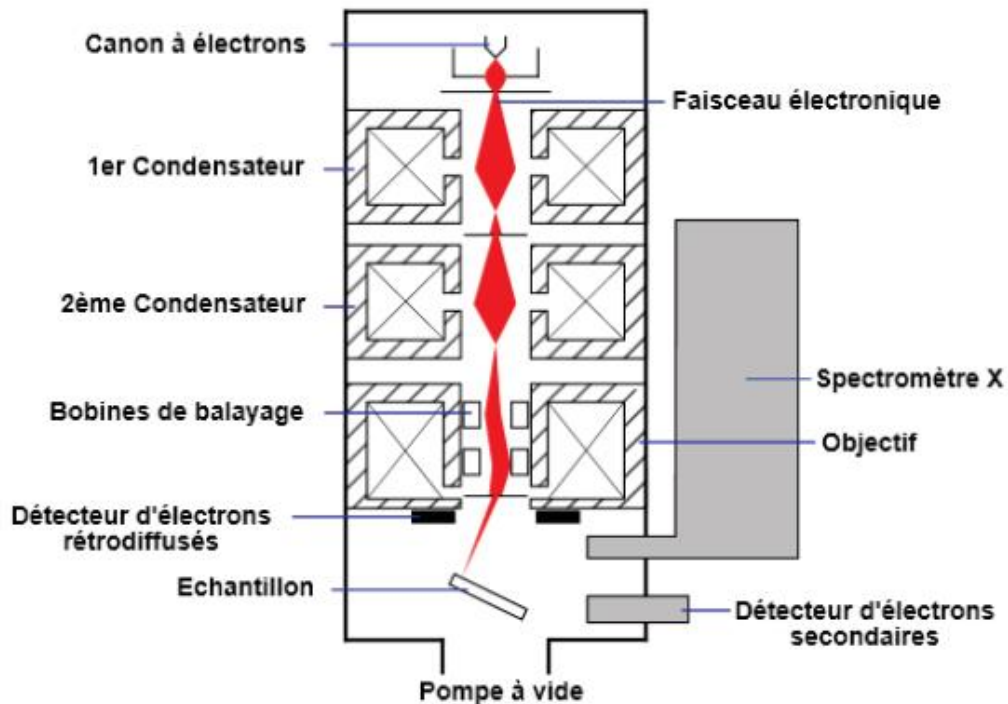


Figure II.5. Schéma d'un MEB équipé d'un détecteur EDS [18]

Le microscope à balayage environnementale couplé à l'EDX (MEB-EDX) utilisé est de type PHILIPS F.E.I. Quanta 200. Cette analyse a été effectuée au niveau de l'École Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie (ENSM).

II.3.2.7. Analyse élémentaire par Fluorescence X (FX)

La fluorescence X est une propriété spectrale des atomes, exploitée couramment en analyse pour obtenir des renseignements qualitatifs et/ou quantitatifs sur la composition élémentaire de toutes sortes de mélanges.

La spectrométrie d'émission de fluorescence X est une technique analytique du solide et du liquide basée sur l'observation de l'intensité lumineuse émise immédiatement après excitation des éléments d'un échantillon par un rayonnement de photons X ou gamma, d'ions, ou d'électrons. Le spectre de rayons X émis est caractéristique de la composition du matériau. Comme dans le cas de la spectrométrie d'émission atomique, en spectrométrie de fluorescence, ce spectre donne des informations qualitatives et quantitatives sur les composants de l'échantillon.

Un spectromètre de fluorescence X (FX) comporte une source de rayons X qui peut être un générateur de photons X ou une source radioactive. Le rayonnement issu de cette source, appelé rayonnement primaire, interagit avec les atomes de l'échantillon. La désexcitation donne lieu à une émission de rayons X, dite secondaire, caractéristique de la transition entre les deux

niveaux d'énergie, et donc de l'atome ionisé. Ce rayonnement secondaire est ensuite collecté par un spectromètre, dont il existe deux types : dispersif en longueurs d'onde (WDS) (Figure II.6) et dispersif en énergie (EDS) [19], ce qui permet l'identification des éléments du matériau, l'énergie des transitions électroniques étant connue par des bases de données de référence. Le spectre en énergie est obtenu directement au moyen d'une diode dont le signal varie selon l'énergie de chaque photon incident. En ce qui concerne le spectre en longueur d'onde, celui-ci est obtenu par rotation d'un cristal faisant office de réseau associé à un détecteur mobile [20]. Dans ce travail les analyses ont été effectuées par un appareil de type SKYRAY 7000XRF.

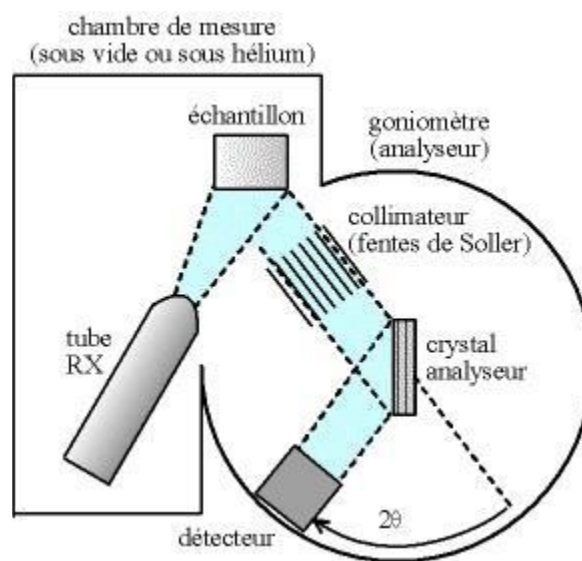


Figure II.6. Schéma de principe d'un appareil de fluorescence X dispersif en longueurs d'onde.

II.3.3. Analyse des matériaux stabilisés/solidifiés

Au bout de 28 jours de cure les éprouvettes sont démoulées, et subit des essais afin de déterminer les propriétés des matériaux confectionnés. Une analyse des tests de caractérisation des déchets traités et une comparaison de leurs résultats avec les prévisions obtenus à partir de caractérisation des déchets bruts permet d'évaluer l'efficacité du procédé de stabilisation/solidification.

Certaines méthodes de caractérisation des matériaux sont pratiquées sur des particules de petite taille, donc avant de procéder à une analyse quelconque des échantillons, ceux-ci doivent subir un traitement mécanique tel que le concassage, le broyage et le tamisage pour obtenir un échantillon représentatif. Nous avons appliqué les mêmes méthodes d'analyses citées dans le ce chapitre. Autres méthodes analytiques ont été utilisées pour l'étude des échantillons

traités comme l'analyse thermogravimétrique, idem les essais mécaniques qui ont permis de sélectionner la formulation optimisée ont été utilisés, cette formulation sélectionnée a subi une série de tests de lixiviation afin d'étudier son comportement vis-à-vis des tests de lixiviation. Ces tests sont illustrés dans ce qui suit.

II.3.3.1. Résistances mécaniques

A 7 et 28 jours de cure, une éprouvette de chaque mélange est démoulée pour effectuer des essais mécaniques.

Les résistances mécaniques à la compression et à la flexion sont déterminées à l'aide d'une presse hydraulique de type 65-L11M2 selon la norme NF EN196-1[2], figure II.7. Pour la détermination de la résistance à la flexion, les éprouvettes (4cm × 4 cm × 16 cm) sont placées dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci. La charge a été appliquée verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme. La charge a été augmentée de 50 N/s ± 10 N/s, jusqu'à rupture. A l'aide de la machine, on presse les demi-prismes à vitesse constante, en leur appliquant une charge progressive jusqu'à rupture.



Figure II.7. Presse hydraulique de type Control utilisée dans notre étude.

II.3.3.2. Analyse Thermogravimétrique et Analyse thermique différentielle (ATG/ATD)

L'analyse thermique différentielle (ATD) permet d'accéder à la variation de température d'un échantillon soumis à un traitement thermique.

Elle renseigne sur les effets thermiques accompagnant le chauffage de l'échantillon. Ceux-ci sont souvent associés à des transferts de masse entre la phase liquide ou solide et la phase gazeuse. Ils peuvent apparaître aussi sans variation de masse dans le cas de

transformations de structure, Cette mesure est obtenue par comparaison de la température de l'échantillon à celle d'une référence subissant le même traitement [21].

Dans Ce travail, nous avons utilisé cette technique pour étudier l'influence de l'ajout des déchets sur la quantité des phases formées lors l'hydratation et sur le degré d'hydratation des matériaux d'études. L'appareil utilisé est de marque (SDT Q600), figure II.8. L'analyse des échantillons a été effectuée de la température ambiante jusqu'à 1000°C sous atmosphère d'azote à une vitesse de chauffage constante de 20°C/min.

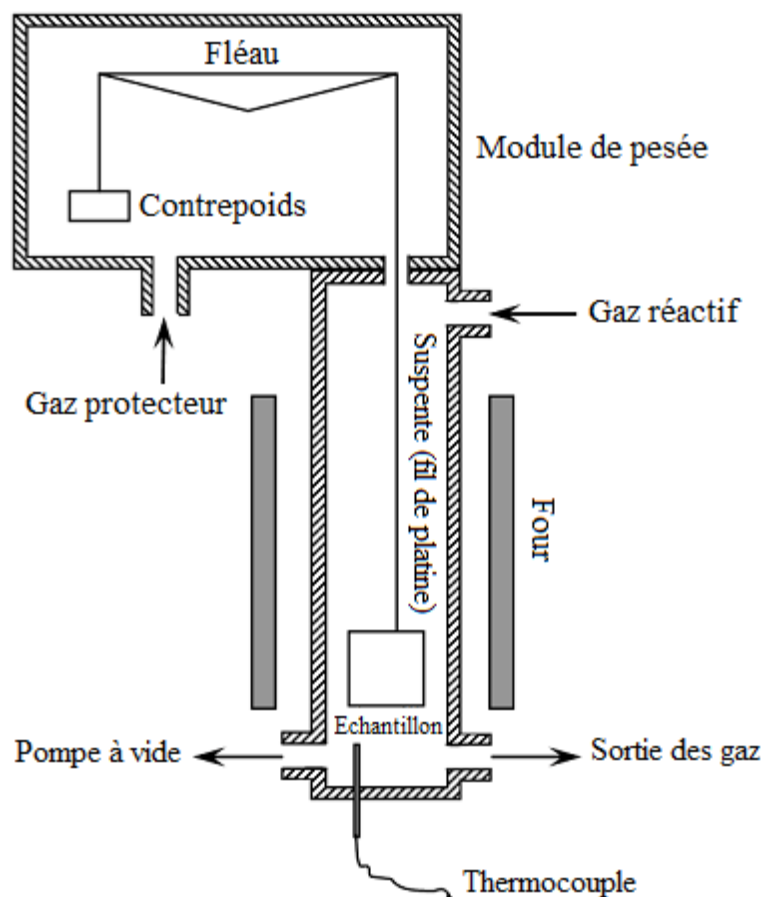


Figure II.8. Schéma de base d'un appareil d'ATG.

II.3.3.3. Comportement à la lixiviation

L'objectif de la stabilisation de déchet est de réduire sa perméabilité à l'eau et sa fraction lixiviable. L'évaluation environnementale est nécessaire pour vérifier le maintien des performances du matériau s/s, A cet effet, l'étude du comportement des matériaux stabilisés/solidifiés vis-à-vis des tests de lixiviations est primordial afin de s'assurer que les objectifs techniques du procédé de stabilisation/ solidification tels que l'amélioration de la rétention physico-chimique des polluants et des propriétés physiques du déchet sont atteints.

Des tests de lixiviation spécifiques sont réalisés afin de simuler le comportement à la lixiviation des matériaux s/s ou des déchets en conditions réelles d'utilisations ou de stockage.

II.3.3.3.1. Essai d'influence du pH (IpH)

Le but de de cette technique de lixiviation est de renseigner sur l'aptitude des matériaux stabilisés à résister à une attaque acide et sur le comportement des polluants lors d'une telle attaque.

Ce test est réalisé sur matériau broyé à un diamètre inférieur ou égal à 1mm, avec un rapport L/S de 10. Dans un premier temps une étape préliminaire a été effectuée pour connaître les quantités d'acide (ou base) à additionner. Le matériau est mis en contact avec de l'eau déminéralisée sous agitation continue dans un récipient fermé pendant 48 heures puis on mesure le pH dit « pH naturel ». Par la suite on peut procéder au titrage par l'ajout d'un volume déterminé d'acide (HNO_3) ou d'une base (NaOH), On mesure le pH après avoir stabilisé. Cette étape est répétée autant de fois pour recueillir les valeurs de pH comprises entre 13 et 2. Huit (8) essais de lixiviation sont lancés en parallèle à des pH répartis sur toute la gamme 2-13. Les solutions de lixiviation sont soumises à une agitation mécanique continue de 10 retournements/min pendant 7 jours à température ambiante ($23 \pm 1^\circ\text{C}$) [22]. Les éluats obtenus sont filtrés par filtre de $0,45 \mu\text{m}$ et divisés en deux parties : la première pour le dosage des anions et la deuxième sera acidifiée a un $\text{pH} = 2$ avec de l'acide nitrique (65%) pour l'analyse des métaux lourds.

II.3.3.3.2. Essais de l'eau de pore (EP) et la fraction maximale mobilisable (FMM)

Ce test de lixiviation nous permet de déterminer l'évolution des concentrations des espèces chimiques en fonction de la variation des rapports L/S, il consiste en une mise en contact du matériau finement broyé ($\leq 1\text{mm}$) avec l'eau déminéralisée en respectant les ratios L/S : 2, 5, 10, 50, 100 et 200 [23], la durée de mise en contact est de 7 jours sous agitation mécanique par retournements (10 retournements/min) à température ambiante ($23 \pm 1^\circ\text{C}$).

Les solutions obtenus sont filtrés à $0,45 \mu\text{m}$ et divisés en deux parties : une partie sera utilisée pour l'analyse des anions et l'autre sera acidifiée à $\text{pH} 2$ avec du HNO_3 à 65% pour être soumise à l'analyse des métaux.

II.3.3.3.3. Essai de lixiviation sur monolithe (TLM)

Ce test nous a permis d'étudier la dynamique du comportement à la lixiviation : un bloc monolithique est mise en contact avec un lixiviant, les lixiviants utilisés sont l'eau déminéralisée (milieu neutre) et une solution sulfatée de 5% de Na_2SO_4 ($33,8 \text{ g/L}$ de SO_4^{2-}) [24-

25]. Ce lixiviat est renouvelé à des intervalles de temps choisis. Les conditions opératoires utilisées sont illustrées dans le tableau II.5.

Tableau II.5. Conditions opératoires du test de lixiviation sur monolithe (TLM)

Taille du bloc	4*4*4 cm ³
ratio Liquide/Surface (L/S_f)	10 cm ³ /cm ²
temps de contact successifs	6 h, 18 h, 1j, 2 j, 5 j, 7 j, 20 j et 28j soit un total de 64 jours
Agitation	Continue par agitateur magnétique
Solution lixiviante	Eau déminéralisée /Solution sulfatée

Les blocs monolithiques sont introduits dans des bocaux en verre (1000 ml) hermétiquement fermés à l'aide d'un bouchon avec joint téflon, et cela pour éviter au maximum l'évaporation des solutions et l'admission d'air (figure II.9). Le test est réalisé dans laboratoire (LTMGP) à température ambiante ($23 \pm 1^\circ\text{C}$) et à l'abri de la lumière. Les solutions sont renouvelées après 6 h, 18 h, 1j, 2 j, 5 j, 7 j, 20 j et 28 jours, soit un total de 64 jours de lixiviation continu, cette durée est l'équivalent de 96 ans de lixiviation à l'échelle réel. On obtient 8 solutions de lixiviation à analyser après filtration sur filtre de $0,45 \mu\text{m}$ [23-26].

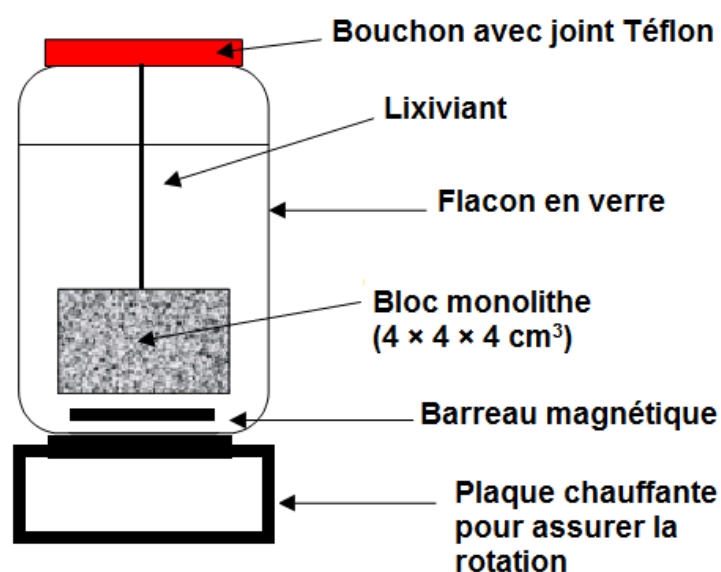


Figure II.9. Dispositif du test de lixiviation sur bloc monolithique [4]

Les solutions sont ensuite séparées en deux parties l'une sera utilisée pour l'analyse des anions et l'autre sera acidifiée à pH = 2 avec de l'acide nitrique concentré (65%) pour l'analyse des cations (métaux lourds). Les résultats obtenus sont présentés graphiquement en fonction du temps du contact ou temps moyen calculé par la formule suivante :

$$T_i = \left[\frac{\sqrt{t_i} + \sqrt{t_{i+1}}}{2} \right]^2 \dots\dots\dots \text{Eq. II. 5 [3]}$$

Où t_i sont les durées de chaque séquence de lixiviation.

II.4. CONCLUSION

Ce chapitre consiste à une brève description des méthodes expérimentales utilisées dans notre travail, dont l'objectif est de caractériser au mieux, d'un point de vue rhéologique, physique et mécanique des différents matériaux étudiés, l'évaluation de l'efficacité du confinement des déchets dans les matrices cimentaires via un suivi des paramètres influençant le relargage des polluants. Des mortiers et des pâtes de ciment, avec des substitutions du ciment par des ajouts, ont été réalisés.

Pour les besoins de notre étude, il est indispensable de caractériser de la façon la plus exacte possible des déchets du CET. Dans ce but, différentes analyses ont été réalisées sur ces déchets avant et après traitement par le procédé de stabilisation/solidification, à savoir :

- Détermination du taux en matière sèche, en matière organique ;
- L'analyse des métaux lourds a été effectuée à l'aide de l'ICP ;
- L'analyse par Fluorescence X (FX) pour déterminer la composition chimique élémentaire ;
- Les techniques, DRX, IR ont été utilisées pour la détection des éléments contenus dans des phases minérales et pour tester la capacité de fixation des polluants à l'intérieure de structure de la matrice cimentaire ;
- Détermination de la composition et de la distribution des éléments chimiques et analyse morphologique au Microscopie Electronique à Balayage (MEB-EDX) ;
- l'Analyse Thermogravimétrique (ATG/ATD) pour étudier l'effet des polluants sur l'hydratation des matériaux étudiés ;
- Détermination des propriétés intrinsèques et les paramètres qui contrôlent le relargage des polluants à court et à long terme par l'application des tests de lixiviation à savoir : le test de capacité de neutralisation acide (CNA), le test de l'eau des pores (EP) et le test de fraction maximale mobilisable (FMM) ; et le test de lixiviation sur monolithe (TLM) ;

Comme ce chapitre a été consacré à l'exposition des formulations des matériaux stabilisés /solidifiés, la caractérisation des déchets du CET, et les méthodes d'analyse mis en œuvre, le prochain chapitre sera consacré à l'illustration des résultats obtenus et à leurs discussions.

II.5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ROY, A., EATON, H. C., CARTLEDGE, F. H., *et al.* Solidification/Stabilisation des boues contenant des métaux lourds par le ciment portland et les cendres volantes. *Hazardous Materials*, vol. 8, p. 33-39, 1991.
- [2] NF EN 196-1. Méthodes d'essais des ciments-Partie 1 : détermination des résistances mécaniques [Methods of testing cements–part 1 : determination of mechanical strengths], 2006.
- [3] IMYIM, Apichat. Méthodologie d'évaluation environnementale des déchets stabilisés/solidifiés par liants hydrauliques. Thèse de doctorat. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2000.
- [4] BELEBCHOUCHE, Cherif. Etude expérimentale du comportement des matériaux cimentaires exposés à des environnements chimiquement agressifs et modélisation de la lixiviation. Thèse de doctorat. Université de Béjaïa-Abderrahmane Mira, 2015.
- [5] LOUATI, D. et CHOURA, M. Traitement par stabilisation/solidification de boues à l'huile de forages pétroliers générées par la compagnie AGIP BV Tunisia. *Larhyss Journal* P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, no 19, 2014.
- [6] WILD, S., KHATIB, Jamal M., et JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. *Cement and concrete research*, vol. 26, no 10, p. 1537-1544, 1996.
- [7] BROOKS, J. J. et JOHARI, MA Megat. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete. *Cement and concrete composites*, vol. 23, no 6, p. 495-502, 2001.
- [8] SAIDAT, Fatma. Activation chimique du métakaolin dans une matrice cimentaire. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2013.
- [9] RODIER J. L'analyse de l'eau, Dunod Collection, 9^{ème} édition. 2009.
- [10] ISO6878/1-1986(F). Qualité de l'eau, Dosage du phosphore, partie 1 : Dosage Spectrométrique à l'aide du molybdate d'ammonium. 1986. 1-12p.
- [11] TARDAT-HENRY, M. et BEAUDRY, J. P. Chimie des eaux, Edition le griffon d'argile. INC, Canada, 1984.

- [12] EN, B. S. 12880: 2000. Characterisation of sludges—Determination of dry residue and water content, 2000.
- [13] EL FELS, Loubna. Suivi physico-chimique, microbiologique et écotoxicologique du compostage de boues de STEP mélangées à des déchets de palmier : validation de nouveaux indices de maturité. Thèse de doctorat, 2014.
- [14] U.S.-E.P.A. Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP), Method 1311, Solid Waste Characterization Manual SW-848, Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods. Athens, Georgia, USA, 1994. (<http://www.epa.gov>).
- [15] DILLMANN, Philippe et BELLOT-GURLET, Ludovic. Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes. Archives contemporaines, 2014.
- [16] BIBIENNE, Thomas. Alliages cubiques centrés Ti-VX (X= Cr ou Mn) pour le stockage de l'hydrogène. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières, 2015.
- [17] IDRISSE, Meryem. Etude de l'inclusion du fer dans les ciments sulfao-alumineux et valorisation du caoutchouc dans leurs mortiers. 2012.
- [18] SAHLI, Mounir. Synthèse, élaboration et caractérisation des nanocomposites à base de magnésium pour le stockage solide d'hydrogène. Thèse de doctorat, 2015.
- [19] DESPUJOLS, Jacques. Spectrométrie D'émission des Rayons X. Fluorescence X. Ed. Techniques Ingénieur, 2000.
- [20] PICARD, Jessica. Développement de la LIBS pour l'analyse en ligne de produits uranifères ou plutonifères solides. Thèse de doctorat, 2015.
- [21] LYNCH, John. Analyse physico-chimique des catalyseurs industriels : manuel pratique de caractérisation. Editions technip, 2001.
- [22] European Committee for Standardization CEN/TC292/WG6. Basic characterization tests for leaching behaviour-Draft European pre standard N 148, NNI, 17p, April 1999.
- [23] CONNER, Jesse R. Chemical fixation and solidification of hazardous wastes. VAN NOSTRAND REINHOLD, NEW YORK, NY (USA), 1990.

[24] WANG, James G. Sulfate attack on hardened cement paste. *Cement and Concrete Research*, vol. 24, no 4, p. 735-742, 1994.

[25] YANG, Shen, ZHONGZI, Xu, et MINGSHU, Tang. The process of sulfate attack on cement mortars. *Advanced Cement Based Materials*, vol. 4, no 1, p. 1-5, 1996.

[26] NEN, E. A., et al. Leaching Characteristics of Moulded or Monolithic Building and Waste Materials. *Determination of Leaching of Inorganic Components with the Diffusion Test*, 2004.

CHAPITRE III.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE III.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le chapitre précédent a été consacré à la présentation des différents matériaux utilisés, formulations adaptées, techniques et les dispositifs expérimentaux mis en œuvre.

A travers ce chapitre, nous allons présenter et analyser les résultats obtenus au cours de l'étude expérimentale menée sur : les déchets bruts du CET de Bejaïa, les mortiers et les matériaux cimentaires confectionnés (avec et sans ajout de déchet).

En premier lieu, on présentera les résultats de caractérisation des déchets du CET. En second lieu, on mettra en évidence les résultats issus des différentes caractérisations mécaniques et physico-chimiques appliquées sur les matériaux S/S. Enfin, on présentera les résultats de l'étude du comportement à la lixiviation et de la mobilisation des polluants menée sur les matériaux qui répondent aux normes.

III.1. CARACTERISATION DES DECHETS DU CET

III.1. 1. Composition chimique élémentaire des échantillons

La connaissance de la composition physico-chimique des échantillons est essentielle pour prédire les risques potentiels de pollution pour l'environnement. Les résultats de la caractérisation physico-chimiques des boues et des lixiviats du CET de Bejaia sont représentés sur les tableaux III.1 et III.2. La boue du centre d'enfouissement technique a été caractérisée par le test TCLP après la préparation (broyage, tamisage...etc) de l'échantillon au niveau de laboratoire LTMGP-Université de Bejaia.

Les résultats de l'analyse chimique élémentaire des échantillons enregistrés dans les tableaux III.1 et III.2 montrent que le lixiviat du CET est riche en métaux lourds, notamment le Pb, Zn, Fr, Cd et Ni, alors que l'élément le plus présent dans la boue est le plomb. Ces éléments sont toxiques, et en excès ils peuvent représenter un risque pour la santé humaine. Les sources principales de ces métaux dans nos déchets sont [1] : piles et batteries (Zn, Pb, Cd), peintures (Cd, Pb), plastiques (Cd, Ni, Zn), papiers-cartons (Pb), et les composants électroniques (Pb, Cd).

Tableau III.1.Caractéristiques physico-chimiques des lixiviats du CET.

Elément	Echantillons 1(mg/L)	Echantillons 2(mg/L)	Normes Algérienne (mg/L) [2]
pH	7,06	8,10	6,5 – 8,5
CE (mS/cm)	1	107,7	-
DCO (mg O ₂ /L)	5	7	120 -130
Pb ²⁺	20	10	0,5
Zn ²⁺	40,30	14,12	3
Fe ²⁺	30,23	7,01	3
Cd ²⁺	5	8	0,2
Ni ²⁺	10,24	8,55	0,5
Na ⁺	31,83	20,8	-
K ⁺	55	10,7	-
Ca ⁺	14,5	12,02	-
Cl ⁻	1775,50	1512,4	-
SO ₄ ²⁻	1024	850,02	-
PO ₄ ³⁻	20	16,5	-

Tableau III.2.Caractéristiques physico-chimiques des boues du CET.

Elément (mg/Kg)	Echantillons 1 (mg/Kg)	Echantillons 2 (mg/Kg)	Norme (mg/Kg) NF X31-21 [3]
pH	7,48	7,06	-
CE (mS/cm)	1,15	1,02	-
Matière sèche (%)	59,19	60,19	-
MO (%)	14,25	19,75	-
DCO (mg O ₂ /L)	4	4	-
Pb ²⁺	94,4	72	50
Zn ²⁺	18,80	0,54	250
Fe ²⁺	23,24	17,6	-
Cd ²⁺	0,1	0,4	25
Ni ²⁺	0,3	0,6	50
Na ⁺	0,5	0,5	-
K ⁺	13,35	122,6	-
Ca ⁺	1,12	3,2	-
Cl ⁻	170,50	70,91	-
SO ₄ ²⁻	36,5	30,14	-
PO ₄ ³⁻	0,12	4,5	-

La comparaison des résultats obtenus avec ceux des valeurs limites Algérienne [2] pour les échantillons liquides (lixiviats), et la norme NF X31-21 [3] pour les échantillons solides (boue), révèle des concentrations importantes en métaux lourds à savoir : le plomb, le nickel, le cadmium et le zinc. Ces concentrations dépassent largement les normes exigées. Cependant, les déchets du CET nécessitent un traitement avant d'être admis au centre de stockage.

III.1.2. Analyse par Fluorence X (FX)_Composition chimique des boues du CET

L'analyse chimique des boues du CET (Echantillon 1 et 2) a été déterminé par spectrométrie de Fluorence X, et les résultats obtenus sont représentés dans le Tableau III.3. Ces résultats confirment la présence des métaux (Pb), On note aussi la présence de silicium par un taux de 45.3% dans l'échantillon 1 et 52,6% dans l'échantillon 2. Or que, d'une façon

générale l'analyse des boues du CET par Fluorence X reste préliminaire car ces matériaux sont très complexes constitués par des phases minérales, organiques et biologiques.

Tableau III.3. Composition chimique des échantillons selon l'analyse par FX.

Elément	Pourcentage en masse (%)	
	Echantillon 1	Echantillon 2
Na	0,611	0,349
Mg	0,916	1,24
Al	12,6	14,6
Si	45,3	52,6
P	1,27	0,327
S	1,23	0,205
Cl	0,594	0,0738
K	4,67	4,96
Ca	16,5	11,2
Ti	1,52	1,45
Fe	14,3	12,9
Rb	0,0449	0,0391
Sr	0,0767	0,0776
Pb	0,163	0,175
Zn	0,0624	0,0714

III.1.3. Composition minéralogique de la boue – par le Diffractomètre aux Rayons X (DRX)

La nature des phases cristallines présentes dans la boue du CET est déterminée par diffractométrie de Rayons X (DRX) sur une poudre. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III.1 et III.2.

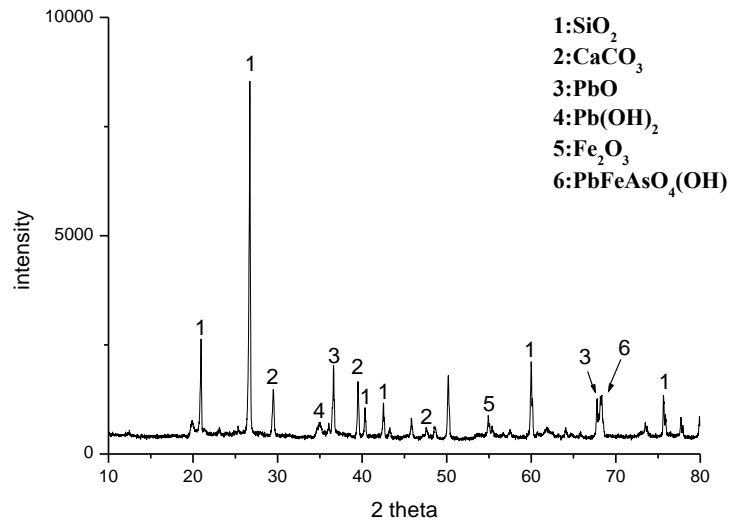


Figure III.1. Spectre DRX de l'échantillon 1.

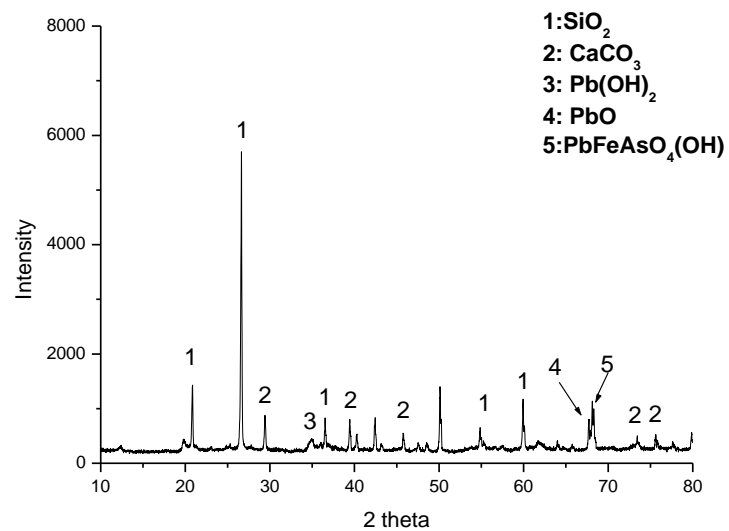


Figure III.2. Spectre DRX de l'échantillon 2.

L'analyse DRX des échantillons montre la présence de plusieurs phases telles que le quartz, calcite et d'autres phases contenant des éléments chimiques notamment le Pb et le fer et cela confirme la présence des métaux lourds dans nos échantillons.

III.1.4. Analyse par Infra-Rouge (IR) de la boue

Les spectres obtenus par l'analyse IR effectuée sur les échantillons de boue du CET et enregistrés entre 500 et 4000 cm^{-1} sont donnés sur les figures III.3 et III.4.

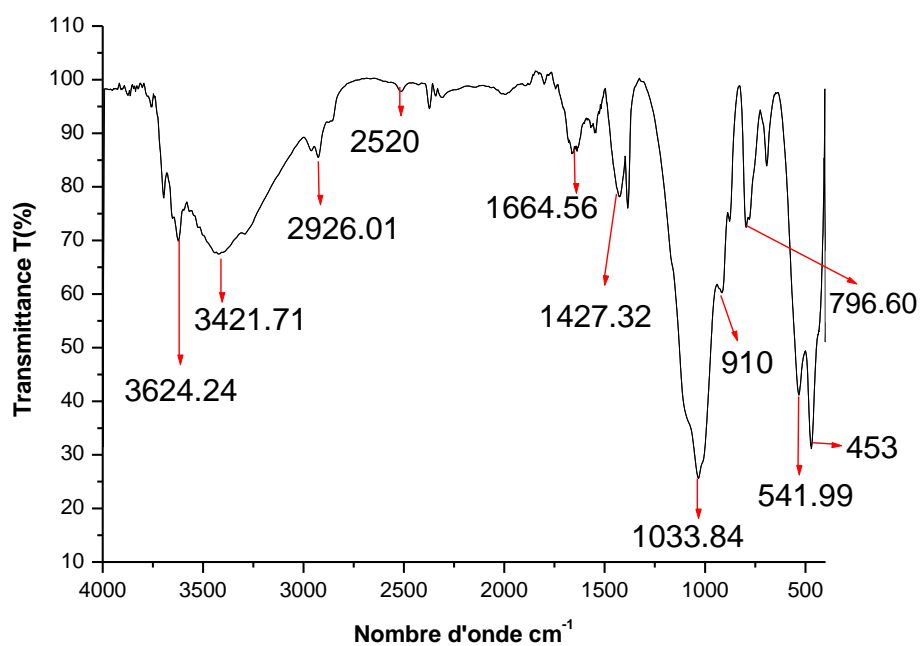


Figure III.3. Spectres FT-IR de la boue (Echantillon 1).

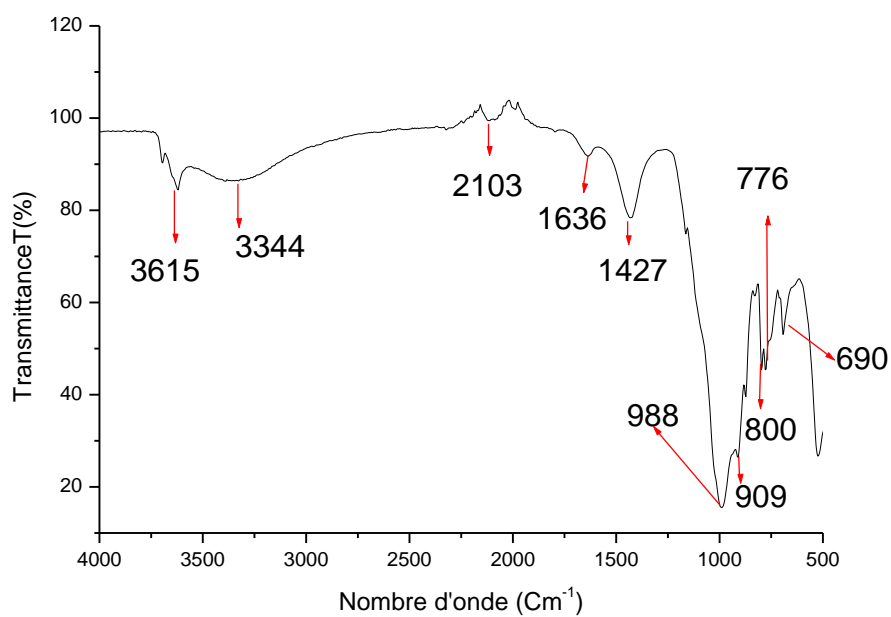


Figure III.4. Spectres FT-IR de la boue (Echantillon 2).

Les spectres FTIR des échantillons (1 et 2) présentés sur les figures III.3 et III.4 montrent l'évolution des bandes d'absorption des échantillons.

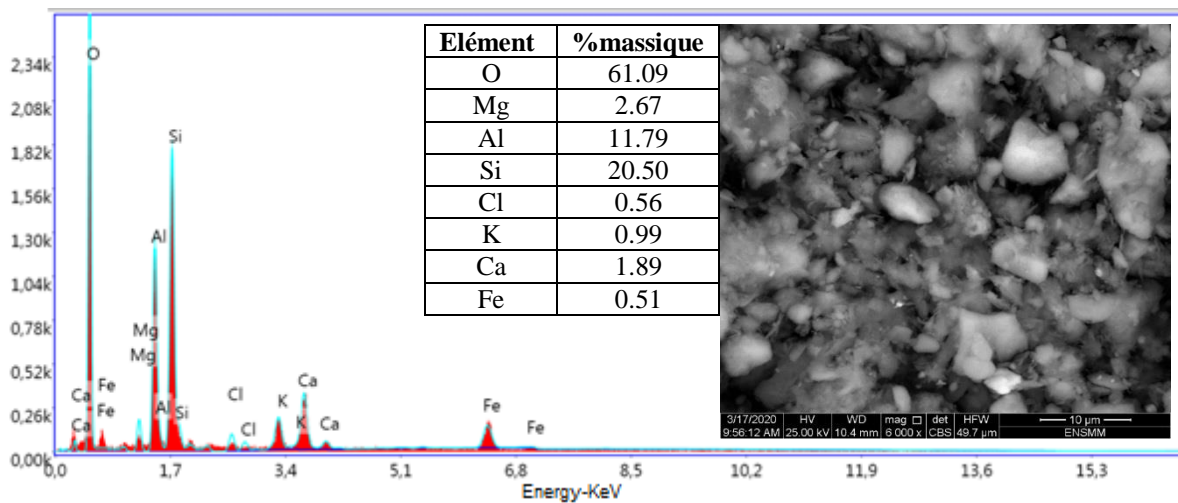
- Les deux bandes d'absorption entre 3421.71-3624.24 cm^{-1} (figure III.3) et 3344.71-3615 cm^{-1} (figure III.4), sont attribuées aux groupes hydroxy structuraux dans la couche minérale d'argile et les molécules d'eau dans les espaces de la couche intercalaire [4].
- Les bandes situées à 2520, 1664.56 et 1427.32 cm^{-1} dans la figure III.3 (Echantillon 1) et les bandes 2103, 1636.56 et 1427 cm^{-1} dans la figure III.4 (Echantillon 2) sont typiquement caractéristiques de la calcite [5].
- La persistance d'une bande intense à environ 988 Cm^{-1} (figure III.4) et 1033,84 cm^{-1} (figure III.3) est caractéristique de la silice [4-6].
- Les vibrations angulaires du groupement Al-O-H se manifestent par une bande de faible intensité aux alentours de 909 cm^{-1} dans la figure III.4 et 910 cm^{-1} dans la figure III.3 [7].
- Les pics entre 820-752 cm^{-1} (figure III.4) et le pic de 796,60 cm^{-1} (figure III.3) sont attribuables à la présence du carbonate [7].
- Une bande à 690 cm^{-1} (figure III.4) correspond au mode vibrationnel de la liaison Si-O peut être attribuée à la présence du quartz [8].
- La bande à 453 Cm^{-1} (figure III.3) est attribuée au mouvement d'élongation de la liaison $\nu\text{M} - \text{OH}_2$ [9].
- Le pic à 541 Cm^{-1} (figure III.3) correspond à la liaison $\nu\text{C}-\text{Cl}$ [10].

Les résultats obtenus par analyse infrarouge montrent la présence de : la silice, la Calcite et les métaux. Ces résultats sont en accord avec ce que nous avons obtenu en DRX.

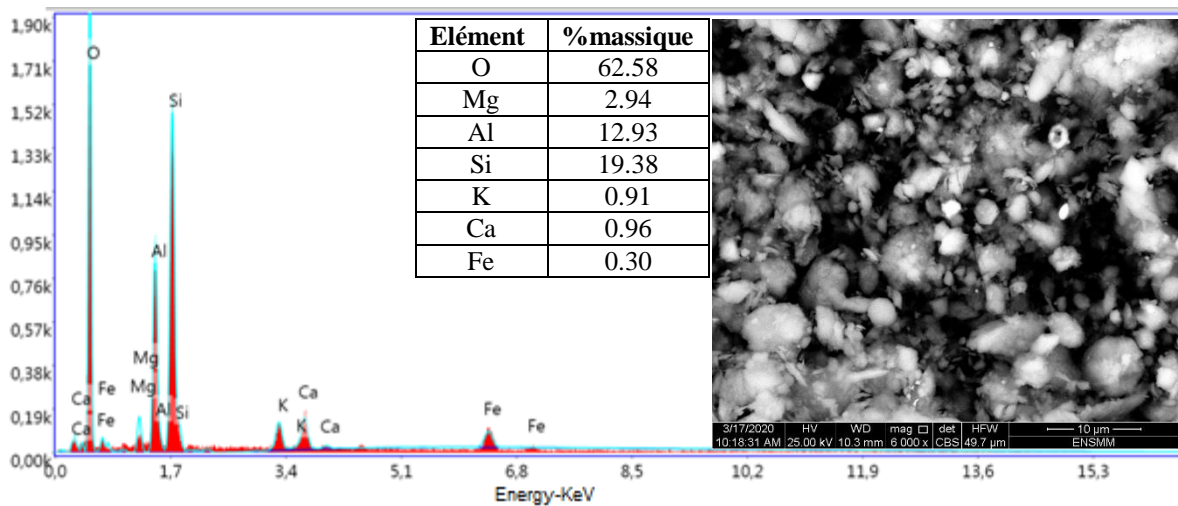
III.1.5. Microstructure et composition élémentaire (MEB-EDX) de la boue

Les résultats d'analyse au microscope électronique à balayage (MEB-EDX) réalisée sur les deux échantillons de la boue du CET sont représentés dans la figure III.5. On observe que les deux échantillons présentent des aspects similaires, les photos obtenues par microscopie électronique à balayage révèlent un état de surface hétérogène, elles montrent que cette boue est caractérisée par des cristaux de forme arrondie et angulaire avec une couleur grise-claire.

D'après les résultats de l'analyse par EDX obtenus (figure III.5) il est intéressant de constater que les principaux éléments présents dans ces boues sont : l'oxygène, le silicium, l'aluminium, le magnésium, le calcium, le potassium, le chlorure et le fer. L'oxygène et le silicium, sont les éléments les plus présents dans la matrice des boues, ce qui est en concordance avec les phases minéralogiques identifiées par la diffraction des rayons X.



a. Echantillon 1



b. Echantillon 2

Figure III.5. Morphologie et spectres EDX des échantillons de boue, (a)Echantillon 1, (b) Echantillon 2.

Au regard des résultats obtenus grâce à la caractérisation (chimique et minéralogique) des déchets bruts, il apparaît que certains éléments de trace métalliques (zinc, plomb, nickel, et cadmium) dépassent largement les normes en vigueur [2-3]. De ce fait, ces déchets sont classés comme déchets dangereux. Cependant, ces déchets nécessitent un traitement de Stabilisation/Solidification par liant hydraulique avant d'être mise dans l'environnement.

III.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX STABILISES/SOLIDIFIES

Au bout de 28 jours de cure les éprouvettes sont démoulées et subissent de différents essais afin de déterminer toutes les propriétés des matériaux confectionnés. Une analyse des tests de caractérisation des déchets traités et une comparaison de leurs résultats avec les prévisions obtenus à partir de caractérisation des déchets bruts permet d'évaluer l'efficacité du procédé de stabilisation/solidification. Nous avons appliqué les méthodes d'analyses citées dans le chapitre II sur les matériaux s/s et les résultats obtenus sont illustrés dans ce qui suit.

III.2.1. Résistance mécanique

Les essais mécaniques ont permis de sélectionner la formulation optimisée, cette formulation a subi une série de tests de lixiviation afin d'étudier son comportement à la lixiviation. La figure III.6 représente l'évolution des résistances mécaniques des matériaux confectionnés par les lixiviats, et la figure III.7 montre les résistances mécaniques conçues à partir des boues traitées.

Les résistances à la flexion et à la compression, ont été suivies à 7 jours et à 28 jours de cure, d'après les figures III.6 et III.7, il a été constaté que la résistance augmente avec le temps de durcissement pour toutes les formulations, cette observation est confirmée par plusieurs études [11-13]. Cependant, la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de CKD substitué, d'où la résistance a diminuée de 71 à 31 MPa, tandis que la formulation F4P qui contient 100 % de CKD a une résistance nulle même à 28 jours, cette réduction de résistances mécaniques des formulations de pâtes est engendrée par la diminution des phases minéralogiques du ciment notamment le clinker, qui est le responsable de développement de la résistance [14]. On peut attribuer cette réduction aussi à la composition chimique du CKD utilisé qui est pauvre en alcalis, ces derniers accélèrent la réaction d'hydratation du ciment [15-16]. Plusieurs études ont été menées pour étudier l'effet de la substitution du ciment par les CKD, les résultats de ces études concordent avec nos résultats, on cite essentiellement : Maslehuddin et al. (2009) ont évalué les propriétés des bétons mélangés à la poussière de four à ciment (CKD), et les résultats obtenus ont montré que la résistance à la compression des échantillons de béton a diminuée avec l'augmentation de la quantité de remplacement de CKD [17], Bhatta (1984, 1985, 1986) a étudié des mélanges utilisant : ciment Portland ordinaire (OPC), cinq différents types de CKD, il a observé que les formulations du ciment et du CKD ont une résistance et un temps de prise réduits [18-20].

La formulation F5P activées par 4% NS présente une résistance comparable à celle de la matrice témoin F0P (sans activant) cela est due à la disponibilité du Nickel qui accélère l'hydratation de ciment [21].

Pour les formulations des boues traitées (figure III.7 (a)), il a été observé que le matériau témoin FOM présente une meilleure résistance en compression à 28 jours. En général, les mortiers ont montré des résistances mécaniques importantes, cela est dû probablement à l'ajout du sable normalisé qui participe pleinement à la réduction de la porosité, augmentant ainsi la résistance des mortiers [11]. La figure III.7 montre que la résistance des matériaux stabilisés/solidifiés diminue avec l'augmentation de la quantité de boue ; cette diminution est due à la présence de Pb qui retarde l'hydratation des ciments, car il précipite sous forme, très peu soluble, de sulfate ou de carbonate sur la surface des silicates de calcium et d'aluminium [22-23]. Sur la figure III.7 (b) qui présente l'évolution des résistances des formulations des boues (échantillon 2), on voit nettement le retard de développement des résistances à 7 jours, par rapport à celle de référence ne comportant pas de métakaolin et de boue contaminée, cela est dû probablement à la présence de Pb qui a un effet retardateur sur l'hydratation de ciment [24]. Plusieurs études ont montré que l'incorporation de métakaolin conduit à un gain en résistance plus important par rapport au témoin [25-26]. La formulation (F5P) montre à 7 jours un gain en résistance important par rapport au témoin ; ainsi l'activation par NS n'a pas d'effet puisqu'on se situe au niveau de résistance qui correspond au développement naturel de la réaction pouzzolanique ; à 28 jours, on constate une baisse de résistance, ce comportement associé à la présence de NS qui inhibe la réaction pouzzolanique et le développement des résistances à plus long terme [27].

L'augmentation de la résistance à la compression dans les formulations des lixiviats par rapport à celle des formulations des boues, pourrait être due au contenu organique présent dans le lixiviat, qui pourrait agir comme un agent dispersant, améliorant la dispersion des particules de ciment et réduisant l'agglomération [28]. L'effet du mélange du béton avec l'eau a été largement étudié pour différentes sources d'eau autres que l'eau douce ordinaire :

Silva et Naik (2010) ont étudié l'utilisation d'eau de station d'épuration partiellement traitée dans le béton et ont constaté une amélioration de la résistance pendant 3 à 28 jours [28]. Taha et al., (2010) ont étudié l'utilisation d'eau saumâtre et brute et ont trouvé une meilleure résistance même à longue période de durcissement par rapport à l'eau du robinet [29]. Katano et al., (2013) ont constaté que la résistance précoce et à long terme du béton mélangé à des ingrédients à haute teneur en chlorure (eau de mer et sable de mer) pourrait être améliorée [30]. Al-Jabri et al. (2011) n'ont signalé aucune différence significative de résistance pour le béton mélangé aux eaux usées des stations de lavage de voitures [31].

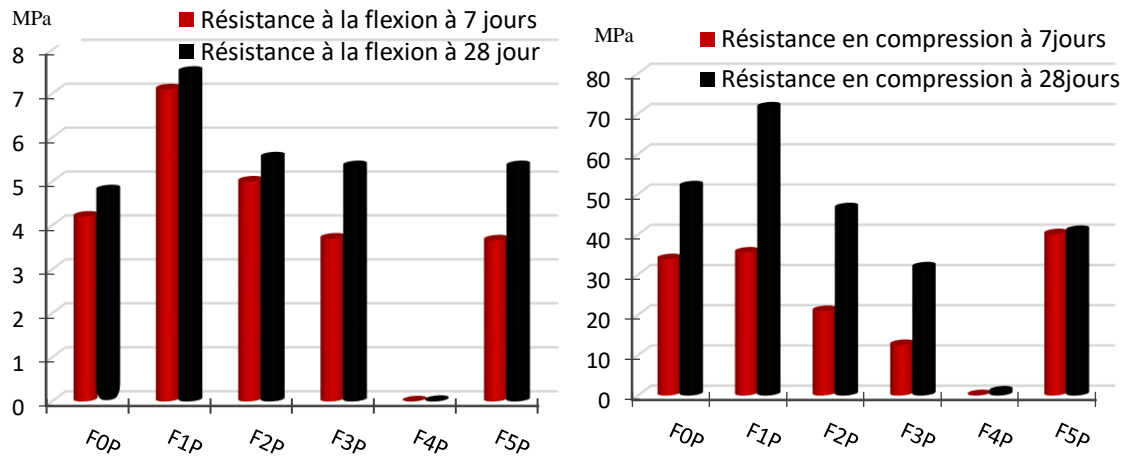
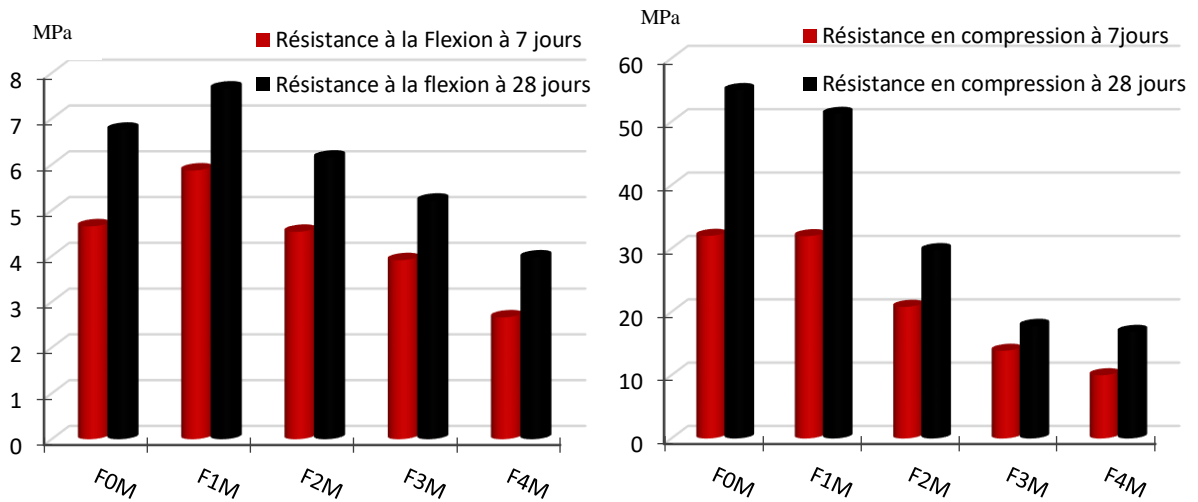
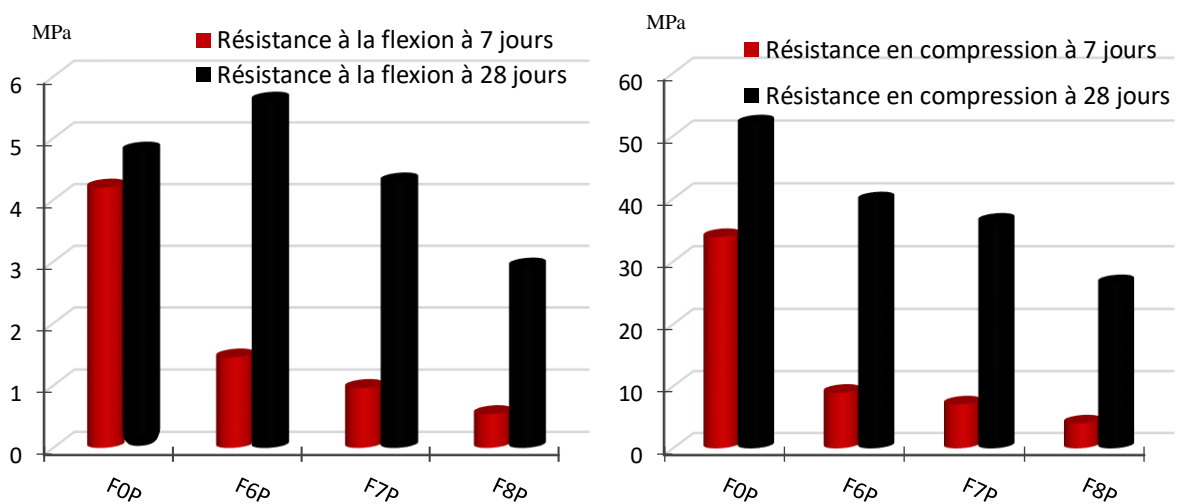


Figure III.6. Evolution des résistances mécaniques des matériaux stabilisés/solidifiés par des lixiviats.



a. Echantillon 1



b. Echantillon 2

Figure III.7. Evolution des résistances mécaniques des matériaux stabilisés/solidifiés par les boues.

On tire comme conclusion que toutes les éprouvettes confectionnées présentent des résistances mécaniques supérieures à celle recommandée par la norme XP X 31-212 [32] qui est de 1MPa excepté la formulation F4P.

Après la sélection des meilleures formulations (F1P, F2M, F5P et F6P) de point de vue résistances mécaniques, les analyses citées ci-dessous sont effectuées sur ces meilleures formulations ainsi que sur les deux formulations de références (F0P et F0M).

III.2.2. Composition minéralogique des matériaux

Les diffractogrammes obtenus par l'analyse minéralogique (DRX) des matériaux témoins F0P et F0M sont illustrés sur les figures III.8 et III.9.

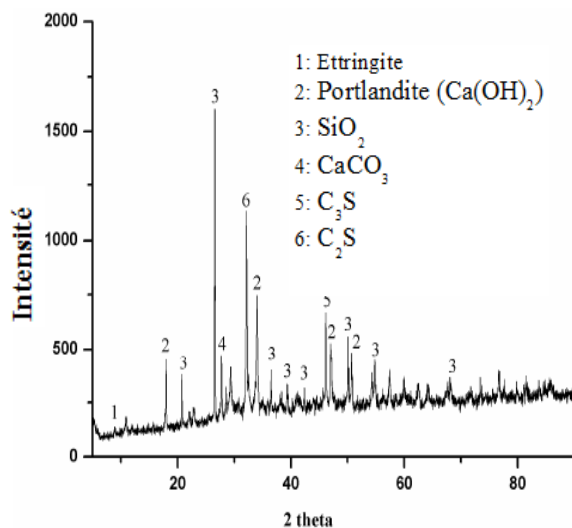


Figure III.8. Diffractogramme DRX du matériau F0M à 28 jours

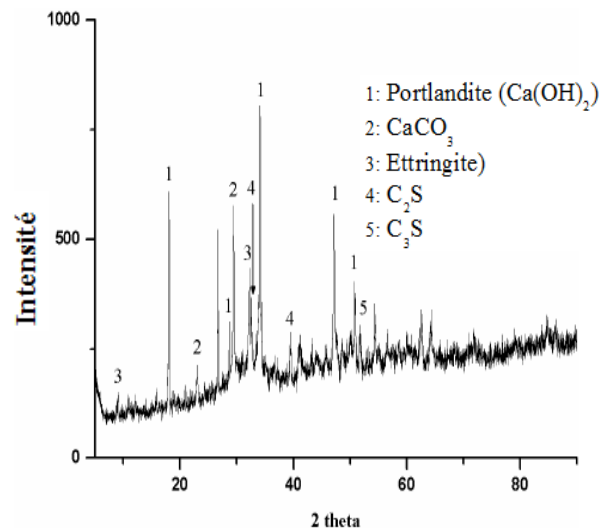


Figure III.9. Diffractogramme DRX du matériau F0P à 28 jours.

Les spectres ($20^\circ < 2\theta < 50^\circ$) obtenus indiquent la présence de l'ettringite $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ et la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, on trouve aussi de la calcite CaCO_3 et on observe des pics attribués à la bélite (C_2S) et l'alite (C_3S) indiquant la présence des grains de ciment anhydre.

L'analyse minéralogique (DRX) a été réalisée sur nos meilleures formulations, afin de déterminer les nouvelles phases formées dans la structure des matériaux après l'ajout de déchet et de lixiviat. Les résultats obtenus sont consignés sur les figures III.10, III.11, III.12 et III.13, ci-dessous.

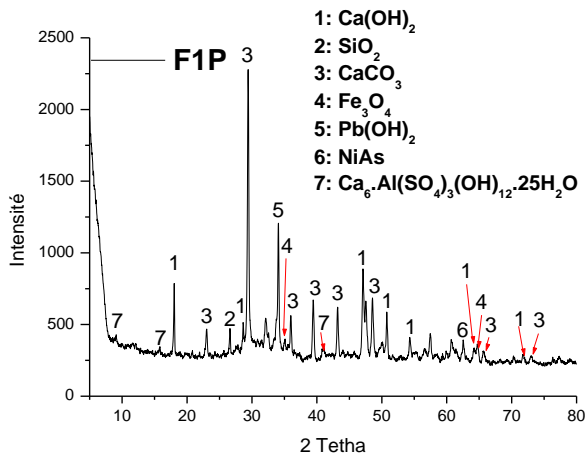


Figure III.10. Diffractogramme DRX du matériau F1P à 28 jours

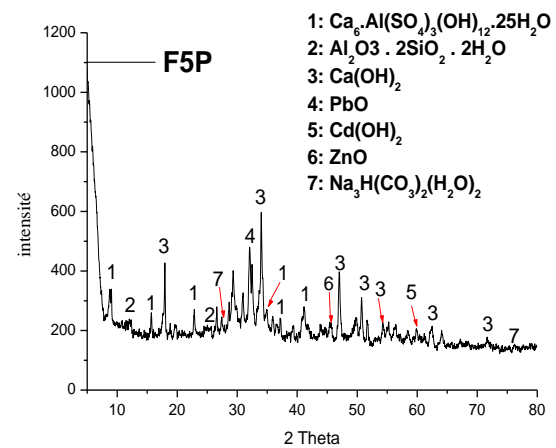


Figure III.11. Diffractogramme DRX du matériau F5P à 28 jours.

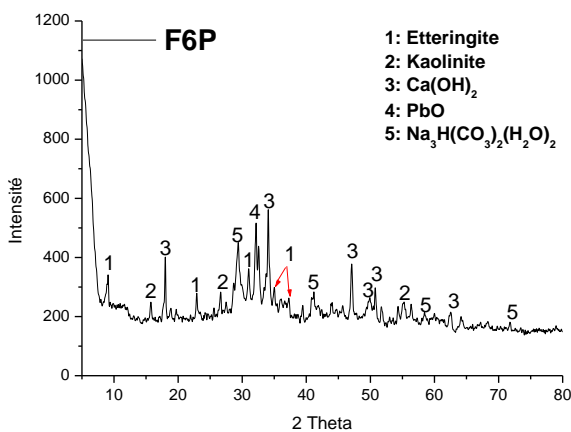


Figure III.12. Diffractogramme DRX du matériau F6P à 28 jours

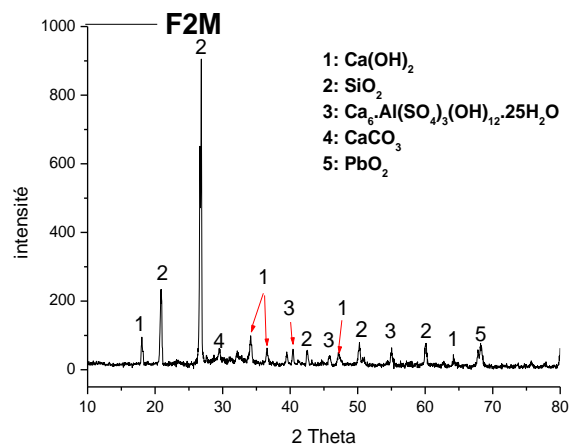


Figure III.13. Diffractogramme DRX du matériau F2M à 28 jours.

L'étude des échantillons sélectionnés par diffraction des rayons X a confirmé la présence des phases minéralogiques suivantes : la portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (PDF : 00-044-1481)] et l'étringite [$\text{Ca}_6\text{Al}(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 25\text{H}_2\text{O}$ (PDF : 00-041-1451)] qui sont le résultat de l'hydratation du ciment [33], la présence de calcite [CaCO_3 (PDF : 00-005-0586)], de quartz [SiO_2 (PDF : 00-046-1045)] et de kaolinite ont également été observées.

Cet analyse montre aussi l'apparition de nouvelles phases qui contiennent des métaux lourds tels que : $\text{Cd}(\text{OH})_2$ et $\text{Pb}(\text{OH})_2$, elles sont formées pendant l'hydratation du ciment par substitution du calcium par le cadmium et le plomb [34]. Les phases AsNi , ZnO et PbO ont été détectées. La formation de nouvelles phases complexes, inexistantes dans nos déchets bruts, dû à

l'hydratation du ciment et à diverse interactions entre éléments chimiques, montrent l'efficacité du procédé dans le piégeage des métaux lourds dans la structure du matériau S/S.

III.2.3. Analyse des matériaux par Infra-Rouge (IRTF)

Les analyses des matériaux mortiers et pâtes par spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier permettent de confirmer les résultats des analyses obtenus par DRX. Cette analyse est primordiale pour la confirmation de la formation des phases résultantes de l'hydratation de ciment (portlandite et étringite). Les spectres IR obtenus pour les matrice témoins F0P et F0M, et l'identification des différentes bandes d'adsorption sont répertoriés dans la figure III.14 et le tableau III.4.

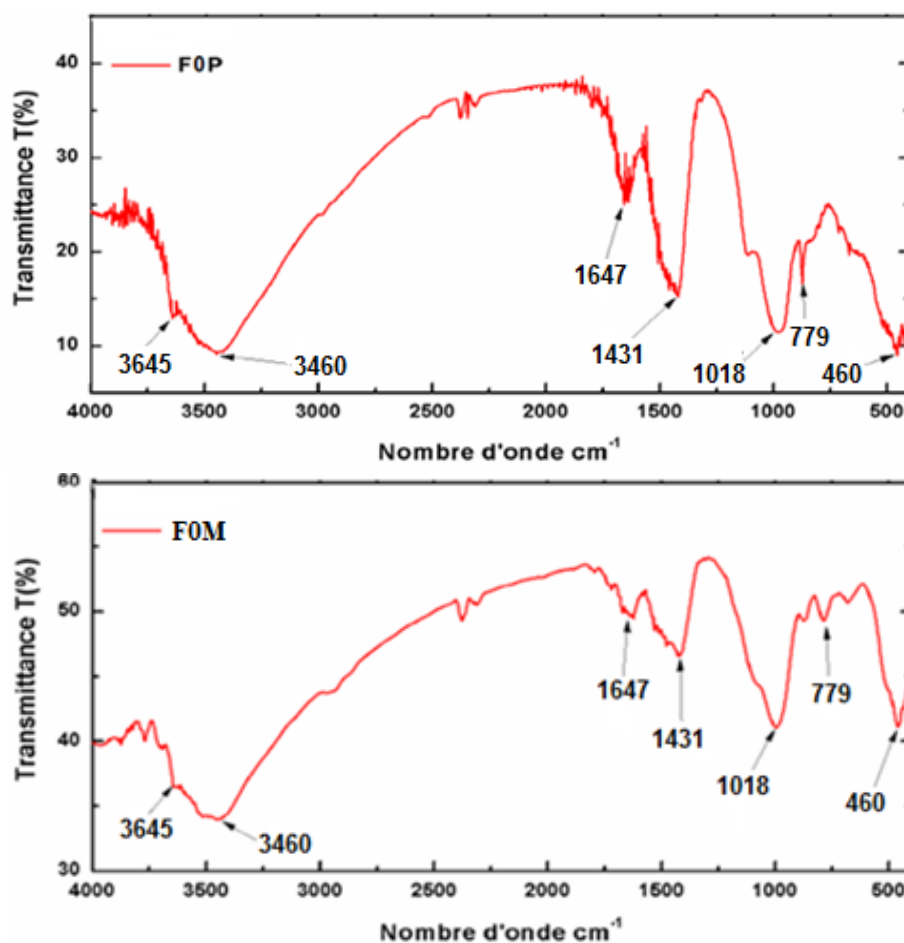


Figure III.14. Spectres IR des matériaux témoins F0P et F0M.

Tableau III.4. Identification des bandes apparues sur les spectres infrarouges des matériaux stabilisés/solidifiés.

Nombre d'ondes (cm ⁻¹)	Liaisons interatomiques	Forme des bandes	Constituants
3645	ν O-H	Fine	Portlandite
3460	ν Si-O	Large et intense	C-S-H
1647	ν O-H	moyenne	Ettringite
1431	ν CO ₃ ²⁻	moyenne	Calcite
1018	ν SO ₄ ²⁻	intense	Ettringite
779	Si-O	faible	Quartz
460	ν SiO ₄ ⁴⁻	faible	C-S-H

D'après les spectres IR des matériaux FOP et FOM, nous observons une bande à 3645 cm⁻¹ qui indique la présence d'une vibration du groupement hydroxyde (OH) de la portlandite [34-35]. Nous constatons l'apparition des bandes caractéristiques de la liaison Si-O à plusieurs positions (3460, 779 et 460 cm⁻¹) du quartz des C-S-H [36]. La bande observée autour de 1647 cm⁻¹ correspond à la liaison O-H de l'eau provenant de l'ettringite [37]. La bande observée autour de 1431cm⁻¹ correspond aux groupements carbonate (CO₃²⁻) contenant dans les carbonates de calcium (CaCO₃)[38]. La détection de la bande à 1018 cm⁻¹ attribuée aux vibrations des sulfates (ν SO₄²⁻) confirme la formation de l'ettringite après hydratation [36].

Les figures III.15 et III.16 illustrent les résultats d'identification des spectres IR obtenus pour les matériaux F1P, F5P, F6P et F2M.

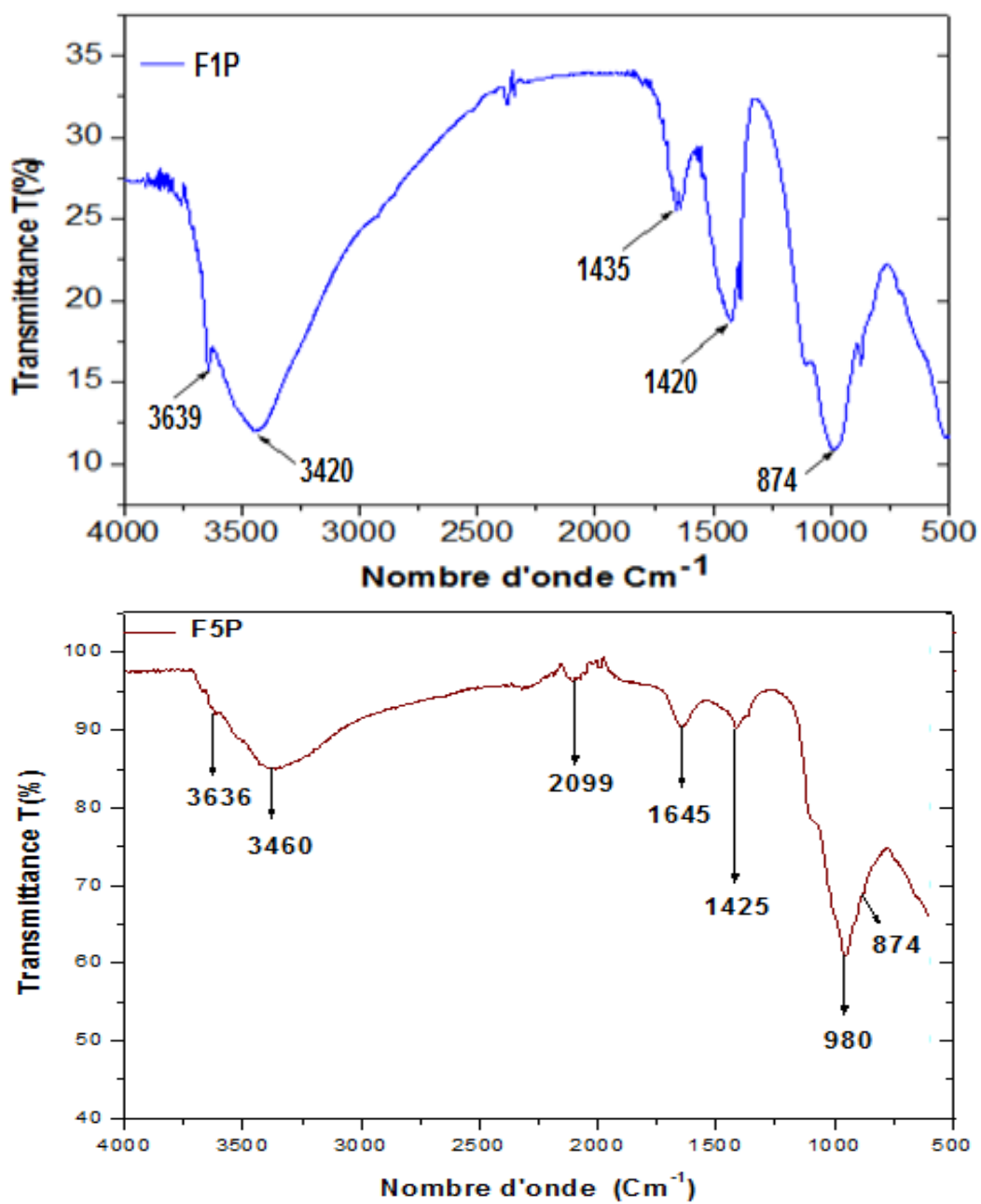


Figure III.15. Spectres IR des matériaux F1P et F5P.

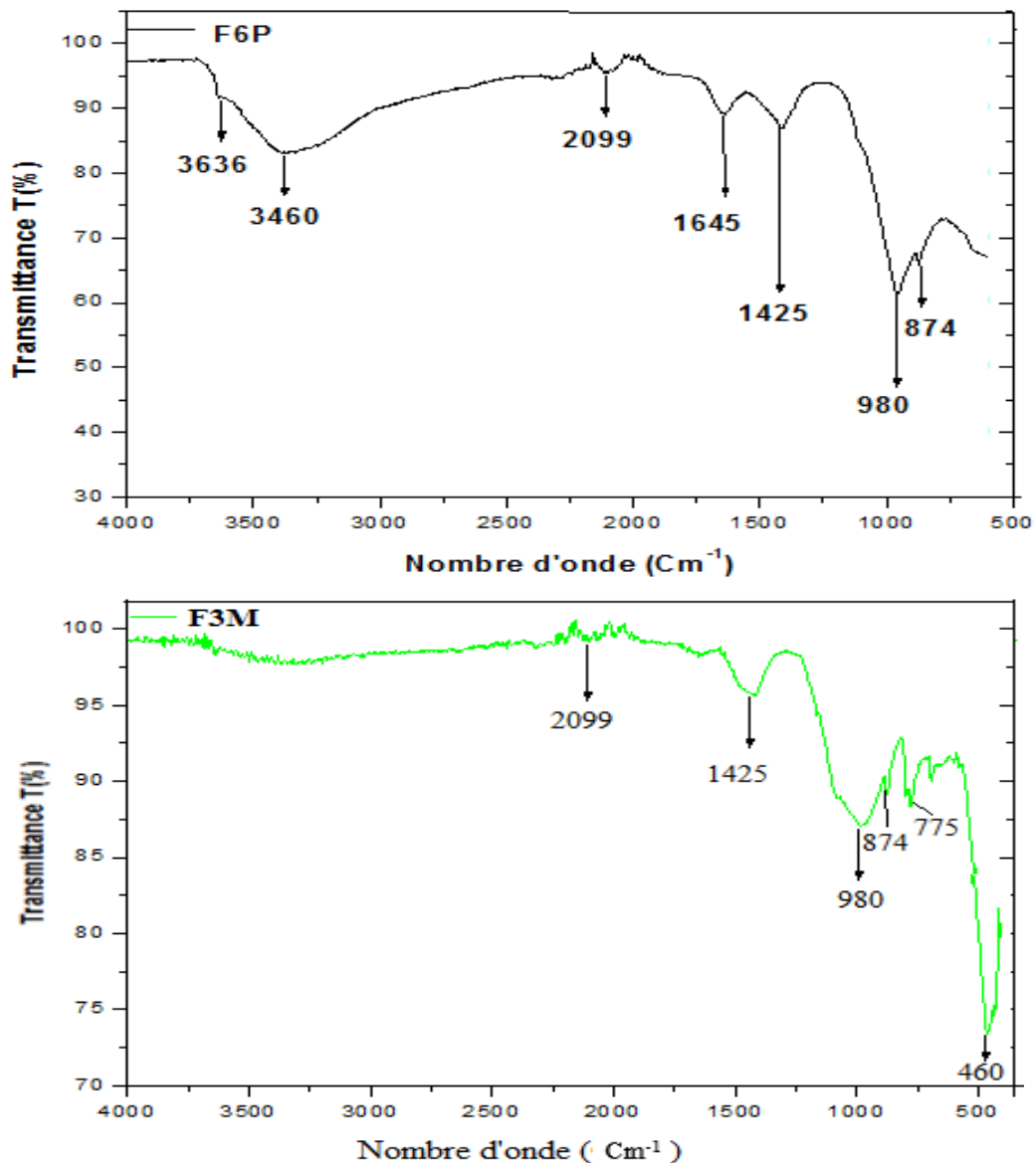


Figure III.16. Spectres IR des matériaux F6P et F2M.

L'interprétation des spectres IRTF des matériaux à 28 jours permet d'obtenir les notes suivantes :

- Les spectres IR des matériaux montrent clairement la présence de portlandite vers des bandes à 3636 cm^{-1} et 3639 cm^{-1} [34, 35, 39] ;
- Une bande large et intense de l'ordre de 3420 cm^{-1} correspondant à la liaison O-H de l'eau (H_2O adsorbé) provenant de l'ettringite [37] ;
- Détection du quartz (SiO_2) des C-S-H par une bande large et intense de l'ordre de 3460 cm^{-1} , accompagné d'une bande variable vers 2099 cm^{-1} et un pic intense autour de 980 cm^{-1} , correspondant à la vibration de la liaison Si-O [36, 39,40].
- La présence de la calcite est également détectée : des bandes vers 1420 cm^{-1} , 1425 cm^{-1} et 1435 cm^{-1} , accompagnées d'un pic à 874 cm^{-1} proviennent des vibrations de CO_3^{2-} du

CaCO_3 résulte des réactions du CO_2 atmosphérique avec l'hydroxyde de calcium [38,40, 41].

- Les bandes à 460 cm^{-1} et 472 cm^{-1} sont dues au mode de vibration du groupement silicate (SiO_4^{4-}) [36] ;

On conclut que l'ensemble des spectres infrarouges des matériaux témoins et des matériaux modifiés présentent presque les mêmes raies, l'analyse de ces spectres montre la formation de la portlandite et de l'ettringite qui sont le résultat des réactions d'hydratations [33]. Ceci est cohérent avec l'analyse DRX.

III.2.4. Analyse Thermogravimétrique (ATG) et Analyse Thermique Différentielle(ATD)

L'ATD est généralement associé à une analyse thermogravimétrie (ATG) qui consiste à mesurer la variation de masse d'un échantillon soumis à un traitement thermique. L'utilisation de la thermogravimétrie nous permet ici de quantifier les phases hydratées formées au cours de l'hydratation des matériaux S/S.

Les courbes résultats des analyses ATD/ATG sur les matériaux de référence FOP et FOM sont présentées sur la figure III.17. La courbe ATG est présentée en noire et la courbe ATD en bleu.

Les thermogrammes des matériaux de référence FOP et FOM présentent dans notre cas trois effets de nature endothermique ;

Le premier pic observé entre 100 et 400°C concernent la décomposition des trisulfoaluminate de calcium hydraté (AFt) et des C-S-H [36]. Le pic entre 400 et 600°C associé à la deshydroxylation de la portlandite [42]. Enfin le pic entre 600 et 800°C qui est attribués à la décarbonatation de la calcite. Ainsi, la perte de masse, est constituée du départ du CO_2 [34].

Les figures III.18 et III.19 représentent les courbes ATD-ATG des matériaux F1P, F5P, F6P et F2M sélectionnés parmi d'autres. En général, différentes pertes de masse correspondant à des déshydratations ou des changements de phases sont observées. Les figures III.18 et III.19 montrent des pics exothermiques pour tous les matériaux étudiés qu'on a interprétés en se référant à la littérature comme suit :

- La plage de température de 50°C à 200°C : cette partie correspond au départ d'une partie d'eau combinée dans les C-S-H et l'ettringite [43-45].
- La plage de température de 200 à 600°C : cette phase correspond à la déshydratation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dont la réaction chimique est: $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ [34]. Il est à noter que la portlandite est un composé important dans une pâte du ciment. Elle est issue de l'hydratation des minéraux principaux dans le ciment à savoir : C_2S et C_3S . Noumowé

[46] et plusieurs chercheurs s'accordent que la plage de température entre 400 et 450°C correspond à la dégradation de la portlandite, donc, la diminution de la résistance à la compression des matériaux lorsqu'ils sont exposés à une température qui dépasse les 400°C.

- La plage de température de 600 à 800°C : cette partie attribuée à la décarbonation de la calcite CaCO_3 [34].
- Concernant le matériau F5P, le pic ATD exothermique (801°C) désigne la décomposition du carbonate de calcium. La faible intensité de ce pic explique le taux faible de carbonate dans le kaolin [47].

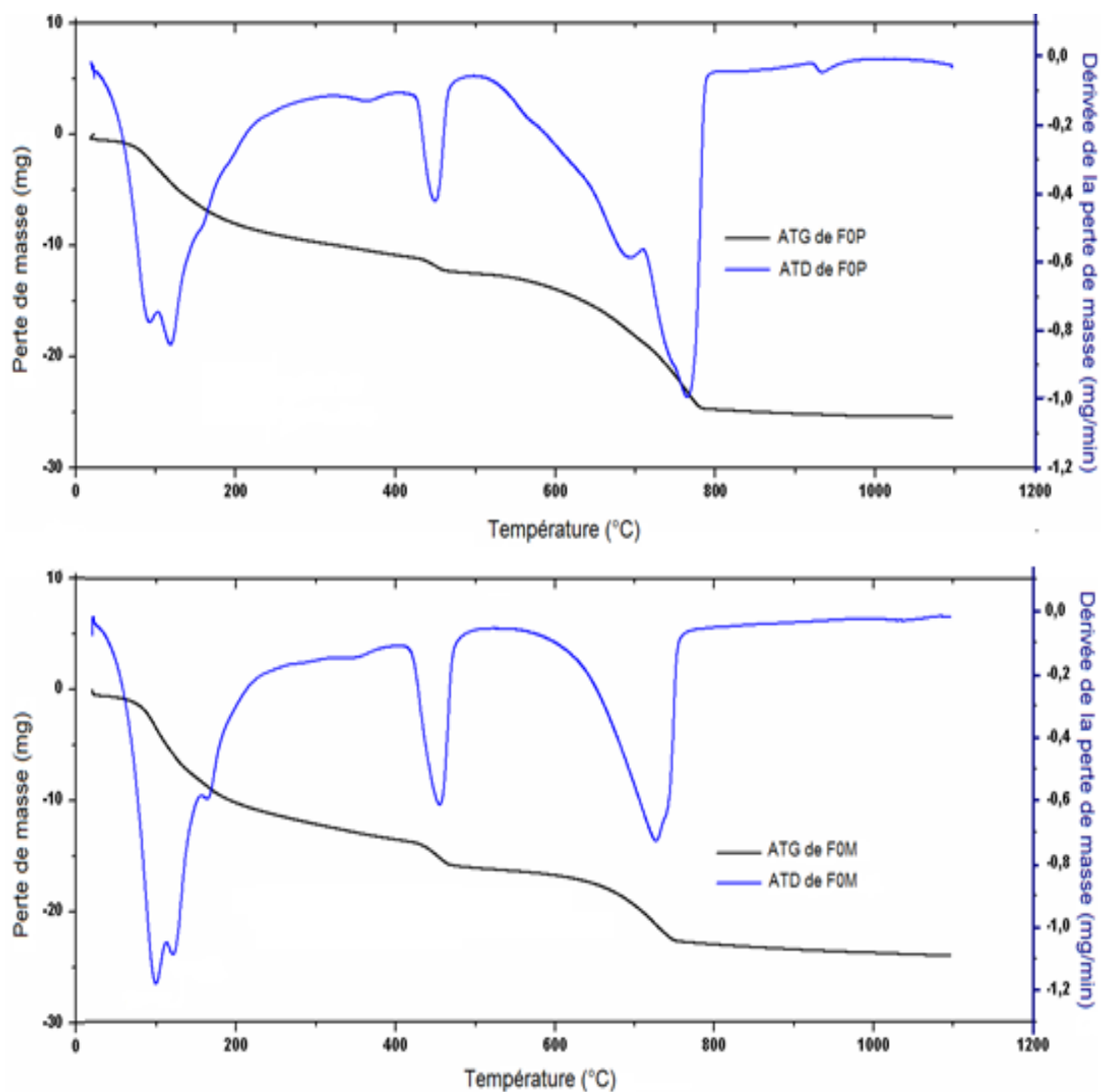


Figure III.17. Thermogrammes ATG/ATD des matériaux F0M et F0P [34].

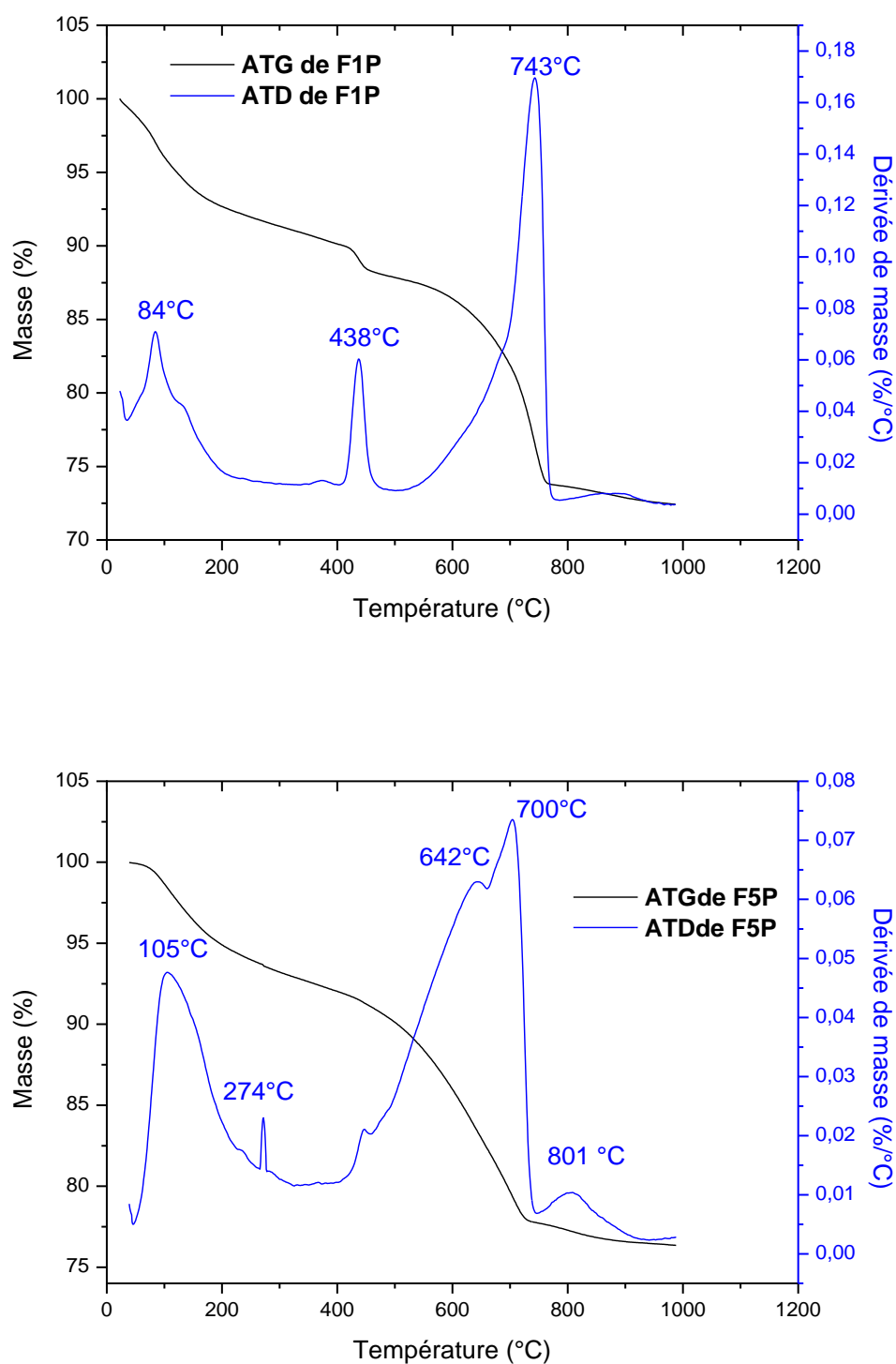


Figure III.18. Thermogrammes ATG/ATD des matériaux F1P et F5P obtenues par analyse thermogravimétrique à l'âge de 28 jours.

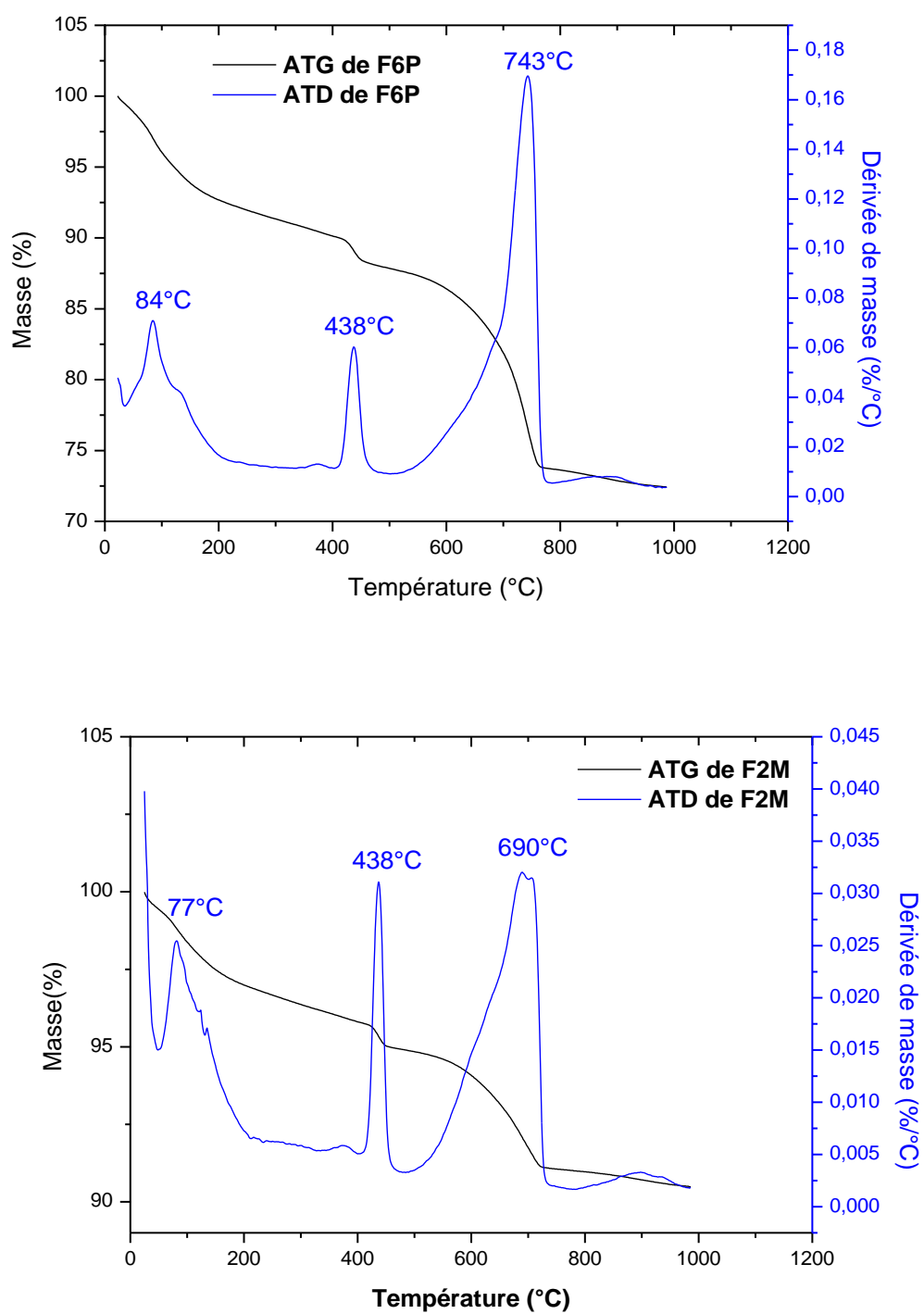


Figure III.19. Thermogrammes ATG/ATD des matériaux F6P et F2M obtenues par analyse thermogravimétrique à l'âge de 28 jours.

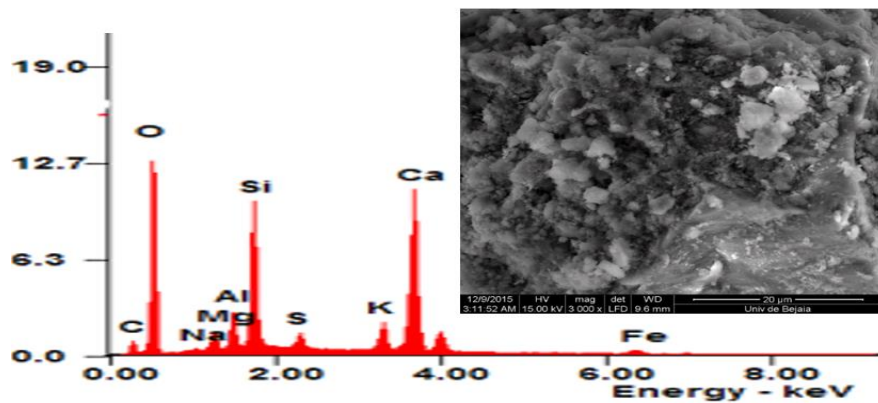
III.2.5. Analyse par microscope électronique à balayage (MEB-EDX)

Cette technique de caractérisation microstructurale, nous a permis de visualiser des caractères morphologiques de nos matériaux, et permettent de mieux comprendre le comportement des déchets dans la matrice cimentaire.

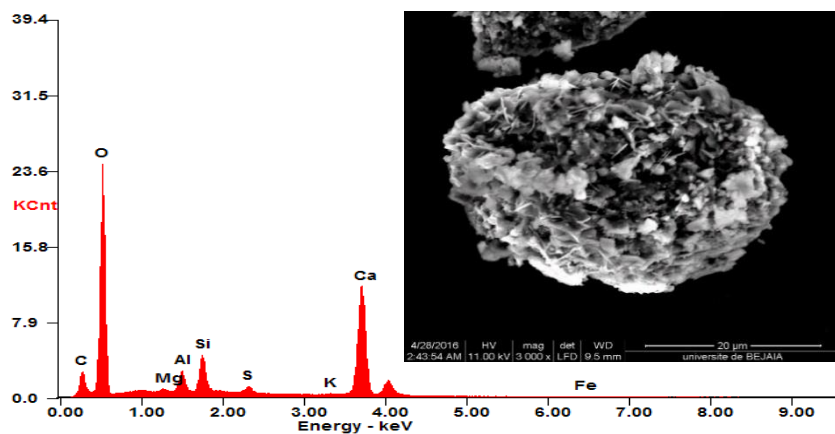
Sur la figure III.20, on observe les clichés de la morphologie des matrices témoins F0P et F0M. La figure présente des assemblages de grains blanchâtres et grisâtres. Les spectres EDX montrent la présence des composants principaux des hydrates, à savoir C-S-H, portlandite, et ettringite. Les résultats d'analyse MEB-EDX effectuée sur des poudres fines des matériaux F1P F5P, F6P et F2M sont confinés sur les figure III.21 et III.22.

Les clichés montrent clairement une structure hétérogène cristallisée sous formes de grains plus au moins uniforme. Les interstices entre les grains forment des pores, la porosité apparente est relativement élevée.

Les spectres EDX révèlent des pics intenses d'oxygène, de calcium et de silicium ce qui montre que les matrices sont constituées des mêmes hydrates que les matrices témoins, à savoir C-S-H, portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ettringite et la calcite (CaCO_3).

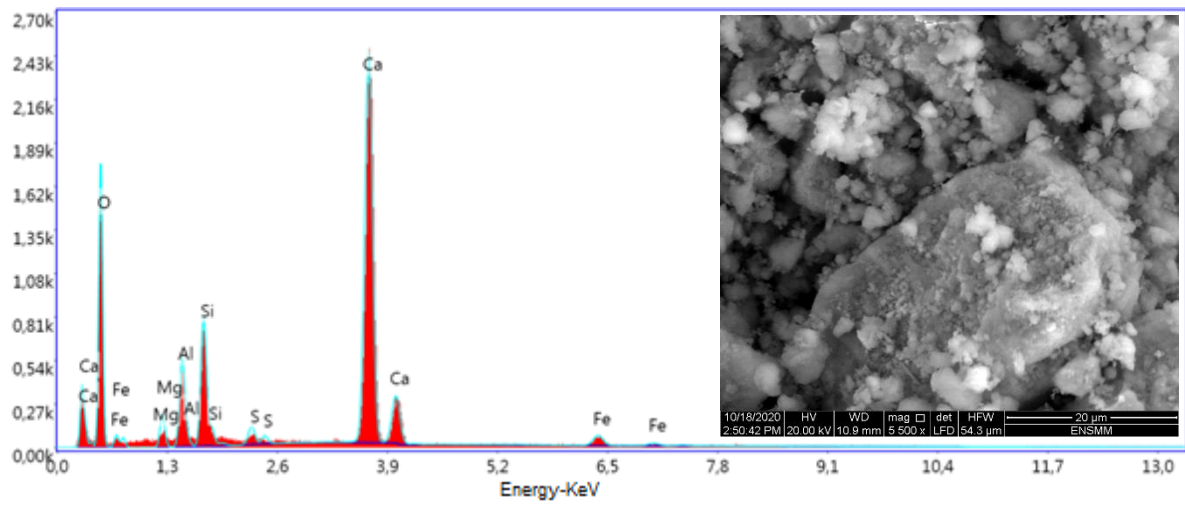
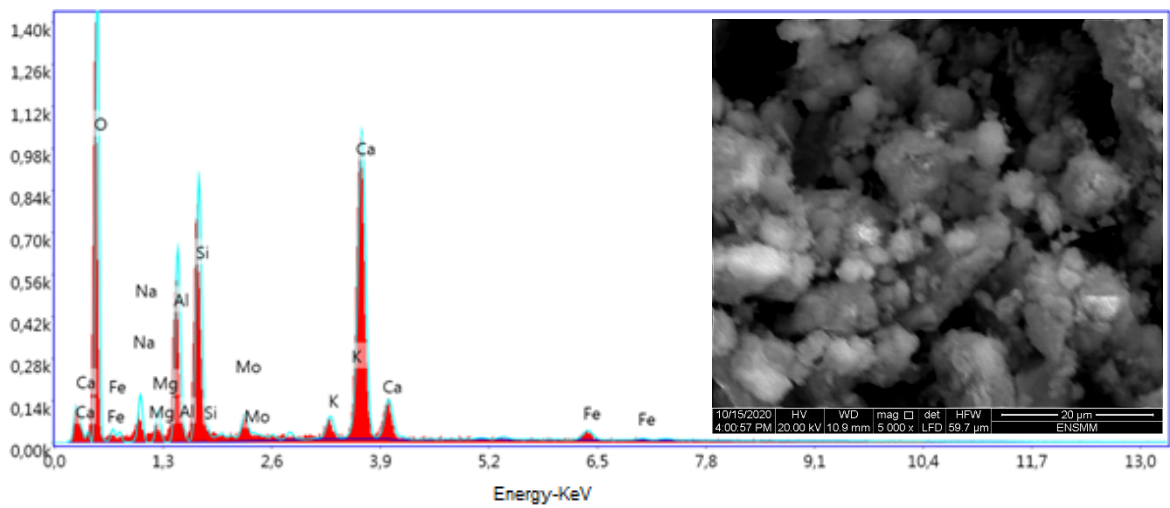


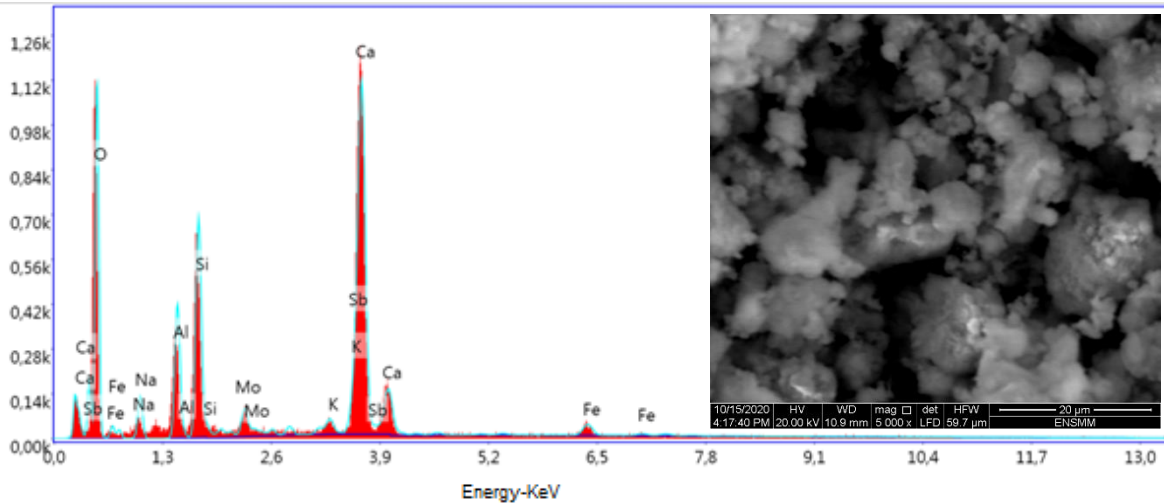
a. F0M



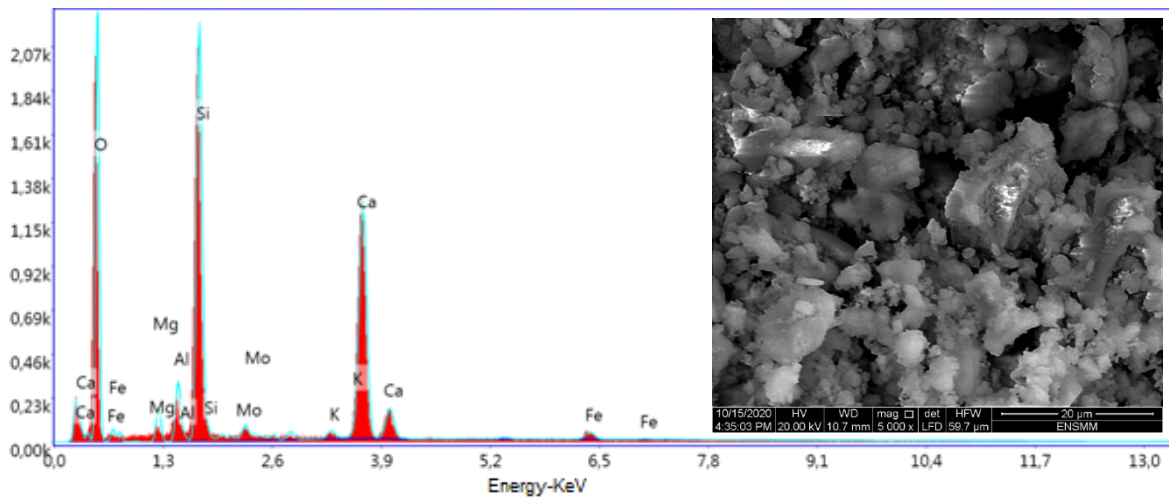
b. F0P

Figure III.20. Micrographies et spectres EDX des matériaux témoins F0P et F0M

**a. F1P****b. F5P****Figure III.21.** Morphologie et spectres EDX des matériaux F1P et F5P.



c. F6P



d. F2M

Figure III.22. Morphologie et spectres EDX des matériaux F6P et F2M.

III.2.6. Comportement à la lixiviation des matériaux solidifiés/stabilisés

III.2.6.1. Test de l'influence du pH (IpH)

Ce test permet d'appréhender la résistance potentielle des matériaux stabilisés/solidifiés aux agressions acides. La figure III.23 présente la solubilité des éléments suivis en fonction du pH. L'analyse des résultats de chaque élément a fourni les informations suivantes :

- **Sulfates**

Les sulfates sont solubles sur toute la gamme de pH explorée, on remarque que la solubilité est importante pour les matériaux F1P et F5P cela est dû à la concentration élevée des ions SO_4^{2-} dans le lixiviat du CET (1024 mg/l et 850,02 mg/l). Il a été observé que les sulfates favorisent le relargage à des pH acide inférieurs à 7, d'où le maximum de solubilisation du sulfate est localisé aux alentours de pH=2.

▪ Potassium

La Figure III.23 fait apparaître une augmentation du relargage de potassium pour des pH très alcalins et acides, dans la zone de pH comprise entre 4 et 8, la concentration en potassium diminue et la teneur minimale est obtenue à un pH =7, on peut considérer donc la concentration de K solubilisé dépendante du pH des éluats. Ce résultat est cohérent avec celui qui est obtenu par Catherine (2003) [48], elle a constaté une légère augmentation de la solubilisation du potassium pour les substances très alcalines (supérieures à 11) et acides (inférieures à 6) qui pourrait être dû à la dégradation des matériaux aux zones de pH estimées.

▪ Chlorure

La concentration en chlorures ne présente pas de grandes variations, mais on note certaines évolutions sur la figure III.23, cette dernière montre une solubilité importante au début de l'attaque acide cependant on atteint un minimum de solubilisation dans la zone du pH neutre (autour de 7). Pour la région basique, la solubilité augmente légèrement à nouveau, mais son niveau reste inférieur à celui de la région acide. La solubilité du chlorure peut être considéré indépendante du pH.

▪ Zinc

Le zinc est soluble sur toute la gamme de pH explorée, mais en milieu plus acide, le zinc est plus solubilisé par rapport au milieu basique (figure III.23). L'échantillon 1 du lixiviat contient une quantité importante de Zinc (40.30 mg/l). Cela explique les niveaux de concentrations élevés obtenus pour le matériau F1P, En général, les concentrations du zinc relarguées en fonction du pH sont faibles, deux hypothèses peuvent être formulées pour expliquer ce comportement [49] :

- le zinc est précipité « seul » sous forme d'hydroxyde de zinc ou d'hydroxyzincate de calcium ;
- le zinc est adsorbé sur la matrice et notamment en surface des C-S-H ;

▪ Plomb

La figure III.23 représente la concentration du plomb dans la solution en fonction du pH. Le niveau des concentrations obtenues dans le matériau F1P est importante par rapport aux autres, et il est dû à la concentration élevée du plomb (20 mg/l) dans le déchet ajouté (Echantillon 1 du lixiviat).

Pour les pH inférieurs à 7, la concentration en plomb augmente avec la diminution du pH. Fourcy avait observé que la concentration en silicium, provenant de la solubilisation des

C-S-H, présentait le même comportement [50]. Le plomb est incorporé dans les C-S-H, par addition ou substitution du calcium [51], Il se pourrait donc que le plomb présent pour des faibles pH, provienne des C-S-H et soit libéré lors de leur solubilisation. Le maximum de solubilisation du plomb est localisé aux alentours de $\text{pH}=2$ pour tous les matériaux.

- **Fer**

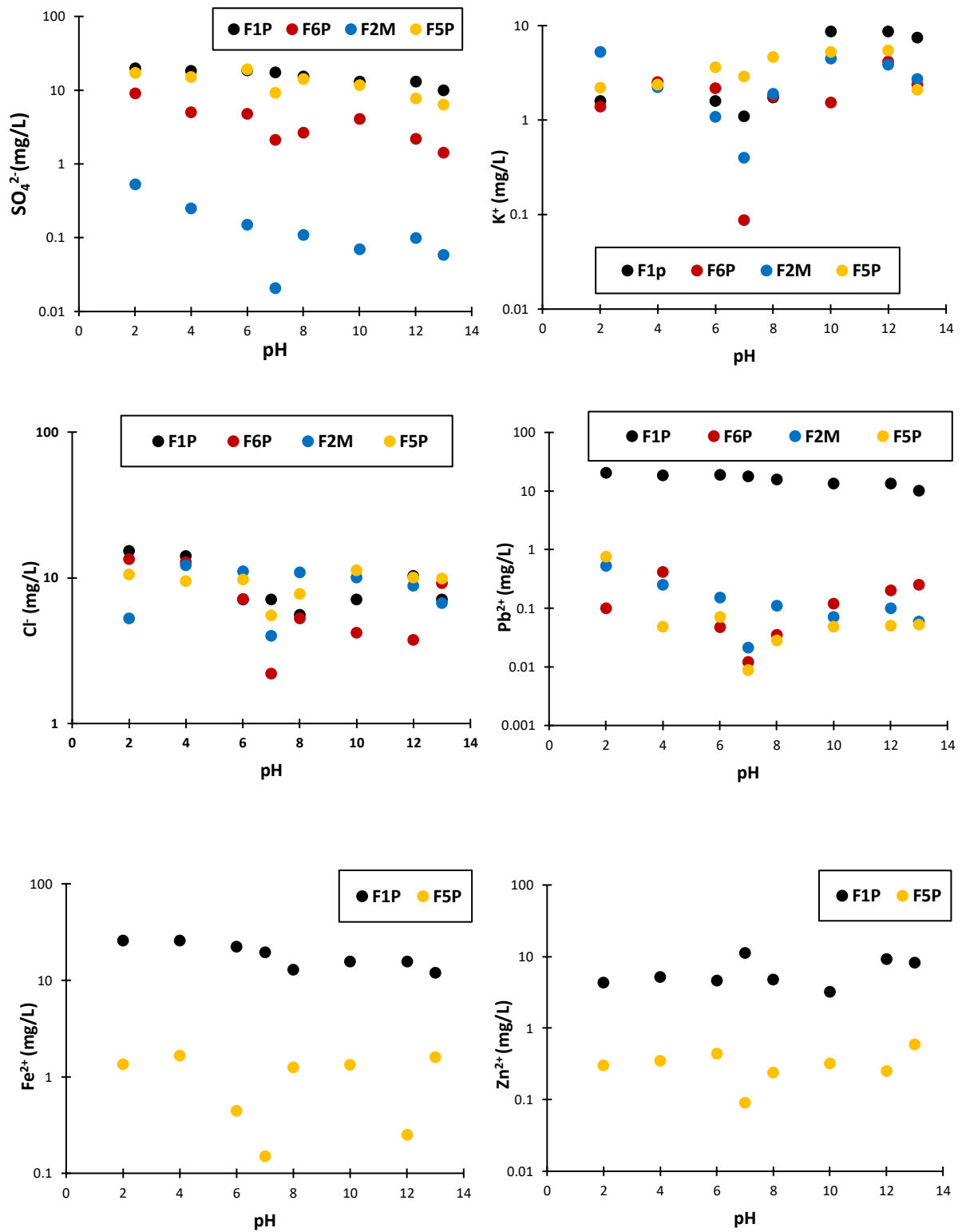
Le fer est soluble sur toute la gamme de pH, selon la figure III.23, on constate que le fer est plus soluble en milieu acide que le milieu basique, d'où la solubilisation est importante pour un pH compris entre 2 et 7 puis on constate une légère diminution avec l'augmentation de pH et la teneur minimale est obtenue a un $\text{pH} = 13$.

- **Cadmium**

Le comportement du cadmium est semblable pour les deux matériaux (figure III.23) avec une faible mobilisation en milieu basique ($\text{pH} > 8$). Lorsque le pH s'abaisse en dessous de 8, la solubilisation augmente et devient maximale lorsque le $\text{pH}= 2$. Ce comportement peut être attribué à la faible solubilité d'hydroxyde de cadmium ($\text{Cd}(\text{OH})_2$) formé au cours de l'hydratation, en milieu alcalin[52].

- **Nickel**

Le nickel a une solubilité qui se comporte de manière identique avec celle du cadmium. Le niveau de solubilisation en milieu acide est supérieur à celui que l'on rencontre en milieu basique, et le maximum de solubilisation du Nickel est localisé autours de de $\text{pH}=2$, ce comportement est peut être dû à la dissolution du nickel qui a substitué le calcium qui se trouve sur la surface de silicate de calcium hydraté par l'effet d'acide [34, 53].



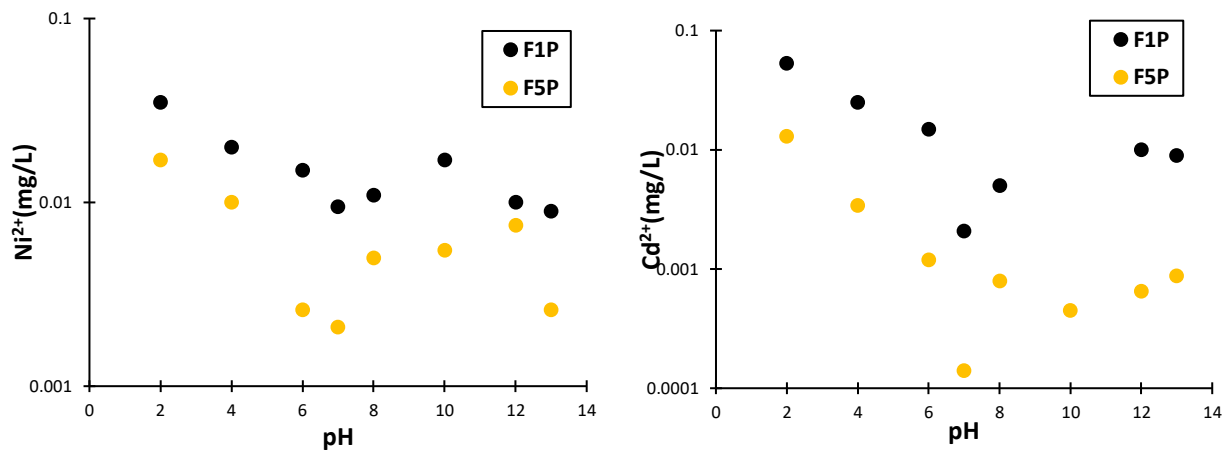


Figure III.23. Solubilité des espèces chimiques en fonction du pH.

III.2.6.2. Tests de l'eau de pores (EP) et de la fraction maximale mobilisable (FMM)

La figure III.24 présente les valeurs de pH obtenues en fonction du rapport L/S. L'évolution générale du pH est la même pour les quatre matériaux : il augmente avec la diminution du rapport L/S. La basicité des matériaux est due à la présence des ions OH⁻ qui viennent de la dissolution de la portlandite formée pendant le procédé S / S ; ces derniers sont précipités dans les pores des matrices cimentaires. Le lixiviat peut facilement pénétrer dans ces pores, en présence de Na⁺ et K⁺. De ce fait, KOH et NaOH se formeront et le milieu devient basique [54-55]. Cependant, la solubilité des espèces chimiques en fonction du rapport L/S est illustrée en figure III.25.

▪ Potassium et chlorure

La solubilisation du potassium et du chlorure diminue avec la dilution c'est-à-dire avec l'augmentation du ratio L/S, leurs concentrations dépendent du ratio L/S, ces concentrations sont proches pour tous les matériaux. Le potassium provient de la dissolution quantitative de phase fortement soluble (KOH). Les concentrations de Na et K dans les solutions à rapports L/S grandissant correspondent à la solubilisation d'une même masse de Na et K dans différents volumes d'eau. On peut déduire que l'eau des pores contient pratiquement toute la quantité disponible de ces éléments.

▪ Sulfates

La concentration en sulfate des éluats est la plus faible pour L/S = 200 et augmente avec la diminution du ratio L/S, la concentration maximale est atteinte pour L/S = 2.

D'après la littérature, l'ettringite est plus soluble pour des pH croissants [56] (et qui correspond dans le cas de ce test à des rapports L/S décroissants) ce qui explique la croissance du relargage du sulfate avec le pH.

▪ Plomb, zinc, fer, nickel et cadmium

La concentration des métaux lourds (Pb, Fer, Zn, Ni et Cd) solubilisé augmente avec la diminution du rapport L/S, ces éléments sont des métaux amphotères, semble avoir une solubilité en accord avec la variation du pH, ça peut s'expliquer par l'immobilisation de ces éléments dans les matériaux S/S dans les phases formées pendant l'hydratation [34, 53].

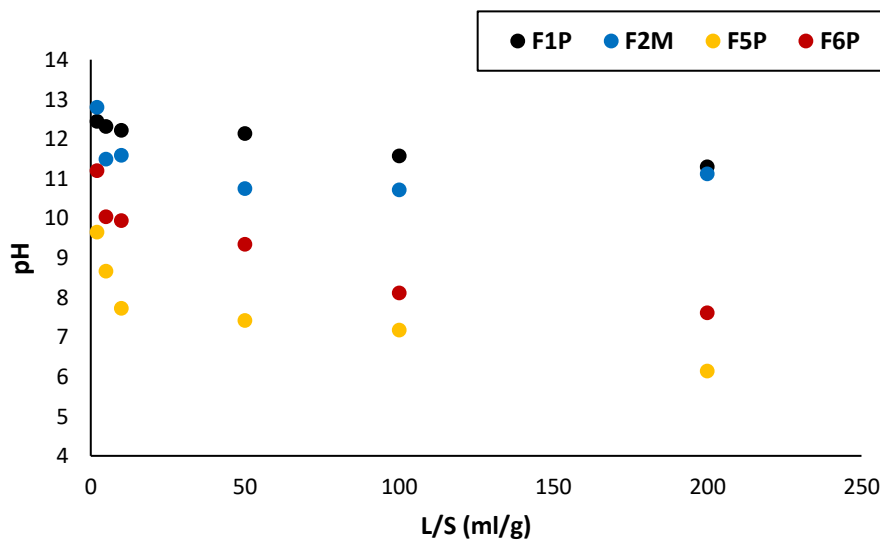
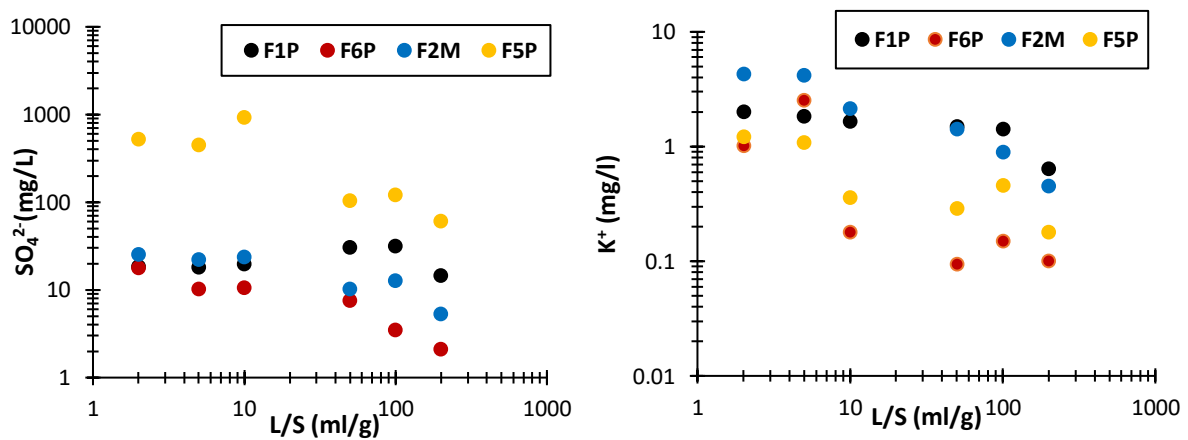


Figure III.24. L'évolution du pH en fonction du rapport L/S.



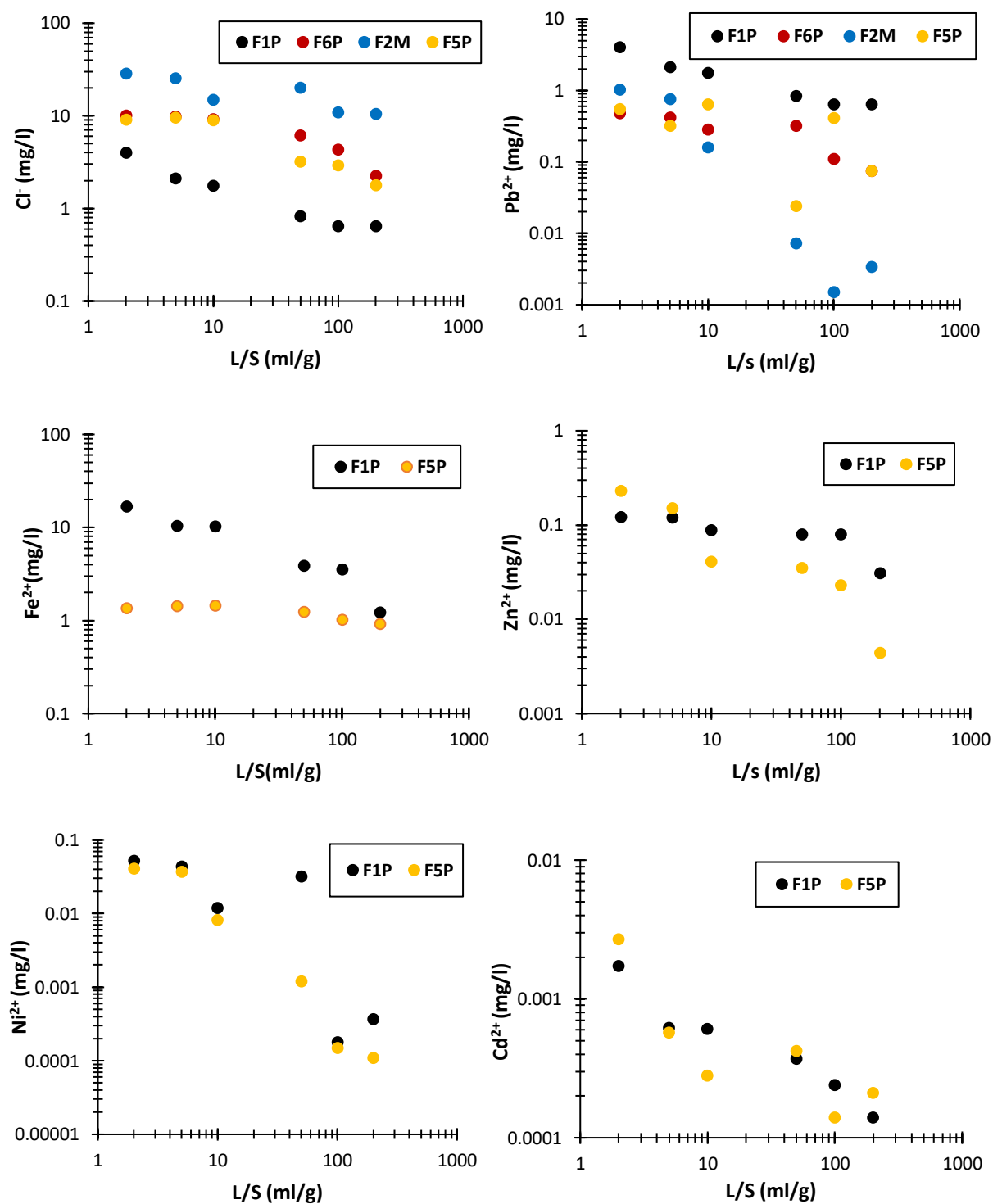


Figure III.25. Concentration en mg/L des éléments suivis du test EP et FMM.

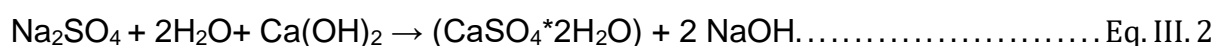
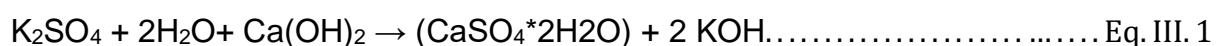
III.2.6.3. Test de lixiviation sur monolithe (TLM)

Les résultats du test TLM appliqué aux matériaux sélectionnés sont rapportés sur les figures III.26 et III.27 sous la forme du flux de relargage en fonction de pendant 64 jours de lixiviation en milieu neutre et sulfaté. Le test TLM est un test dynamique, c'est à dire qu'on s'intéresse à la dynamique de mobilisation. Pour que les résultats du test TLM soient valides, il est nécessaire de renouveler la solution de lixiviation suffisamment ET fréquemment pour qu'aucune espèce suivie n'atteigne jamais sa limite de solubilité dans le lixiviat.

En générale, quel que soit le type du milieu, les flux de tous les métaux sont globalement assez proches d'une pente de $-0,5$ au début de la lixiviation [21]. Nous pouvons donc supposer que le relargage de ces éléments est principalement dirigé par la diffusion, puis les flux diminuent plus rapidement, la diminution des quantités relarguées est probablement liée au phénomène d'épuisement du déchet libre qui se trouve sur les surfaces des cubes.

D'après les figures III.26 et III.27, On observe que les flux totaux relargués des espèces dans le milieu sulfaté sont supérieurs à ceux du milieu neutre, ceci est dû à la force ionique élevée de la solution sulfatée par rapport à celle de l'eau déminéralisée [34]. La présence des blocs dans la solution sulfatée donnant naissance à des composés nouveaux expansifs à partir des constituants du ciment.

Les sulfates réagissent avec la portlandite pour former du gypse et de l'hydroxyde alcalin suivant les réactions :



Le gypse secondaire formé lors de la première étape réagit avec les aluminates présents dans la pâte de ciment pour former l'ettringite secondaire. L'ettringite secondaire est dite expansive et provoquera des déformations du matériau ainsi que des fissurations [57-59].

Les résultats du test TLM montrent que les flux totaux relargués des espèces à partir des formulations activées par Na_2SO_4 (F5P et F6P) sont supérieurs aux autres formulations (F1P et F2M), selon Saidat 2013, la porosité des mélanges activés par Na_2SO_4 est le plus souvent supérieure à celle des mélanges non activés, L'accroissement de la porosité conduit à la libération importante des métaux lourds [60].

Les taux de rétention des espèces chimiques suivies pendant 64 jours (qui est l'équivalent de 96 ans de relargage) consignés dans le tableau III.5 démontrent l'efficacité du procédé de S/S des déchets du CET par les liants hydrauliques.

Tableau III.5. Flux totaux de rétention des espèces chimiques pour les formulations F1P, F5P, F6P et F2M pendant 64 jours de lixiviation

	Taux de rétention pendant 64 jours de F1P(%)		Taux de rétention pendant 64 jours de F5P (%)	
	Milieu neutre	Milieu sulfaté	Milieu neutre	Milieu sulfaté
Pb ²⁺	99,99	99,96	99,93	99,89
Zn ²⁺	99,99	99,97	99,64	99,18
Cd ²⁺	99,85	99,77	99,95	99,51
Ni ²⁺	99,52	99,03	99,45	98,82
Fe ²⁺	99,63	99,35	99,7	98,4
	Taux de rétention pendant 64 jours de F6P(%)		Taux de rétention pendant 64 jours de F2M(%)	
	Milieu neutre	Milieu sulfaté	Milieu neutre	Milieu sulfaté
Pb ²⁺	99,90	99,74	99,96	99,93

En général, on constate que les quantités relarguées des métaux lourds sont très faibles par rapport au contenu total de ces éléments dans les boues et les lixiviats. Il est à noter que sur le dernier renouvellement de lixiviat, on constate la formation des précipités blancs sur la surface extérieure du bloc monolithe ces précipités sont attribués à la calcite (CaCO₃) [21], ce qui signifie que la réaction de carbonatation du calcium a eu lieu malgré les conditions prévues pour protéger les matériaux de tels effets.

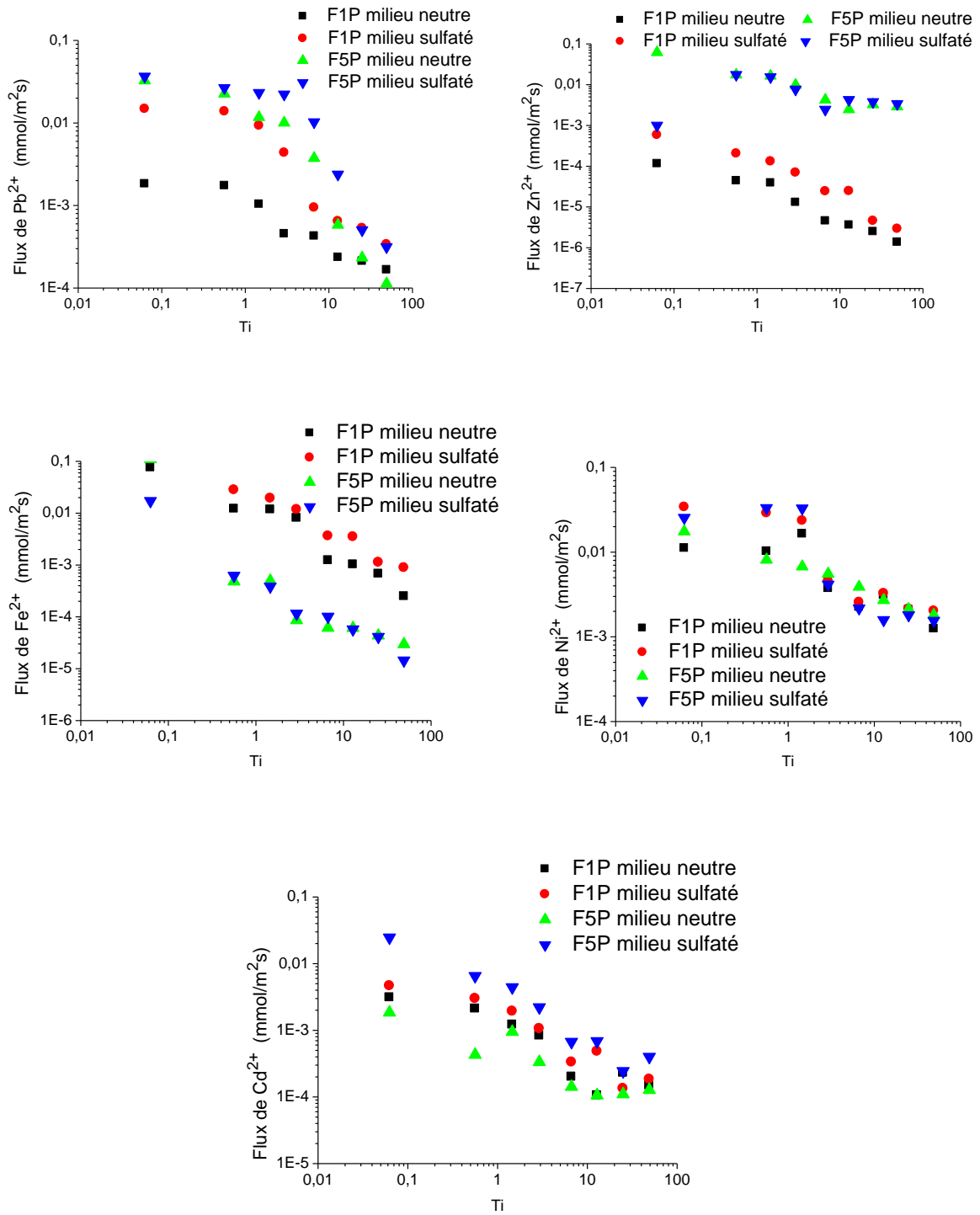


Figure III.26. Evolution des flux rélargués des éléments suivis (Pb^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} et Cd^{2+}) en fonction du temps moyen T_i pour les matériaux F1P et F5P

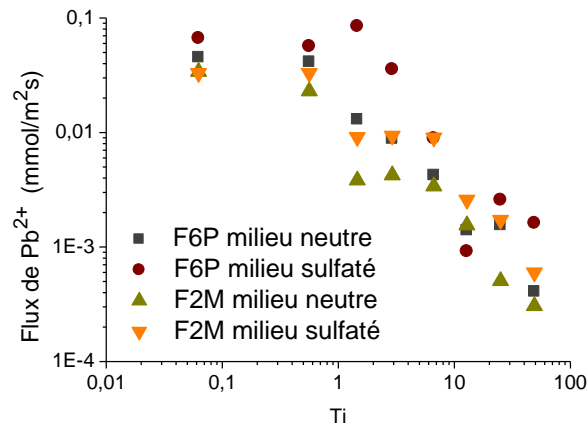


Figure III.27. Evolution des flux relargués de plomb (Pb^{2+}) en fonction du temps moyen T_i pour les matériaux F6P et F2M.

III.3. SYNTHESE DES RESULTATS

✓ Ce chapitre rapporte les résultats de l'ensemble des expériences expérimentales réalisées sur les déchets bruts du CET ainsi que les essais de traitement de ces derniers par le procédé de S/S. Les mesures des résistances mécaniques et l'observation de la microstructure du déchet traité permettent d'orienter le choix du liant et la formule du traitement à adopter. Pour juger de l'efficacité du procédé de traitement par S/S et pour identifier les mécanismes de relargage des métaux lourds, nous avons appliqué un ensemble de tests de lixiviation composés de test de Capacité de Neutralisation Acide (CNA) et de test de l'Eau de Pores (EP) et de test dynamiques (test de lixiviation sur monolithe (TLM)). L'exploitation des résultats obtenus dans cette partie expérimentale nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

➤ L'analyse des échantillons bruts (boue et lixiviat) du CET de SIDI-BBOUDRAHEM –Bejaia montre que les concentrations moyennes des métaux lourds à savoir : le Plomb, le fer, le zinc, le cadmium et le nickel sont très importantes par rapport aux normes. Les boues sont contaminées au moins par le plomb qui a une concentration d'ordre de 94.4 mg/Kg et 72 mg/Kg dans les boues 1 et 2 respectivement. Concernant les lixiviats, ils sont riches en métaux lourds surtout le cadmium et le nickel, ses concentrations dépassent largement les normes exigées ;

➤ Les résistances mécaniques diminuent avec l'augmentation de la quantité des CKD dans les formulations. L'affaiblissement des résistances mécaniques des formulations est engendré par la diminution des quantités des phases minéralogique du ciment dans le mélange vu la substitution du ciment. Les résistances présentées par les formulations malgré l'incorporation du déchet restent importantes et dépassent largement la norme qui est de l'ordre

de 1MPa excepté celle de la formulation F4P (100% CKD). Les résistances mécaniques des mortiers sont supérieures à celles des pâtes ; cela est dû à la réduction de la porosité grâce à la présence du sable. Les formulations activées par 4%NS présentent à 7 jours une résistance importante par rapport à celle de référence, à 28 jours. L'incorporation de sulfate de sodium induit une baisse de résistance. Ce comportement, associé à une cinétique élevée de réactions aux jeunes âges puis à une cinétique ralentie à plus long terme ;

➤ L'analyse des matériaux par DRX, IR-TF, MEB et ATG nous a permis d'identifier les principales phases de ciment hydraté (Portlandite, C-S-H et ettringite) ;

➤ Il ressort de test de l'influence du pH (IpH) que les espèces suivi ont deux comportements de solubilisation, des éléments qui dépendent du pH du lixiviat (Ni^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} et SO_4^{2-}) et d'autres qui ne dépendent pas du pH (Cl). La capacité de neutralisation acide dépend non seulement de la quantité de ciment initialement utilisée mais aussi de la quantité de déchet ajoutée ;

➤ Les résultats des tests de l'eau de pores (EP) et de la fraction maximale mobilisable (FMM), sur matériaux S/S, ont montré que la solubilisation des éléments chimiques diminue avec l'augmentation du rapport L/S. Cela suppose que les éléments provenaient de la dilution progressive d'une quantité initialement disponible. Ce qui confirme que les rapports L/S ont une incidence sur les concentrations d'espèces lessivées ;

➤ Les résultats du test de lixiviation dynamique (TLM) montrent que les taux des métaux lourds relargués dans le milieu sulfaté sont supérieurs à ceux relargués dans le milieu neutre, ceci est dû à la force ionique élevée de la solution sulfatée par rapport à celle de l'eau déminéralisée. Ce test présente les quantités, des métaux lourds, lixiviées pendant 64 jours (test normalisé équivalent de 96 ans de relargage), les résultats obtenus démontrent l'efficacité du procédé de S/S des déchets du CET investit ;

➤ La structure C-S-H capable de piéger les cations métalliques. De plus, le piégeage de divers métaux est très efficace comme le plomb, cadmium, zinc, nickel et le fer dans toutes les formulations de pâtes et de mortiers et avec n'importe quel type de déchet, d'où les concentrations des métaux lourds après le traitement par le procédé S/S sont très faibles par rapport aux concentrations initiales dans les déchets.

III.4. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CHARNAY, F. Compostage des déchets urbains dans les PED : Elaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost. Thèse de doctorat, 2005.
- [2] Journal Officiel de la République Démocratique Algérienne. Décret exécutif n° 06-141 du 20 Rabie El Aouel 1427, correspondant au 19 avril 2006, définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels. N° 26, 4-9p. 2006.
- [3] NF X31-211. Caractérisation du déchet -Essai de lixiviation d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification. AFNOR 2012.
- [4] ZENASNI, Mohamed Amine. Synthèse et caractérisation des nanocomposites biodégradables élaborés par trois procédés (intercalation en solution, polymérisation in situ et par voie fondue). Thèse de doctorat. Université de Lorraine, 2015.
- [5] FERNÁNDEZ, Raúl, NEBREDA, Belén, DE LA VILLA, Raquel Vigil, et al. Mineralogical and chemical evolution of hydrated phases in the pozzolanic reaction of calcined paper sludge. *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no 10, 2010.
- [6] EL FELS, Loubna. Suivi physico-chimique, microbiologique et écotoxicologique du compostage de boues de STEP mélangées à des déchets de palmier : validation de nouveaux indices de maturité. Thèse de doctorat, 2014.
- [7] TINTI, Anna, TUGNOLI, Vitaliano, BONORA, Sergio, et al. Recent applications of vibrational mid-Infrared (IR) spectroscopy for studying soil components: a review. *Journal of Central European Agriculture*, vol. 16, no 1, 2015.
- [8] TOURNIÉ, Aurélie. Analyse Raman sur site de verres et vitraux anciens : modélisation, procédure, lixiviation et caractérisation. Thèse de doctorat. Paris 6, 2009.
- [9] DORESWAMY, B. H., MAHENDRA, M., SRIDHAR, M. A., et al. A novel three-dimensional polymeric structure of crystalline neodymium malonate hydrate. *Materials Letters*, vol. 59, no 10, 2005.
- [10] ELZEIN, Tamara, NASSER-EDDINE, Mohamad, DELAITE, Christelle, et al. FTIR study of polycaprolactone chain organization at interfaces. *Journal of colloid and interface science*, vol. 273, no 2, 2004.

- [11] BELEBCHOUCHE, Ch, MOUSSACEB, K., TAHAKOURT, A., et al. Parameters controlling the release of hazardous waste (Ni^{2+} , Pb^{2+} and Cr^{3+}) solidified/stabilized by cement-CEM I. *Materials and Structures*, vol. 48, no 7, p. 2323-2338, 2015.
- [12] ATAHAN, HakanNuri, OKTAR, Osman Nuri, et TAŞDEMİR, Mehmet Ali. Effects of water–cement ratio and curing time on the critical pore width of hardened cement paste. *Construction and Building Materials*, vol. 23, no 3, p. 1196-1200, 2009.
- [13] HUI, Zhao, POON, Chi Sun, et LING, Tung Chai. Properties of mortar prepared with recycled cathode ray tube funnel glass sand at different mineral admixture. *Construction and Building Materials*, vol. 40, p. 951-960, 2013.
- [14] SHOAI B, M. M., BALAHA, M. M., et ABDEL-RAHMAN, A. G. Influence of cement kiln dust substitution on the mechanical properties of concrete. *Cement and concrete research*, vol. 30, no 3, p. 371-377, 2000.
- [15] STRUNGE, J., KNOEFEL, D., et DREIZLER, I. Effect of alkalies and sulfur on the properties of cement Part III: effect of alkalies and sulfate on the properties of cement taking into account the alumina ratio and the lime standard. *Zement-Kalk-Gips Ed. B*, vol. 39, no 7, p. 380-6, 1986.
- [16] STRUNGE, J., KNOEFEL, D., et DREIZLER, I. Effect of alkalies and sulfur on the properties of cement Part I. Effect of the sulfur trioxide content on cement properties. *Zement-Kalk-Gips Ed. B*, vol. 38, no 3, p. 150-8, 1985.
- [17] MASLEHUDDIN, M., AL-AMOUDI, O. S. B., RAHMAN, M. K., et al. Properties of cement kiln dust concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 23, no 6, p. 2357-2361, 2009.
- [18] BHATTY, MS Y. Use of cement-kiln dust in blended cements. *World cement*, vol. 15, no 4, p. 126-132, 1984.
- [19] BHATTY, MS Y. Use of cement kiln dust in blended cements—alkali-aggregate reaction expansion. *World cement*, vol. 16, no 10, p. 386-392, 1985.

- [20] BHATTY, M. S. Y. Properties of blended cements made with Portland cement, cement kiln dust, fly ash, and slag. In : Proceedings of the International Congress on the Chemistry of Cement. p. 118-127, 1986.
- [21] IMYIM, Apichat. Méthodologie d'évaluation environnementale des déchets stabilisés/solidifiés par liants hydrauliques. Thèse de doctorat. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2000.
- [22] CARTLEDGE, Frank K., BUTLER, Leslie G., CHALASANI, Devi, et al. Immobilization mechanisms in solidification/stabilization of cadmium and lead salts using portland cement fixing agents. *Environmental science & technology*, vol. 24, no 6, p. 867-873, 1990.
- [23] COCKE, David, ORTEGO, J. Dale, MCWHINNEY, H., et al. A model for lead retardation of cement setting. *Cement and concrete research*, vol. 19, no 1, p. 156-159, 1989.
- [24] THOMAS, N. L., JAMESON, Donald A., et DOUBLE, D. D. The effect of lead nitrate on the early hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, vol. 11, no 1, p. 143-153, 1981.
- [25] KHATIB, J. M. et WILD, S. Pore size distribution of metakaolin paste. *Cement and Concrete Research*, vol. 26, no 10, p. 1545-1553, 1996.
- [26] POON, C.-S., LAM, L., KOU, S. C., et al. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. *Cement and concrete research*, vol. 31, no 9, p. 1301-1306, 2001.
- [27] MARCIANO, E. et BATTAGIN, A. F. The influence of alkali activator on the early hydration and performance of Portland blast furnace slag cement. In: Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg. 1997.
- [28] SILVA, Marcia et NAIK, Tarun R. Sustainable use of resources—recycling of sewage treatment plant water in concrete. In : Proceeding of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Ancona, Italy :UniversitaPolitecnicadelle Marche, 2010.
- [29] TAHA, R., AL-HARTHY, A. S., et AL-JABRI, K. S. Use of production and brackish water in concrete. In: Proceedings International Engineering Conference on Hot Arid Regions (IECHAR 2010. March 1-2, Al-Ahsa, Kingdom of Saudi Arabia. p. 127-132, 2010.

- [30] KATANO, Keisaburo, TAKEDA, Nobufumi, ISHIZEKI, Yoshikazu, et al. Properties and application of concrete made with sea water and un-washed sea sand. In : Proceedings of Third International conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. 2013.
- [31] AL-JABRI, K. S., AL-SAIDY, A. H., TAHA, Rb, et al. Effect of using wastewater on the properties of high strength concrete. *Procedia Engineering*, vol. 14, p. 370-376, 2011.
- [32] NF X31-211. Caractérisation du déchet -Essai de lixiviation d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification. AFNOR 2012.
- [33] GOUGAR, M. L. D., SCHEETZ, B. E., et ROY, D. M. Ettringite and C-S- H Portland cement phases for waste ion immobilization: A review. *Waste management*, vol. 16, no 4, p. 295-303, 1996.
- [34] BELEBCHOUCHE, Cherif. Etude expérimentale du comportement des matériaux cimentaires exposés à des environnements chimiquement agressifs et modélisation de la lixiviation. Thèse de doctorat. Université de Béjaïa-Abderrahmane Mira, 2015.
- [35] SWANEPOEL, J. C. et STRYDOM, C. A. Utilisation of flyash in a geopolymeric material. *Applied geochemistry*, vol. 17, no 8, p. 1143-1148, 2010.
- [36] BELLACHE, Dihia. Stabilisation/Solidification et valorisation des déchets ultimes organiques et inorganiques, application aux résidus pétroliers de fond de bacs. Thèse de doctorat. Université de Béjaïa-Abderrahmane Mira, 2019.
- [37] KEDZIORA, Charlotte. Propriétés d'usage et mécanismes d'hydratation du système ternaire [Ciment Alumineux–Sulfate de Calcium–Laitier de Haut Fourneau] à haute teneur en sulfate de calcium : De l'approche expérimentale à la modélisation. Thèse de doctorat, 2015.
- [38] SUZUKI, Kazutaka, NISHIKAWA, Tadahiro, et ITO, Suketoshi. Formation and carbonation of CSH in water. *Cement and Concrete research*, vol. 15, no 2, p. 213-224, 1985.
- [39] TINTI, Anna, TUGNOLI, Vitaliano, BONORA, Sergio, et al. Recent applications of vibrational mid-Infrared (IR) spectroscopy for studying soil components: a review. *Journal of Central European Agriculture*, vol. 16, no 1, p. 0-0, 2015.
- [40] MOLLAH, Mohammad YA, KESMEZ, Mehmet, et COCKE, David L. An X-ray diffraction (XRD) and Fourier transform infrared spectroscopic (FT-IR) investigation of the

long-term effect on the solidification/stabilization (S/S) of arsenic (V) in Portland cement type-V. *Science of the Total Environment*, vol. 325, no 1-3, p. 255-262, 2004.

[41] MARTINEZ-RAMIREZ, Sagrario. Influence of SO₂ deposition on cement mortar hydration. *Cement and concrete research*, vol. 29, no 1, p. 107-111, 1999.

[42] BAROGHEL-BOUNY, Véronique, CHAUSSADENT, Thierry, CROQUETTE, Gilles, et al. Méthode d'essai n°58 : Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons, Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées, 2002.

[43] GARBEV K. Structure, properties and quantitative Rietveld analysis of calcium silicate hydrates (C-S-H Phases) crystallised under hydrothermal conditions. PhD Thesis, Institut für Technische Chemie von der Fakultät für Chemie und Geowissenschaften der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Germany; June 2004.

[44] STRYDOM CA, POTGIETER JH. An investigation into the chemical nature of the reactivity of lime. In: Justness H, editor. *Proceedings 10th international congress on chemistry of cement*. Sweden: Gothenburg; p. 20-49, 1997.

[45] FLORIAN CHALENCON, Etude des interactions rhéologie, fissuration et microstructure pour le développement d'un outil de formulation: Application aux mortiers poreux minces fibrés dédiés à l'ITE. Thèse doctorat, 2010.

[46] NOUMOWE, Albert. Effet de hautes températures (20-600 C) sur le béton : cas particulier du béton à hautes performances. Thèse de doctorat. Lyon, INSA, 1995.

[47] MEROUANE Abdellah M. Synthèse et caractérisation d'un ciment belitique riche en α -c₂s et de haute réactivité hydraulique. MEMOIRE DE MAGISTER THEME. Université Technologie d'Oran, 2009.

[48] FANTOZZI-MERLE, Catherine. Étude de matériaux à base de liant hydraulique contenant des polluants organiques modèles : propriétés structurales et de transfert. Thèse de doctorat. INSA de Lyon, 2003.

[49] PEYRONNARD, Olivier. Apports méthodologiques pour la modélisation du comportement à la lixiviation de résidus minéraux. Application aux solidifiants de boues d'hydroxydes métalliques. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.

- [50] FOURCY, Patrick. Stabilisation-solidification de REFIOM par une cendre volante de lit fluidisé: performances et mécanismes de transfert. Thèse de doctorat de l'UST Lille, 2000.
- [51] BHATTY M. S. Y. Fixation of metallic ions in portland cement, Proc 4th National Conf. Hazardous Wastes and Hazardous Materials, Washington D.C., pp 140-145, 1987
- [52] MACPHEE, DONALD E. et GLASSER, FREDRICK P. Immobilization science of cement systems. MRS bulletin, vol.18, no 3, p. 66-71, 1993.
- [53] CHEN, Q. Y., HILLS, C. D., TYRER, M., et al. Characterisation of products of tricalcium silicate hydration in the presence of heavy metals. Journal of Hazardous Materials, vol. 147, no 3, p. 817-825, 2007.
- [54] CHAABANE, Loubna, MOUSSACEB, Karim, et AÏT-MOKHTAR, Abdelkarim. Factors affecting the leaching of heavy metals (Ni^{+2} , Pb^{+2} , Cr^{+3}) contained in sludge waste stabilization/solidification by hydraulic benders, Part I: Water/cement and waste/cement ratio in S/S mortars. Environmental Progress & Sustainable Energy, vol. 36, no 1, p. 93-103, 2017.
- [55] MEHU, Jacques, BAZIN, Christine, et GRELIER-VOLATIER, Laurence. Classification réglementaire et éocompatibilité des déchets. Techniques de l'ingénieur. Environnement, vol. 2, no G2030, p. G2030. 4-G2030. 10, 2004,
- [56] WARREN, Clare J., REARDON, Eric J., The solubility of ettringite at 25°C. Cement and concrete Research, Vol. 24, n°8, p.1515-1524, 1994.
- [57] BELEBCHOUCHE, Cherif, MOUSSACEB, Karim, et AÏT-MOKHTAR, Abdelkarim. Evaluation of the encapsulation of nickel, chromium and lead-rich wastes in cement matrices by TCLP test. European Journal of Environmental and Civil Engineering, vol. 20, no 7, p. 711-724, 2016.
- [58] SANTHANAM, Manu, COHEN, Menashi D., et OLEK, Jan. Sulfate attack research—whither now?. Cement and concrete research, vol. 31, no 6, p. 845-851, 2001.
- [59] GLASSER, Fredrik Paul, SCRIVENER, Karen L. Sulfate Attack on Concrete - Recent Perspectives. American Concrete Institute, 234, 495-506, 2006.
- [60] SAIDAT, Fatma. Activation chimique du métakaolin dans une matrice cimentaire. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2013.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Nos travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre d'étude de la possibilité de Traitement de déchets du centre d'enfouissement technique par la stabilisation /solidification à l'aide de liants hydrauliques (ciment Portland), ainsi que d'étudier la possibilité d'application de cette technique au traitement de déchets liquides (lixiviats). La stabilisation/solidification (S/S) est une méthode économique de traitement dont l'efficacité à immobiliser les espèces inorganiques, cette technique permet de réduire le potentiel dangereux et la lixivibilité des éléments dangereux en convertissant ses contaminants dans des formes moins solubles, mobiles et toxiques.

Les objectifs fixés dans cette étude visent donc à une caractérisation large que possible des boues et des lixiviats résiduaire du centre d'enfouissement technique de SIDI-BOUDRAHEM Bejaia -Algérie, pour avoir une idée sur le caractère polluant de ces déchets, cela nous aider à la validation de ce procédé en terme d'immobilisation des métaux lourds à long terme, ainsi que comprendre le comportement des déchets stabilisés/solidifiés soumis à des milieux chimiquement agressifs. Pour faciliter l'atteinte de nos objectifs, nous avons effectué deux campagnes de prélèvements au niveau du CET de Bejaia (18 Avril 2016 et 27 Mars 2018).

La partie expérimentale comprend une première partie consacrée à la caractérisation des matériaux d'étude, la deuxième partie est dédiée à l'évaluation de matériaux stabilisés/solidifiés par la détermination des propriétés mécaniques et physiques des formulations adoptées (mortiers et pâtes de ciment), la dernière partie a été dédiée à l'étude du comportement à la lixiviation des matériaux confectionnés sous différents milieux (milieu pur et milieu sulfaté).

Diverses techniques de caractérisation (DRX, IR, MEB-EDX et ATG...etc.) ont été appliquées à nos matériaux afin d'évaluer l'influence de l'introduction des déchets du CET sur les propriétés mécaniques et environnementales des matériaux S/S.

Les principales conclusions obtenues dans cette étude sont :

➤ Les résultats d'analyse des déchets (lixiviats et boues) du CET ont révélé que ces derniers ont un caractère polluants dangereux d'où certains éléments dépassent les normes pour une classification en déchets dangereux. Les boues sont contaminées par le plomb qui a une concentration qui est d'ordre de 94.4 et 72 mg/Kg dans les échantillons 1 et 2 respectivement,

et les lixiviats sont riches en métaux lourds en particulier le nickel, le cadmium, le fer et le plomb.

Au regard des résultats obtenus ;

- Concernant les résistances mécaniques des matériaux de même âge (à la compression et à la flexion), les résultats obtenus sont très intéressants ils sont influencés par la nature de déchet (liquide ou solide) ainsi que par la teneur et la nature des polluants inorganiques présents dans le déchet. Il s'avère que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de CKD incorporé, cela est dû à la diminution des phases minéralogiques du ciment et à la composition chimique du CKD utilisé qui est pauvre en alcalis, il est à noter que la résistance de la formulation (100% CKD) est nulle. Les résultats montrent aussi que l'incorporation de métakaolin en substitution du ciment avec une teneur de 20% dans un matériau cimentaire entraîne un gain en résistance, l'ajout de l'activant (Na_2SO_4) conduit à une chute de résistance. Ainsi, l'analyse ATG/ATD a montré que les matériaux dopés par la boue ont des résistances faibles par rapport à ceux de référence (sans l'ajout du déchet), en général, toutes les résistances obtenues répondent aux normes en vigueur. Les meilleures résistances sont obtenues pour les matériaux F1P, F5P, F6P et F2M ;
- Les analyses par DRX et IR ont montré la présence de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de l'ettringite qui sont le résultat de réactions d'hydratations, ces analyses ont permis d'identifier les principales phases présentes dans nos matériaux à savoir C-S-H, $\text{Pb}(\text{OH})_2$ et d'autres phases complexes contenant des métaux lourds.
- Les tests de lixiviation, l'influence du pH (IpH), l'eau de pore (EP), la fraction maximale mobilisable (FMM), réalisés sur les formulations sélectionnées, ont comme objectif la détermination des propriétés intrinsèques des matériaux par rapport au comportement à la lixiviation en fonction du pH pour le test IpH, du ratio L/S et la quantité disponible pour lixiviation à l'état solide et en solution pour le test EP ;
- Le test de lixiviation dynamique sur monolithe (TLM) dans un milieu neutre (eau pure) et dans un milieu sulfaté permet d'étudier le relargage des espèces en fonction du temps. Les résultats de ce test ont permis d'observer une bonne rétention des métaux lourds dans les matériaux à base de liant hydraulique. Le relargage des espèces chimiques suivies dans le milieu sulfaté est très important par rapport au milieu neutre, cela est dû à la force ionique élevée car les sulfates sont agressifs vis-à-vis du béton, la portlandite est affectée directement par le sulfate de sodium.

Les principales perspectives qui apparaissent à l'issue de cette thèse sont :

- Il serait intéressant dans des futures recherches de réaliser une caractérisation de déchets du CET sur le plan organique pour permettre de mieux comprendre le caractère polluants de ces derniers ;
- Suivre du relargage des polluants organiques contenant dans les matériaux S/S ;
- Récupération des métaux lourds par un système favorable puis la valorisation de le reste du matériau dans le domaine de construction ;
- Réalisation des tests de résistance biologique aux microorganismes, car la biodégradation est un mode important de dégradation des matrices de stockage et aussi des matériaux de construction ;
- Afin de compléter l'évaluation environnementale, il serait intéressant de modéliser les essais de lixiviation, afin de simuler la cinétique de relargage des espèces chimiques polluantes et des espèces composant la matrice cimentaire ;

ANNEXES

Annexe A

Présentation de C.E.T. (SIDI-BOUDRAHEM)

Historique

Le centre d'enfouissement technique de Bejaia est un CET de classe II, sa réception remonte à 2012, par contre son exploitation a débuté en Aout 2015. Ce retard est dû à l'absence d'un acces praticable « route non bitumé », qui a été réalisé par la DTP en 2015.

Le CET se situe sur les hauteurs de SIDI-BOUDRAHEM commune de Bejaia, il contient 01 casier d'un volume de 200 000 m³ et une durée de vie de environs 04 ans. D'autre casiers sont à prévoir et autres réalisations comme un bâtiment technique, administration et un poste de contrôle, la commune desservie par le CET est la commune de Bejaia, le nombre des habitants desservie sont 194 930 hab. La quantité des déchets enfuis par jour est de 153t/j et 55845/an.

Situation géographique

Le centre d'enfouissement technique de SIDI-BOUDRAHEM se situe selon ces coordonnées 36°43'27.4' 3''N 5°00 '50.3'' dans un territoire appartenant à la commune de Bejaia, dans un secteur occupant le piémont du massif forestier de Adrar SIDI-BOUDRAHEM à 4 Km à l'Ouest de la ville de Bejaia et à 2.3 Km au Nord-est de l'agglomération chef-lieu de oued Ghir.

Le CET occupe une superficie de l'ordre de 32 hectares et se localisent aux environs du lieu-dit « Ighzer ou Zemmour au sud du douar Smenda à 1.1 Km du chemin communale reliant les différents Douars (Khaéra, Semenda, Ifithaouene) à la ville de Bejaia et à 2 Km de la route nationale 12 reliant Oued Ghir à Bejaia.

L'implantation de ce site est conforme aux exigences environnementales qui consistent sur les critères du choix de terrain et la perméabilité du sol, qui se composent en générale de flysch.



Figure A1. Image Satellitaire de la zone d'étude (CET).



Figure A2. Etat du casier ainsi que les bassins de stockage des lixiviats.



Figure A3. Drainage des eaux pluviales.



Figure A4. Etat du casier du CET.

Géologie du site

La formation géologique servant d'assise au versant du site du CET est constituée par flysch oligocène composée par des grés en gros banc réguliers, quartzeux ou friables qui sont souvent ferrugineux avec des lits schisteux.

La matrice enveloppant le matériel gréseux est en général argileuse, donc imperméable aux eaux de ruissellement.

Hydrographie

Le site du CET de Bejaïa est drainé par l'Oued Ighzer Ouzemour qui est de type intermittent. Ce dernier joue un rôle de collecteur principale où viennent se jeter les eaux de ruissellement qui drainent le versant Ouest d'Adrar Boudrahem, pour ensuite finir leurs parcours en bas dans le Oued Soummam qui se trouve à une distance d'environ 3.5 Km. En revanche, la nature lithologique de ce type de flysch ne permet pas le développement d'aquifère dans la d'étude, de plus l'altération du flysch lui-même donne naissance à un résidu d'altération de type marneux à marneux argileux.

En conséquence, la nature minéralogique de ces formations d'altération ne participe en aucune manière à la réunion de conditions adéquates pour la constitution des zones susceptibles d'être aquifères.

Biogéographique

Sur le plan biogéographique, le site concerné se trouve dans un milieu humide, suivant les années, et reçoit une tranche pluviométrique supérieure à 970 mm en moyenne annuelle.

L'expression biogéographique de ce climat se traduit sur le terrain par des essences végétales bien adaptées à ce type de milieu.

Flore

Au niveau du site du projet il existe et de façons très clairsemée et disparate que des formations artificialisées : olivier, acacia, eucalyptus et à proximité des constructions et des petits vergers. Quant à la Flore environnante, elle donne l'image d'un maquis de plus en plus dégradé au fur et à mesure que l'on s'approche de la mer. Ce maquis en garrigue à chêne Kermes domine la majeure partie du paysage. C'est un groupement relativement pauvre en espèce et on y trouve principalement : *Ampelodesma mauritanica*, *Calicatum apinosa*, en *Cistus monspelliensis* et fréquemment le *buplenarum fruticosum*.

L'espèce dominante après les incendies et le débroussaillage est l'*Amoelodisma mauritanica*. A proximité de la mer et en arrière plage sont présentes, des espèces importantes, les embruns marins : *dancus maritunus*, *mathiala sinnata*, *linonium gongitium*, *lotus crituset dactylis giomerata*.

La répartition des plantes est conditionnée par le marin et l'exposition, c'est ainsi que l'on retrouve ici et les divers groupements ; à *euphorbia dendroides*, à *coithum maritimum* et *limonium gogitium*, *lotus criticus*.

Faune

D'après les études faites dans la région et particulièrement au du parc GOURAYA qui se trouve à quelque kilomètres du site du projet, la faune n'est pas très abondante mais assez variée.

Mammifère :

- Sanglier
- Singe magot
- Porc-épic
- Lièvre
- Genette

Avifaune

- Perdrix gemmera
- Mésange noir
- Pigeon ramier
- Divers rapaces nocturne et diurne
- Gibier migrateurs (tourterelles, caille, grives...)

Climatologie

Le climat de la zone d'étude est de type subhumide méditerranéen, caractérisée par un hiver pluvieux et doux et un été sec et chaud. En effet, les facteurs climatiques interviennent dans les processus de transformation (biodégradation) et la diffusion de polluants sont les pluies, les températures et vent.

Topographie

Le relief du secteur du centre d'enfouissement technique est très simple, il se situe dans sa totalité dans le cadre du versant Ouest du massif forestier d'Adrar SIDI-BOUDERHAM à l'Ouest de la ville de Bejaia, à 2 Km de la vallée et à 2.5 Km environ au Nord de Oued Soummam. C'est un site qui se développe sur un relief à caractère collinaire, un relief qui joue le rôle de liaison entre la vallée de la Soummam au sud et le domaine montagneux au Nord.

Les altitudes ici varient de 150 m au niveau du piémont à 500 sur les hauteurs, les points les plus hauts culminent dans cette zone à 501 m dans le forêt de SIDI-BOUDERHAM.

Quant aux altitudes autour du centre d'enfouissement technique, elles varient entre 310 m à l'aval, et 400m à l'amont, au niveau du maquis dégradé.

Le relief de ce site est accidenté ou les pentes sont généralement moyenne à fortes. Elles varient de 10° à 20° à l'aval et de 20° à plus de 30° à l'amont.

CADRE JURIDIQUE

ARRETE INTERMINISTERIEL DU 24 NOVEMBRE 2009 PORTANT CREATION DE L'ETABLISSEMENT DE GESTION DES CENTRES D'ENFOUISSEMENT TECHNIQUE DE LA WILAYA DE BEJAIA.

- Le ministre d'état, Ministre de l'intérieur et collectivité locales.
- Le ministre des finances.
- Le ministre de l'aménagement du territoire, de l'environnement et du tourisme.

-Vu la loi n°90-08 du 07 avril 1990, modifiée et complétée, relative à la commune ;

-Vu la loi n°90-09 du 07 avril 1990, modifiée et complétée, relative à la Wilaya ;

-Vu la loi n°01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, u contrôle et à l'élimination des déchets ;

-Vu le décret n°83-200 du 19 mars 1983 précisant les conditions de création, d'organisation et fonctionnement de l'établissement public local ;

- Vu le décret exécutif n°94-08 du 176 du aout 1994 fixant les attributions du Ministre de l'intérieur des collectivités locale, de l'environnement et de la réforme administrative, modifié et complété ;

-Vu le décret exécutif n°07-350 du 08 Dhou El Kaada 1428 correspondant au 18 novembre 2007 fixant les attributions du Ministre de aménagement du territoire, l'environnement et du tourisme ;

-Vu le décret exécutif n°95-54 du 15 février 1995, fixant les attributions du Ministre des finances ;

- **Article 25** : le rapport annuel d'activité et le rapport du commissaire au compte, approuvé par le conseil d'administration, sont transmis par le wali au ministre de l'intérieur et des collectivités locales, au Ministre des finances et au Ministre de l'aménagement du territoire, de l'environnement et d tourisme.
- **Article 26** : le patrimoine de l'établissement est constitué ;
 - des biens meubles et immeubles acquis et/ou réalisés par l'établissement.
 - Des biens et immeubles éventuellement affectés, au profit de l'établissement par l'état et les collectivités locales.
- **Article 27** : l'établissement est créé pour une durée illimitée
- **Article 28** : les conditions de dissolution et de liquidation de l'établissement interviennent dans la même forme que sa création.
- **Article 29** : le Wali de Bejaïa est chargé d'exécution du présent arrêté interministériel qui est publié au recueil des actes administratifs de la wilaya.

Annexe B

Courbes d'étalonnage

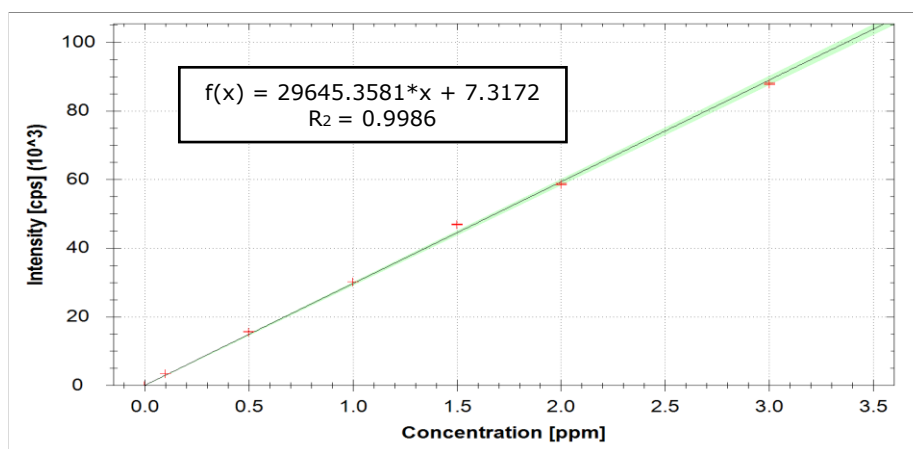


Figure B1. Courbe d'étalonnage du cadmium.

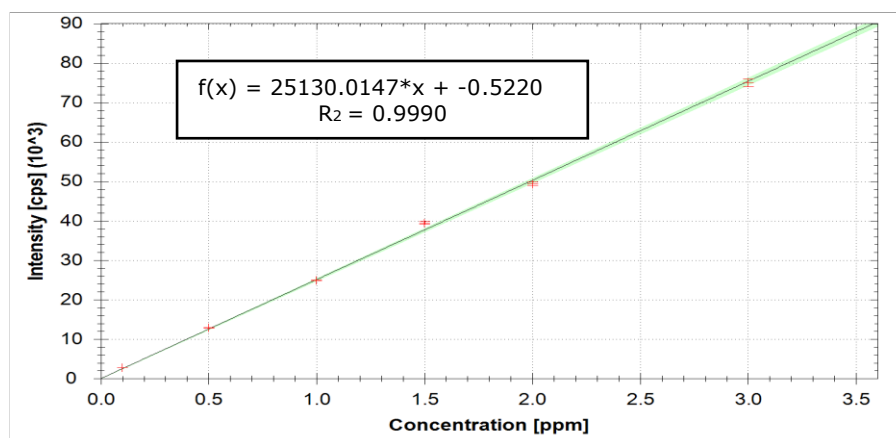


Figure B2. Courbe d'étalonnage du Fer.

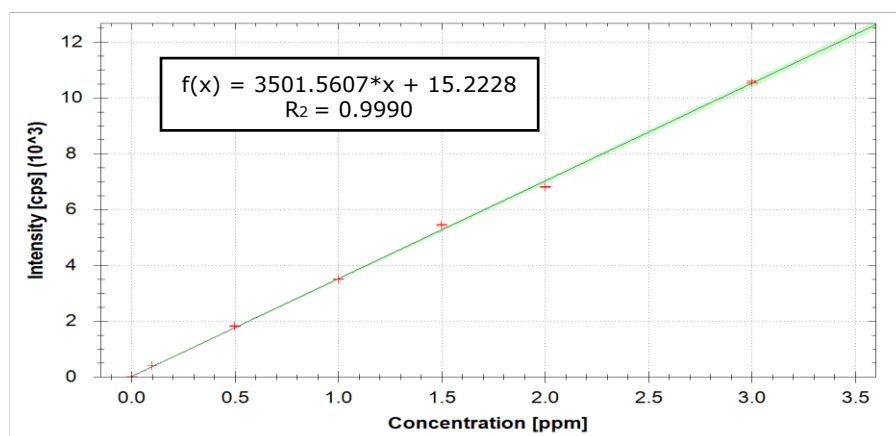


Figure B3. Courbe d'étalonnage du Plomb.

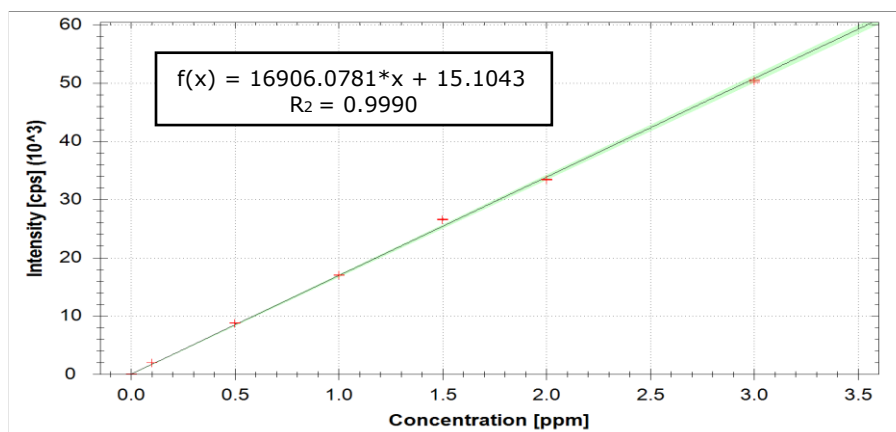


Figure B4. Courbe d'étalonnage du Nickel.

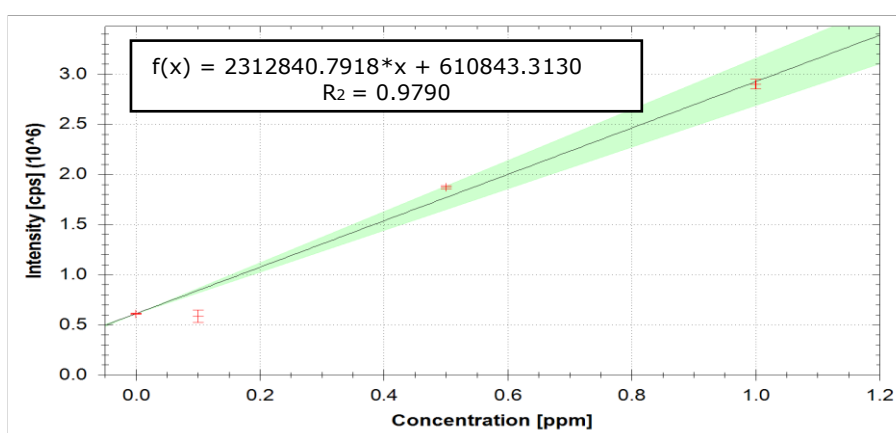


Figure B5. Courbe d'étalonnage du calcium.

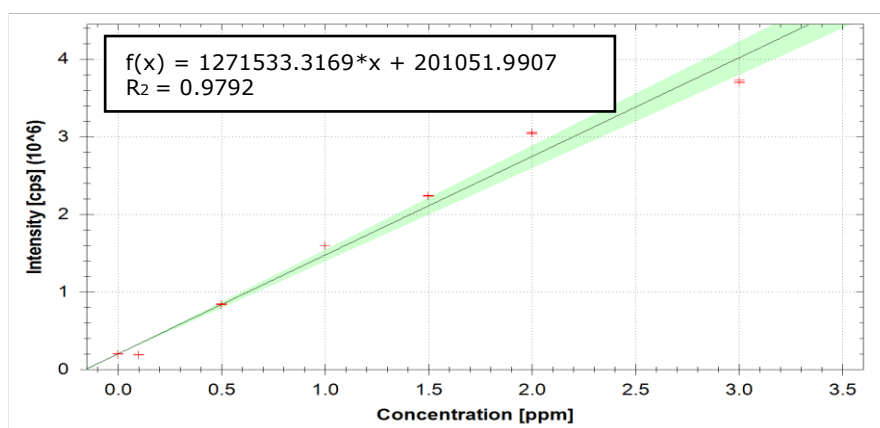


Figure B6. Courbe d'étalonnage du sodium.

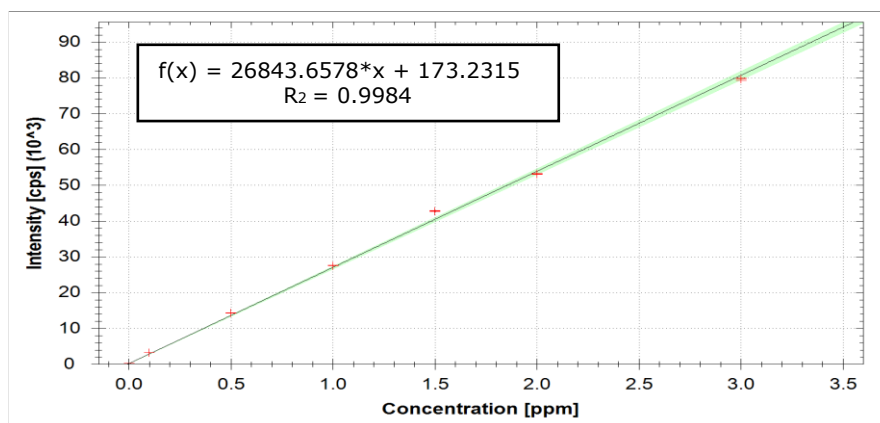


Figure B7. Courbe d'étalonnage du Zinc.

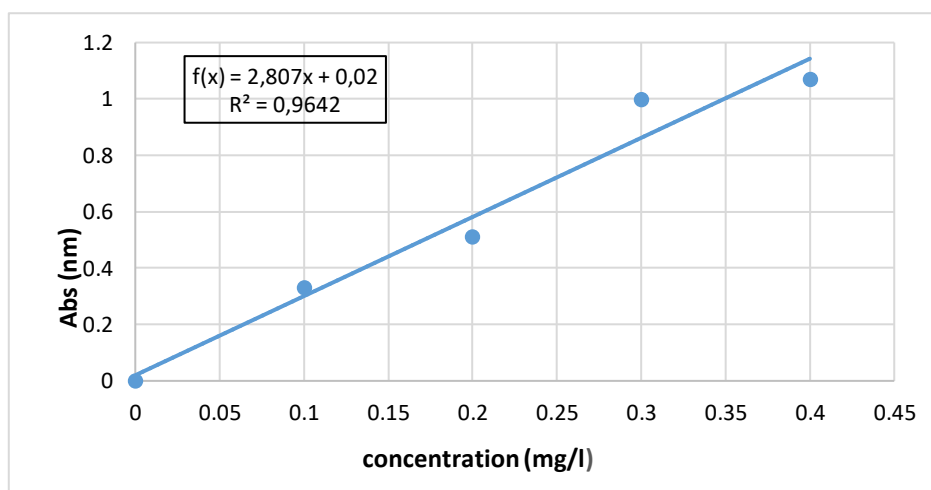


Figure B8. Courbe d'étalonnage du phosphate.

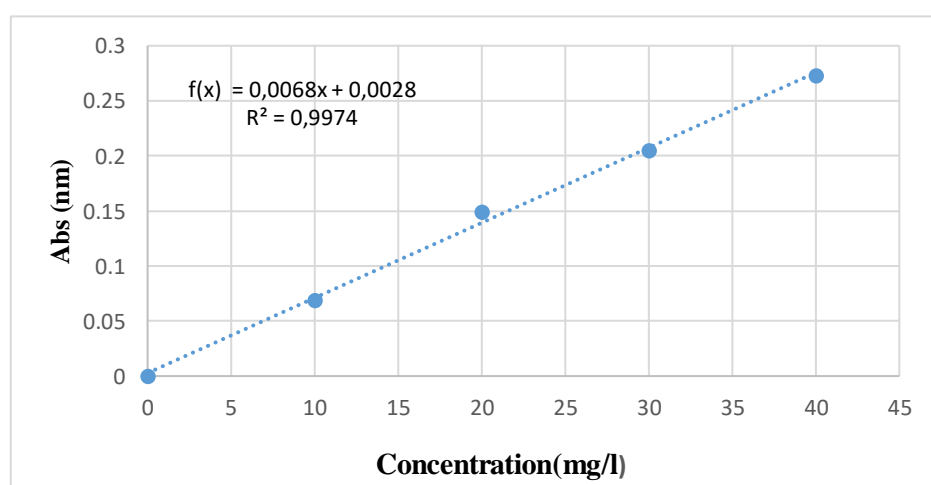


Figure B9. Courbe d'étalonnage du sulfate.

Annexe C

Fiche technique du Kaolin



Soalka

**LES PRODUITS DU COMPLEXE
DES KAOLINS D'ALGERIE**

		KAOLINS		
		KT2	KT3	
ANALYSE CHIMIQUE	% en poids	SiO ₂	49.30	48.50
		Al ₂ O ₃	33.0	33.90
		Fe ₂ O ₃	2.25-2.50	2.25-2.50
		TiO ₂	0.24	0.21
		CaO	0.08	0.08
		MgO	0.40	0.39
		K ₂ O	2.75-3.10	2.75-3.10
		Na ₂ O	0.09	0.08
		Perte au feu	10.5	10.80-11.00
COMPOSITION MINERALOGIQUE	% en poids	Kaolinite	62-65	65-70
		Matières micacées Dont argile	16-22	15-22
		quartz	8-11	6-10
		Feldspath	3-4	3-4
		> 40µm	0.03	0.02
ANALYSE GRANULOMETRIQUE	% en poids	<15 µm	98±1	99 ± 1
		< 10µm	88±3	95± 3
		< 5µm	65±3	74±3
		< 2 µm	43±3	47±3
		KGF/CM2	24.3	24.7
COHESION EN CRU	Séché à 110°C	PSI	-	-
PROPRIETE DE COULAGE	Concentration de coulage	% P/Solide	47.4	44.9
	% en poids de PSI	poises 5	0.50	0.55
	Vitesse de cuisson	Mm2/min	1.1	0.90
PROPRIETE DE CUISSON	% absorption	1180 °C	7.4	7.3
		1280°C	2.2	1.7
		1410°C	0.0	0.0
	% blancheur	1180°C	75.0	76.4
NB Blancheur KT3B En cru : 82±1 Indice de jaune 5 ±1		1280 °C	83.5	84.1
		1410 °C	-	-
	% retrait	1180°C	5.8	6.0
		1280°C	8.3	8.5
		1410 °C	9.2	9.5
PROPRIETES PHYSIQUES	Densité réelle Densité apparente Surface spécifique		2.6	2.6
			1	1
			25	25

Analyse chimique des matières premières :

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Na ₂ O
Kaolin Remblend	48	36.5	0.05	10.1	0.07	0.3	2	0.43	12
Kaolin KT2	49.3	33.5	0.024	1.59	0.08	0.4	2.75	0.50	10.5

Analyse minéralogique :**Kaolin Remblend**

Kaolinite : 80%

Mica : 9-12%

Quartz : 3%

Feldspath : 4%

Annexe E**JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 26****(24 Rabie El Aouel 1427 /23 avril 2006)****Décret exécutif n° 06-141 du 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 avril 2006
définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels.**

Le Chef du Gouvernement, Sur le rapport du ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Vu la Constitution, notamment ses articles 85-4° et 125 (alinéa 2) ;
Vu la loi n° 90-08 du 7 avril 1990, complétée, relative à la commune ;
Vu la loi n° 90-09 du 7 avril 1990, complétée, relative à la wilaya ;
Vu la loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable ;
Vu la loi n° 04-04 du 5 Joumada El Oula 1425 correspondant au 23 juin 2004 relative à la normalisation ;
Vu la loi n° 05-07 du 19 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 28 avril 2005 relative aux hydrocarbures ;
Vu le décret présidentiel n° 04-136 du 29 Safar 1425 correspondant au 19 avril 2004 portant nomination du Chef du Gouvernement ;
Vu le décret présidentiel n° 05-161 du 22 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 1er mai 2005 portant nomination des membres du Gouvernement ;
Vu le décret exécutif n° 93-160 du 10 juillet 1993 réglementant les rejets d'effluents liquides industriels ;

Décrète :

Article 1er. - En application des dispositions de l'article 10 de la loi n° 03-10 du 19 juillet 2003, susvisée, le présent décret a pour objet de définir les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels.

SECTION 1**DES DISPOSITIONS PRELIMINAIRES**

Art. 2.- Au sens du présent décret on entend par rejet d'effluents liquides industriels tout déversement, écoulement, jet et dépôt d'un liquide direct ou indirect qui provient d'une activité industrielle.

Art. 3.- Les valeurs limites de rejets d'effluents liquides industriels sont celles fixées en annexe du présent décret.

Toutefois, en attendant la mise à niveau des installations industrielles anciennes dans un délai de cinq (5) ans, les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels prennent en charge l'ancienneté des installations industrielles en déterminant une tolérance pour les rejets d'effluents liquides industriels émanant de ces installations. Ces valeurs sont fixées et annexées au présent décret. Pour les installations pétrolières, le délai est de sept (7) ans conformément aux dispositions législatives en vigueur, et notamment celles de la loi n° 05-07 du 19 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 28 avril 2005, susvisée,

En outre et en raison des particularités propres aux technologies utilisées, des tolérances particulières aux valeurs limites sont également accordées selon les catégories industrielles concernées. Ces tolérances sont annexées au présent décret.

SECTION 2 DES PRESCRIPTIONS TECHNIQUES RELATIVES AUX REJETS D'EFFLUENTS LIQUIDES INDUSTRIELS

Art. 4.- Toutes les installations générant des rejets d'effluents liquides industriels doivent être conçues, construites et exploitées de manière à ce que leurs rejets d'effluents liquides industriels ne dépassent pas à la sortie de l'installation les valeurs limites des rejets définies en annexe du présent décret et doivent être dotées d'un dispositif de traitement approprié de manière à limiter la charge de pollution rejetée.

Art. 5.- Les installations de traitement doivent être conçues, exploitées et entretenues de manière à réduire à leur minimum les durées d'indisponibilité pendant lesquelles elles ne peuvent assurer pleinement leur fonction.

Si une indisponibilité est susceptible de conduire à un dépassement des valeurs limites imposées, l'exploitant doit prendre les dispositions nécessaires pour réduire la pollution émise en réduisant ou en arrêtant, si besoin, les activités concernées.

SECTION 3 DU CONTROLE DES REJETS D'EFFLUENTS LIQUIDES INDUSTRIELS

Art. 6.- Au titre de l'autocontrôle et de l'autosurveillance les exploitants d'installations générant des rejets d'effluents liquides industriels doivent tenir un registre où sont consignés la date et les résultats des analyses qu'ils effectuent selon des modalités fixées par arrêté du ministre chargé de l'environnement et, le cas échéant, du ministre chargé du secteur concerné.

Les mesures sont effectuées sous la responsabilité de l'exploitant et à ses frais dans les conditions fixées par la réglementation en vigueur.

Art. 7.- Les résultats des analyses doivent être mises à la disposition des services de contrôle habilités.

Art. 8.- Les services habilités en la matière effectuent des contrôles périodiques et ou inopinés des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des rejets d'effluents liquides industriels visant à s'assurer de leur conformité aux valeurs limites fixés en annexe du présent décret.

Art. 9.- Le contrôle des rejets comporte un examen des lieux, des mesures et analyses opérées sur place et des prélèvements d'échantillons aux fins d'analyses.

Art. 10.- L'exploitant de l'installation concernée est tenu d'expliquer, commenter ou fonder tout dépassement éventuellement constaté et fournir les actions correctives mises en œuvre ou envisagées.

Art. 11.- Les opérations de contrôle, telles que définies ci-dessus, donnent lieu à la rédaction d'un procès-verbal établi à cet effet.

Le procès-verbal comporte :

- les noms, prénoms et qualité des personnes ayant effectué le contrôle,
- la désignation du ou des générateurs du rejet d'effluents liquides industriels et de la nature de leur activité,
- la date, l'heure, l'emplacement et les circonstances de l'examen des lieux et des mesures faites sur place,
- les constatations relatives à l'aspect, la couleur, l'odeur du rejet, l'état apparent de la faune et de la flore à proximité du lieu de rejet et les résultats des mesures et des analyses opérées sur place,
- l'identification de chaque échantillon prélevé, accompagné de l'indication de l'emplacement, de l'heure et des circonstances de prélèvement, le nom du ou des laboratoires destinataires de l'échantillon prélevé.

Art. 12.- Les méthodes d'échantillonnage, de conservation et de manipulation des échantillons ainsi que les modalités d'analyses sont effectuées selon les normes algériennes en vigueur.

Art. 13.- Toutes dispositions contraires au présent décret et notamment les dispositions du décret exécutif n° 93-160 du 10 juillet 1993, susvisé, sont abrogées.

Art. 14.- Le présent décret sera publié au Journal officiel de la République algérienne démocratique et populaire.

VALEURS LIMITES DES PARAMETRES DE REJETS D.EFFLUENTS LIQUIDES INDUSTRIELS

N°	PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCES AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
1	Température	°C	30	30
2	PH	-	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5
3	MES	mg/l	35	40
4	Azote Kjeldahl	"	30	40
5	Phosphore total	"	10	15
6	DCO	"	120	130
7	DBO5	"	35	40
8	Aluminium	"	3	5
9	Substances toxiques bioaccumulables	"	0,005	0,01
10	Cyanures	"	0,1	0,15
11	Fluor et composés	"	15	20
12	Indice de phénols	"	0,3	0,5
13	Hydrocarbures totaux	"	10	15
14	Huiles et graisses	"	20	30
15	Cadmium	"	0,2	0,25
16	Cuivre total	"	0,5	1
17	Mercuré total	"	0,01	0,05
18	Plomb total	"	0,5	0,75
19	Chrome Total	"	0,5	0,75
20	Etain total	"	2	2,5
21	Manganèse	"	1	1,5
22	Nickel total	"	0,5	0,75
23	Zinc total	"	3	5
24	Fer	"	3	5
25	Composés organiques chlorés	"	5	7

TRAVAUX DE RECHERCHE DE LA THÈSE

Publication et communications liées à cette thèse

a. Publication internationales

Les travaux de recherche de la thèse ont fait l'objet d'une publication internationale a été publié dans le revue suivante : Nova Biotechnologica et Chimica (NBEC)

- M. Cheribet Drouiche, K. Moussaceb, E. Joussein and J-C. Bollinger. Stabilization/solidification by hydraulic binders of metal elements from landfill leachate. Vol. 18(1): 72-83, 2019.

b. Conférences internationales

- M. Cheribet Drouiche, K. Moussaceb, D. Bellache, F. Araoun and R. Sahnoune. Stabilization / solidification metal elements from landfill sludge with brick waste, 4th International Symposium on Materials and Sustainable Development, ISMSD 12-14 Novembre 2019, Boumerdes-Algérie.
- M. Cheribet Drouiche, K. Moussaceb, D. Bellache. Traitement of landfill leachate polluted by cadmium by stabilization / solidification technique using portland ciment and metakaolin, First International Workshop on Environmental Engineering, IWEE 2019, Setif-Algerie.
- M. Cheribet Drouiche, K. Moussaceb, G. Radji and D. Bellache. The effect of the use of activated metakaolin in a cement matrix on the stabilization / solidification of heavy metals, International Conference on Waste Treatment and Valorization ICWTV 26 -27 November 2019, Constantine- Algerie.

Author	CHERIBET DROUCHE Mira
Title	Characterization and Recovery Of sludge from the Technical Landfilling center of sidi-Boudrehhem -Bejaia
Director of thesis	MOUSSACEB Karim. University of Bejaia.

The increasing quantity of solid waste generated, generated by population growth and the emergence of new consumption habits by populations, poses a real problem and threatens human health and the quality of natural environments. In recent years, various waste treatment techniques have been developed in order to reduce the environmental impact of this waste and its polluting nature.

In this study, the stabilization / solidification technique is applied to the waste, namely: sludge and residual leachate from the technical landfill center (CET) of Sidi-BOUDRAHEM located in Bejaïa-Algeria. Among the stabilization techniques most currently used, stabilization based on hydraulic binders which offers many advantages such as ease of implementation and low cost of production. Indeed, in many cases, stabilized / solidified waste can represent a source of pollution in the storage environment, pollutants can be solubilized in contact with water circulating in the environment. For this reason, we propose to determine certain physicochemical characteristics of materials and to study the release of these pollutants in the short and long term using a series of leaching tests, namely: the test of Acid Neutralization Capacity (CNA), Pore Water Test (EP), Maximum Mobilizable Fraction (FMM) Test, and Monolith Leach Test (TLM).

Since the production of cement causes the problem of air pollution (strong releases of CO₂), the partial substitution of cement by an addition is a promising solution. The study was carried out at the scale of the mortar and pastes to define the influence of different parameters such as, the rate and the nature of the substituent, the nature of the stabilized waste (solid or liquid) on different properties (the mechanical resistance, immobilization of pollutants, etc.). The waste characterization results indicate significant contamination by heavy metals such as lead, nickel, cadmium, iron and zinc. In general, the results obtained showed the effectiveness of the containment of waste in cement matrices. The concentrations of the elements analyzed in the eluates obtained by the leaching tests are effectively within the range of standards, as demonstrated by the effectiveness of the S / S process used in this study in trapping heavy metals.

Keywords: CET; mud ; leachate; CPA-CEM I cement; substitution ; heavy metals ; mortar; CKD; metakaolin; standardized sand; stabilization / solidification; leaching tests.

تشكل زيادة كمية النفايات الصلبة الناتجة عن النمو السكاني وظهور عادات استهلاك جديدة من قبل السكان مشكلة حقيقية وتهدد صحة الإنسان ونوعية البيئات الطبيعية. في السنوات الأخيرة، تم تطوير تقنيات مختلفة لمعالجة النفايات من أجل تقليل التأثير البيئي لهذه النفايات وطبيعتها الملوثة.

في هذه الدراسة ، تم تطبيق تقنية التثبيت / التصلب على النفايات ، وهي: الوحل والعصارة المنبثقة من مركز دفن النفايات الفني (CET) بسيدي بو دراهم الواقع في بجاية-الجزائر. من بين تقنيات التثبيت الأكثر استخدامًا حاليًا ، التثبيت على أساس الروابط الهيدروليكبة التي توفر العديد من المزايا مثل سهولة التنفيذ وانخفاض تكلفة الإنتاج. في الواقع ، في كثير من الحالات ، يمكن أن تمثل النفايات المستقرة / المتصلبة مصدرًا للتلوث في بيئة التخزين ، ويمكن إذابة الملوثات عند ملامستها للماء المنتشر في البيئة. لهذا السبب ، نقتراح تحديد بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد ودراسة إطلاق هذه الملوثات على المدى القصير والطويل باستخدام سلسلة من اختبارات الترشيح ، وهي: اختبار قدرة تحييد الحمض (CNA) ، اختبار ماء المسام (PE) واختبار الحد الأقصى للكسر القابل للحركة (FMM) واختبار ترشيح مكعب (TLM).

نظرًا لأن إنتاج الأسمنت يسبب مشكلة تلوث الهواء (إطلاق قوي لثاني أكسيد الكربون)، فإن الاستبدال الجزئي للأسمنت بإضافات يعد حلاً واعدًا. أجريت الدراسة على مقياس المونة والمعاجين لتحديد تأثير العوامل المختلفة مثل معدل وطبيعة البديل وطبيعة المخلفات المستقرة (صلبة أو سائلة) على الخواص المختلفة (المقاومة الميكانيكية). ، وتثبيت الملوثات ، وما إلى ذلك). تشير نتائج توصيف النفايات إلى وجود تلوث كبير بالمعادن الثقيلة مثل الرصاص والنيكل والكاديوم والحديد والزنك. بشكل عام ، أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها فعالية احتواء النفايات في مصفوفات الأسمنت. إن تركيزات العناصر التي تم تحليلها في الواس التي تم الحصول عليها من خلال اختبارات الترشيح هي بشكل فعال ضمن نطاق المعايير ، كما يتضح من فعالية عملية S / S المستخدمة في هذه الدراسة في محاصرة المعادن الثقيلة.

الكلمات الرئيسية: CET؛ طين ؛ العصارة. الأسمنت ؛ الاستبدال. معادن ثقيلة؛ مونة الاسمنت؛ عجينة ؛ كد. ميتاكرولين. رمل معياري استقرار / تصلب اختبارات الترشيح.

La quantité croissante des déchets solides générés engendrés par l'accroissement démographique et l'apparition de nouvelles habitudes de consommation des populations, pose un véritable problème et menace la santé humaine et la qualité des milieux naturels. Au cours de ces dernières années, différentes techniques de traitement des déchets ont été développées afin de réduire l'impact environnemental de ces déchets et leur caractère polluant.

Dans cette étude, la technique de Stabilisation/Solidification est appliquée sur les déchets, à savoir : les boues et les lixiviats résiduels du centre d'enfouissement technique (CET) de Sidi-BOUDRAHEM sise à Bejaïa-Algérie. Parmi les techniques de stabilisation les plus utilisées actuellement, la stabilisation à base de liants hydrauliques qui offre de multiples avantages tel quel la facilité de mise en œuvre et le faible coût de réalisation. En effet, dans de nombreux cas, les déchets stabilisés/solidifiés peuvent représenter une source de pollution dans le milieu de stockage, les polluants peuvent être solubilisés au contact de l'eau circulant dans l'environnement. Pour cette raison, nous nous proposons de déterminer certaines caractéristiques physico-chimiques des matériaux et d'étudier le relargage de ces polluants à court et à long terme à l'aide d'une série de tests de lixiviation, à savoir : le test de capacité de neutralisation acide (CNA), le test de l'eau des pores (EP), le test de fraction maximale mobilisable (FMM), et le test de lixiviation sur monolithe (TLM).

Vu que la production du ciment cause le problème de pollution de l'air (fortes libérations de CO₂), la substitution partielle du ciment par un ajout est une solution prometteuse. L'étude a été réalisée à l'échelle du mortier et de pâtes pour définir l'influence de différents paramètres tel que, le taux et la nature du substituant, la nature de déchet a stabilisé (solide ou liquide) sur différentes propriétés (la résistance mécanique, l'immobilisation des polluants...). Les résultats de caractérisation des déchets indiquent une contamination importante par les métaux lourds tels que le plomb, le nickel, le cadmium, le fer et le zinc. En général, les résultats obtenus ont montré l'efficacité du confinement des déchets dans les matrices cimentaires. Les concentrations des éléments analysés dans les éluats obtenus par les tests de lixiviation rentrent efficacement dans la gamme des normes ce que démontre l'efficacité du procédé de S/S utilisé dans cette étude dans le piégeage des métaux lourds.

Mots clés : CET ; boue ; lixiviats ; ciment CPA-CEM I ; substitution ; métaux lourds ; mortier ; pâte ; CKD ; métakaolin ; sable normalisé ; stabilisation/solidification ; tests de lixiviation.