

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

— تلمسان — جامعة أبي بكر بلقايد

Université Abou bekr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade** de **DOCTORAT EN SCIENCE**

En : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique et environnement

Par : Mme Serghine né BELAIDI Khedidja

Sujet

**VALORISATION DES ARGILES D'ADRAR POUR LEURS
UTILISATIONS EN TANT QUE BARRIERE PASSIVE DANS LES
CENTRES DE STOCKAGES DES DECHETS DE CLASSE 1**

Soutenue publiquement, le 07 / 07 / 2025, devant le jury composé de :

Mr TROUZINE Habib	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr ZADJAOUI Abdeldjalil	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
Mr BENNACER Lyacine	Professeur	Univ. Adrar	Examineur
Mme BOUROKBA Souad Amel	MCA	Univ. Oran	Examinatrice
Mr MEKERTA Belkacem	Professeur	Univ. Adrar	Invité 1
Mr Allal Mohamed Amine	Professeur	Univ. Tlemcen	Invité 2

DÉDICACES

إلى روح سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم. جعل الله هذه المذكرة علم ينتفع به "يارب"

À ma chère mère, qui m'a comblé d'amour et accompagné de ses prières tout au long de ma vie, et à qui je souhaite santé et bien-être.

À mon père, que je considère comme un très grand soutien. Que Dieu lui bénisse.

À mon défunt beau-père, dont j'espère que Dieu aura pitié et pardonnera. اللهم اغفر له وارحمه واسكنه فسيح جناتك

À mon mari Boumediene, mon partenaire de vie, qui m'a soutenu dans ma vie jour et nuit, merci pour ta patience à mon égard.

À tous mes enfants, Abdelillah, Bilal et Ikhlass Hibatallah qui m'ont soutenu tout au long de ce projet, et à qui je souhaite une carrière universitaire et scolaire réussie et que Dieu fasse d'eux un a tout pour l'Ummah islamique.

À tous mes frères et sœurs qui m'ont accompagnée par leurs prières et leurs encouragements.

À notre nouveau bébé de la famille, petit « Hamza », Que Dieu lui bénisse.

À toutes ma Famille...

À tous mes Amis (es)...

Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier « **Allah** » qui m'a accordé la force, la patience et la santé et la volonté tout au long des années de formation, me permettant ainsi d'achever ce travail de recherche et d'atteindre ce grade. الحمد لله حمدا كثيرا طيبا مباركا فيه.

Cette recherche a été réalisée au sein du Laboratoire Eau et Ouvrage dans Leurs Environnement (**EOLE**) de l'Université de Tlemcen-Aboubakr Belkaid faculté de Technologie.

Je remercie sincèrement mon directeur de thèse, **Pr. A. ZADJAOUI**, Professeur au département de Génie Civil de l'Université de Tlemcen-Abou bekr Belkaid faculté de Technologie, qui a accompagné ma formation de chercheur. Ses conseils avisés, d'avoir accepté le suivie de ma thèse après le Pr ALLAL M. A qui a u sa retraite. Malgré les responsabilités importantes qu'il assume, Pr. A. ZADJAOUI a toujours été à mon écoute et m'a beaucoup donné l'encouragement.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance au **Pr. B. MEKERTA**, Professeur au département de Génie Civil de l'Université Ahmed Draia d'Adrar, qui a co-encadré ma thèse pour sa disponibilité constante, ses compétences, ses orientations précieuses, sa patience ainsi que ses suggestions et critiques qui ont grandement facilité la réalisation de ce travail. Je lui suis profondément reconnaissant pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ces onze années, durant lesquelles il a suivi avec attention les essais et les discussions des résultats obtenus.

Mes remerciements aussi au **Pr. M. A. ALLAL**, Professeur retraité du département de Génie Civil l'Université de Tlemcen-Abou bekr Belkaid faculté de Technologie, pour leurs conseils éclairés et leurs critiques constructives et leur disponibilité, lors des premières années des recherches.

Je remercie aussi vivement tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :

Pr. H. TROUZINE, Professeur à l'Université Abou bekr Belkaid de Tlemcen, pour avoir accepté avec honneur de présider mon jury de thèse.

Pr. L. BENNACER, Professeur à l'Université Ahmed Draia d'Adrar, pour son déplacement, sa gentillesse et son acceptation d'examiner ce travail.

Mme. S. A. BOUROKBA Maître de conférences A à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, pour le temps précieux qu'il a consacré à la lecture et à l'évaluation de ce manuscrit.

Je remercie également le personnel des laboratoires qui m'ont accompagné dans mes recherches : le laboratoire de département de génie civil (géotechnique) de l'université ENSET d'Oran, le laboratoire de département de génie civil et de département de chimie de l'université Ahmed Draia d'Adrar, le Laboratoire des Travaux Publics d'Adrar (LTPO), le Laboratoire de département de chimie de l'université Abou bekr Belkaid de Tlemcen, et le laboratoire de bureau d'étude ARTS de la wilaya d'Adrar. Leur disponibilité, leurs conseils techniques et la mise à disposition des équipements ont été essentiels à la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement **M. A. Hammal**, technicien au Laboratoire de l'université d'Oran (USTO), pour son aide précieuse et sa disponibilité. Ma reconnaissance va aussi à **M. A. HOUTIA**, ingénieur responsable de la laboratoire de géotechnique de département de génie civil et **M. I. BOUKHETACHE** ingénieur de laboratoire de chimie de l'université Ahmed Draia d'Adrar, , ainsi qu'à l'équipe de laboratoire EOLE, **Pr. N. ABOUBAKR**, **Dr. M.F. DERFFOUF** et **M. O. MEKAIDECHE** pour leurs conseils techniques et leur disponibilité et la mise à disposition l'appareil de triaxial GDS pour la réalisation des

*essais de perméabilité, aux doctorantes **Melle K. BOURAGAA et Hafsa BEKRAOUI**, qui m'ont donné un pas puissant dans la dernière tache de ma thèse et **Mr A. ABDELKRIMI** pour son aide et sans oublié mes collègues **Dr A. BASSOUD, Dr .M. BENABDELFETTAH** et **Dr. A. ABDELDJALIL***

*Enfin, de tout cœur, un grand merci à ma collègue **Mme K. BEKRAOUI** qui a été ma compagne d'étude et de travail, et qui m'a fourni des informations et des conseils précieux.*

RÉSUMÉ

Le confinement des déchets dangereux constitue aujourd'hui l'une des principales méthodes d'élimination employées à l'échelle mondiale, notamment dans les Centres de Stockage de Déchets (CSD). Afin de protéger les eaux souterraines, ces installations sont généralement implantées sur une couche d'argile naturelle ou reconstituée, caractérisée par une faible perméabilité et désignée sous le nom de barrière de sécurité passive. En ce qui concerne les déchets industriels et spéciaux dangereux, la majorité des réglementations en vigueur impose une perméabilité inférieure à 1×10^{-9} m/s pour une épaisseur minimale de 5 mètres.

Cette thèse vise à valoriser des matériaux locaux pour leur éventuelle utilisation en tant que barrière passive au fond des CSD. Il s'agit d'une contribution expérimentale pour répondre aux exigences environnementales et techniques par une analyse détaillée de trois argiles de la région étudiée.

L'utilisation de ces argiles nécessite la maîtrise du comportement hydromécanique de ces matériaux, à savoir la conductivité hydraulique et les propriétés mécaniques dans le cas des sols saturés.

Dans le but d'adapter ces argiles aux exigences réglementaires une mise en œuvre technique conforme aux normes, un traitement à la chaux a été procédé pour perfectionner les caractéristiques requises.

L'analyse des résultats et les données bibliographiques ont permis d'une part d'évaluer l'importance du phénomène hydrique et l'intérêt des propriétés mécaniques dans le comportement d'une argile gonflante destinée pour les barrières ouvragées des ouvrages de stockage des déchets dangereux.

Mots clés : Argiles, barrière passive, chaux, perméabilité, Centre de Stockage des Déchets dangereux.

ABSTRACT

Containment of hazardous waste is one of the main disposal methods used worldwide, particularly in landfill sites. To protect groundwater, these facilities are generally built on a layer of natural or reconstituted clay, characterized by low permeability and referred to as a passive safety barrier. With regard to hazardous industrial and special waste, the majority of regulations in force impose a permeability of less than 1×10^{-9} m/s for a minimum thickness of 5 meters.

This thesis aims to valorize local materials for their possible use as passive barriers at the bottom of CSDs. It is an experimental contribution to meeting environmental and technical requirements through a detailed analysis of three clays from the study area.

The use of these clays requires mastery of the hydromechanical behavior of these materials, namely hydraulic conductivity and mechanical properties in the case of saturated soils.

In order to adapt these clays to regulatory requirements and ensure technical implementation in compliance with standards, lime treatment was carried out to perfect the required characteristics.

Analysis of the results and bibliographical data enabled us to assess the importance of the hydric phenomenon and the importance of mechanical properties in the behavior of a swelling clay designed for engineered barriers in hazardous waste storage facilities.

Key words: Clay, passive barrier, lime, permeability, hazardous waste landfill.

ملخص

إن احتواء النفايات الخطرة هو أحد الطرق الرئيسية المستخدمة للتخلص من النفايات الخطرة في جميع أنحاء العالم، ولا سيما في مواقع طمر النفايات. ولحماية المياه الجوفية، تبنى هذه المرافق بشكل عام على طبقة من الطين الطبيعي أو الطين المعاد تكوينه، والتي تتميز بنفاذية منخفضة وتعرف بحاجز الأمان المانع للتسرب. في حالة النفايات الصناعية الخطرة والنفايات الخاصة، تفرض غالبية اللوائح المعمول بها نفاذية أقل من 1×10^{-9} م/ثانية لسمك لا يقل عن 5 أمتار.

تهدف هذه الأطروحة إلى تطوير مواد محلية لإمكانية استخدامها كحاجز مانع للتسرب في قاع المجاري الصناعية الخاصة. وهي مساهمة تجريبية لتلبية المتطلبات البيئية والتقنية من خلال تحليل مفصل لثلاثة أنواع من الطين من منطقة الدراسة.

ويتطلب استخدام هذه الطين إتقان السلوك الهيدروميكانيكي لهذه المواد، أي التوصيل الهيدروليكي والخصائص الميكانيكية في حالة التربة المشبعة.

من أجل تكيف هذه الطين مع المتطلبات التنظيمية للتنفيذ الفني بما يتوافق مع المعايير، تم إجراء معالجة الجير لإتقان الخصائص المطلوبة.

وقد أتاح تحليل النتائج والبيانات البيليوغرافية تقييم أهمية الظاهرة المائية وأهمية الخواص الميكانيكية في سلوك الطين المتورم المخصص للحواجز الهندسية لهياكل تخزين النفايات الخطرة.

الكلمات المفتاحية: الطين، الحاجز المانع للتسرب، الجير، النفاذية، مدافن النفايات الخطرة.

Table de matière

Dédicaces.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	v
Abstract.....	vi
ملخص.....	vii
Introduction générale	1
Chapitre I: Synthèse bibliographique sur les déchets spéciaux et spéciaux dangereux	3
I.1 Introduction :	3
I.2 Généralités sur les déchets.....	3
I.2.1 Définition des déchets :	3
I.2.2 Types des déchets :.....	4
I.2.3 Critères de dangerosité	5
I.2.4 Classification des déchets.....	6
I.2.5 Les opérations sur les déchets	7
I.3 Les Déchets Spéciaux et Spéciaux Dangereux (DSD).....	8
I.3.1 Caractérisation des déchets.....	8
I.3.2 L'impact des déchets dangereux sur l'environnement et la santé	9
I.3.3 Production des déchets	12
I.3.4 Gestion des déchets spéciaux dangereux	16
I.3.5 Quantification des déchets dangereux de la région d'Adrar et leurs modes de traitement	25
I.3.6 Généralités sur les décharges.....	34
I.4 Conclusion.....	39
Chapitre II: Généralités sur les Centres de Stockage des Déchets.....	41
II.1 Introduction.....	41
II.2 Présentation des Centres de Stockage des Déchets (CSD) :	41
II.2.1 Définition des CSD :	41
II.2.2 Classification des CSD :	42
II.2.3 Étude des paramètres géologiques et géotechniques de cas d'implantation d'un CSD	42
II.2.4 Choix des matériaux adéquat, qualification d'échantillons	49
II.2.5 Traitements des matériaux constituant la barrière étanche	51
II.3 Durabilité et maintenance de la barrière passive d'un CSDD.....	53
II.3.1 Facteurs impactant la durabilité des barrières passives	53
II.3.2 Approches de maintenance et améliorations techniques	57
II.4 Les lixiviats des déchets dangereux : définitions et caractéristiques	57
II.4.1 Définition des lixiviats des déchets dangereux.....	58
II.4.2 Origine et formation des lixiviats	58
II.4.3 Caractéristiques des lixiviats des déchets dangereux.....	58
II.4.4 Impact environnemental et sanitaire	59

II.4.5	Méthodes modernes de gestion des lixiviats.....	59
II.5	<i>État de l'art sur les écoulements des lixiviats dans les argiles et les barrières passives à base d'argile</i>	60
II.5.1	Écoulement des lixiviats dans les argiles.....	60
II.5.2	Les écoulements des lixiviats dans les barrières passives à base d'argile	60
II.5.3	Développements récents et innovations.....	62
II.6	<i>Conclusion</i>	62
Chapitre III:	Identification des matériaux et méthodologie	64
III.1	<i>Introduction</i>	64
III.2	<i>Géolocalisation des sites d'étude</i>	64
III.2.1	Site de prélèvement.....	64
III.2.2	Caractéristiques climatiques de la région d'étude, Adrar	67
III.2.3	Localisation des gisements	67
III.3	<i>Identification des sols étudiés</i>	68
III.3.1	Caractéristiques chimiques	68
III.3.2	Caractéristiques physiques des Argiles d'Adrar	73
III.3.3	Caractéristiques mécaniques	83
III.4	<i>Récapitulation des résultats</i>	94
III.5	<i>Conclusion</i>	95
Chapitre IV:	Caractéristiques des nouveaux Matériaux	96
IV.1	<i>Introduction</i>	96
IV.2	<i>L'amélioration des sols par la chaux</i>	96
IV.2.1	Définitions et principes	96
IV.2.2	Identification de la chaux ajoutée	99
IV.3	<i>Amélioration des trois argiles par la chaux, essais et résultats</i>	101
IV.3.1	Détermination du pourcentage de chaux (essai de pH) pour A.....	101
IV.3.2	Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg ou limites de consistance (NF P 94-051)	103
IV.3.3	Effet de la chaux sur l'essai au bleu de méthylène à la tâche (Norme NF P94-068)	107
IV.3.4	Effet de la chaux sur les paramètres de compactage Proctor modifié des trois argiles.....	108
IV.4	<i>Conclusion</i>	113
Chapitre V:	Mesure de la perméabilité	114
V.1	<i>Introduction</i>	114
V.2	<i>Mesure indirecte de la perméabilité des trois types d'argiles</i>	114
V.2.1	Définition de l'essai.....	114
V.2.2	Perméabilité saturée à l'eau des trois types d'argiles	115
V.2.3	Effets de la chaux sur les propriétés du mélange choisi argile Adrar-chaux	116
V.3	<i>Mesure directe de la perméabilité de l'argile d'Adrar</i>	123
V.3.1	Définition de l'essai.....	123
V.3.2	Méthodologie et calcul.....	123
V.3.3	Effet de la chaux sur la perméabilité des mélanges	125
V.3.4	Comparaison de la perméabilité des mélanges par les deux méthodes, directe et indirecte ...	125
V.3.5	Résultats de MEB et DRX sur le mélange choisie (AA+6%)	126
V.3.6	Comparaison de la perméabilité du mélange choisie aux travaux antérieurs	128

<i>V.4 Conclusion.....</i>	<i>129</i>
Conclusion générale et perspectives.....	130
Références bibliographiques.....	132

Liste des figures

Introduction générale

Chapitre I :

Figure I. 1: L'impact environnemental et sanitaire des déchets dangereux (Kumar et al, 2023).....	10
Figure I. 2: Quantité de quelques types de déchets spéciaux et spéciaux dangereux ; (Source : AND, 2020).	16
Figure I. 3: Un cadre graphique de la génération, de la classification, des stratégies de gestion et des impacts des déchets dangereux. (Kumar et al, 2023)	17
Figure I. 4: Situation mondiale de la gestion des déchets solides municipaux (Geyer et al. 2017). b Statistiques par catégorie des déchets solides municipaux générés entre 2017 et 2021 en Inde (Kumar et al, 2023).....	19
Figure I. 5: Code couleur des déchets, activité de soins. source AND 2020.	21
Figure I. 6: Boîtes pour les PCT et Sacs en plastique pour déchets mous.	21
Figure I. 7: Exemples de stockage des HU à l'état non conforme.	21
Figure I. 8: Flux de déchets exportés en 2019 ; (Source : AND 2020).	23
Figure I. 9: Diagramme présentant la valorisation des déchets spéciaux et spéciaux dangereux.	23

Chapitre II :

Figure II. 1: principe de confinement (ADEME, 1999).	43
Figure II. 2: Coupe schématique de la double sécurité préconisée pour le stockage des déchets industriels spéciaux et dangereux (CARTAUD F, 2004), (Ait Saadi.L, 2003) et (guide technique aout 1996).	45
Figure II. 3: Coupe schématique de la double sécurité préconisée pour le stockage des déchets ménagers et assimilés selon la réglementation française, (Gautam, Kumar et al. 2019) et (guide technique aout 1996).	46
Figure II. 4: Diagramme du principe de l'étanchéité composite et des matériaux utilisés (CARTAUD F, 2004).	47
Figure II. 5: Influence de la teneur en bentonite sur la perméabilité (Didier et Rocha, 1996; Chapuis, 2002b, Yosra in 2024).....	52
Figure II. 6: Influence de la teneur en chaux et du temps de cure sur la perméabilité d'une argile compactée à l'optimum (a) pour (Nalbantoglu & Tuncer 2001) ;(b) d'un sol limoneux traité à la chaux (Brandl 1981) ; même pour un sol à indice des vides $e=2.0$ (Locat et al. 1996)	53
Figure II. 7: Dessiccation de barrières d'argile compactées (Rowe, 2018).	54

Figure II. 8: Principe d'étanchéité de fond d'un CSD selon la réglementation :(1) française (2) américaine ((a) pour les CSD de déchets ménagères et (b) pour les déchets dangereux) (Touze-Foltz, 2001).....	55
Figure II. 9: Exemple de surface de barrière minérale compactée de façon inappropriée (Cartaud. F, 2004)	56
Figure II. 10: Exemple de plis affectant une géomembrane PEHD soumise aux rayons solaires (a) plis de faible amplitude organisés de façon non-ordonnée (b) pli de grande Dimension Cartaud. F,2004	56

Chapitre III :

Figure III. 1: Situation géographique de la région d'Adrar	65
Figure III. 2: Carte de la région de Touat (Dubost, 2002)	65
Figure III. 3: Carte géologique du sous-affleurement de l'Algérie d'après WEC Algérie 1996 (Schlumberger / Sonatrach). (Tournier et al. 2010).	66
Figure III. 4: Localisation des sites étudiés : de Timimoun (AT) d'Adrar (AA), Ouayena Bouda (AB)	68
Figure III. 5: Schéma du mode opératoire et de l'appareillage de rayons X à réflexion des trois argiles, (laboratoire SM, université d'Adrar).....	69
Figure III. 6: Analyse minéralogique des matériaux utilisés.	69
Figure III. 7: Photographies au microscope électronique à balayage et analyse EDX des argiles AA, AB et AT successivement (laboratoire chimie dép. SM, université de Tlemcen).70	
Figure III. 8: Essai de sédimentométrie, (laboratoire GC, université d'Adrar).	75
Figure III. 9: Courbes granulométriques des trois sols (Adrar Nord, de Timimoun et de Bouda).	75
Figure III. 10: Les états de consistance.....	76
Figure III. 11: Classification des trois sols suivant l'abaque de Casagrande selon la classification L.C.P.C.....	77
Figure III. 12: Diagramme de plasticité (d'après Casagrande,1948 Howard, 1977)......	78
Figure III. 13: Classification des sols en fonction de VBs d'après Philipponat	81
Figure III. 14: Diagramme de nocivité (Lautrin, 1987).	81
Figure III. 15: Courbe de compactage à l'OPM des trois argiles étudiées	84
Figure III. 16: Évolution du potentiel de gonflement en fonction du temps des échantillons des trois argiles.	86
Figure III. 17: Résultat de l'essai du potentiel de gonflement d'argile AA.....	86
Figure III. 18: Courbes de compressibilité des trois argiles	88
Figure III. 19: Courbe de consolidation des trois argiles par la méthode de Taylor	90
Figure III. 20: Courbes de consolidation des trois argiles par la méthode de Casagrande.90	
Figure III. 21: Courbe de contrainte de cisaillement en fonction de la déformation (déplacement) des trois argiles	93
Figure III. 22: Les paramètres de l'essai de cisaillement	94

Chapitre IV :

Figure IV. 1: Mechanism de l'échange cationique (Shon et al, 2010).	97
Figure IV. 2: La floculation/agglomération (Prunsinski et Bhattacharja 1999).	97
Figure IV. 3: Réaction pouzzolanique (Prunsinski & Bhattacharja 1999)	98
Figure IV. 4: Diffractogramme X de l'essai de la chaux	100
Figure IV. 5: Effet de la chaux sur le pH	102
Figure IV. 6: Organigramme de l'amélioration des trois argiles par la chaux.....	103
Figure IV. 7: Les états de consistance traités à la chaux pour chaque argile.....	106
Figure IV. 8: Classification des trois sols traités à la chaux (2, 4 et 6%) suivant l'abaque de Casagrande de la classification L.C.P.C.....	107
Figure IV. 9: l'essai de bleu de méthylène pour des dosages de 2%,4% et 6% de chaux avec AA et AT et AB	107
Figure IV. 10: Courbes de compactage à OPM de l'argile des mélanges (2%,4% et 6%) de chaux pour les trois argiles.....	109
Figure IV. 11: Variation de la densité sèche maximale en fonction de % de chaux des trois argiles	110
Figure IV. 12: Variation de la teneur en eau optimale en fonction de % de chaux des trois argiles.	111
Figure IV. 13: L'évolution de la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale pour chaque type d'argile AA, AT et AB en fonction du dosage en chaux	112

Chapitre V :

Figure V. 1: L'effet de la teneur en eau de l'énergie de compactage sur la perméabilité (d'après Daoud,1996).....	115
Figure V. 2: Évolution du gonflement libre des échantillons non traités et traités en fonction du temps	117
Figure V. 3: Évolution du gonflement libre de l'argile par rapport aux % chaux	118
Figure V. 4: Courbes de compressibilité en fonction du % de chaux	119
Figure V. 5: Coefficient de consolidation C_v en fonction de la chaux par la méthode de Taylor et Casagrande.....	120
Figure V. 6: Courbes des paramètres de l'essai de cisaillement sans et avec traitement à la chaux	121
Figure V. 7: Les paramètres de l'essai de cisaillement pour les mélanges AA+%C	122
Figure V. 8: Cellule triaxiale et son système de contrôle pression-volume (GDS) et d'acquisition HP Agilent 34970A	124
Figure V. 9: Perméabilité du mélange argile+-chaux (par les méthodes de Taylor, Casagrande et triaxiale).....	126
Figure V. 10: MEB et test EDS. argile non traitée non broyée (brute), b broyée, c argile traitée avec 6 % de chaux, d EDS de l'argile brute, e EDS de l'argile traitée avec 6 % de chaux.	127
Figure V. 11 : Test XRD pour l'argile non traitée et traitée avec 6 % de chaux.....	127

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I. 1: Classification des déchets selon la législation française cité dans (Gaidi, 2002).....	6
Tableau I. 2: Nombre des installations privées d'élimination des DSD en Algérie.	24
Tableau I. 3: Nombre d'installations de stockage et d'élimination des DSD en Algérie; (Source : AND).	24
Tableau I. 4: Production et stocks des déchets spéciaux et /ou dangereux -Année 2011. Wilaya D'Adrar – Direction de l'environnement.....	27
Tableau I. 5: Production et stocks des déchets spéciaux et /ou dangereux -Année 2019/2020.....	29
Tableau I. 6: Prise en compte dans le choix du site d'une installation d'élimination des déchets dangereux (Misra et Pandey, 2004).....	38

Chapitre II :

Tableau II. 1: Résumé de l'épaisseur et de la perméabilité des couches géologiques recommandées dans le règlement pour l'établissement des barrières de sécurité passives dans les décharges pour les déchets industriels spéciaux et les déchets ménagers et assimilés (Guide technique, août 1996).	45
Tableau II. 2: Réglementations pour les installations de stockage des déchets pour différents pays (Devernay 2008).	46

Chapitre III :

Tableau III. 1: Caractéristiques des sols de la région d'Adrar	66
Tableau III. 2: Analyse chimique des trois argiles (laboratoire la Farge, de Mascara).....	71
Tableau III. 3: Teneur en CaCO ₃ % laboratoire de Génie civil (université de Tlemcen).	72
Tableau III. 4: Teneur en CaCO ₃ de quelques sols (RE Grim,1959)	72
Tableau III. 5: Composition chimique des argiles étudiées (laboratoire SERSOA d'Adrar). 73	
Tableau III. 6: pH des argiles étudiées.	73
Tableau III. 7: Résultats de l'essai du poids spécifique des grains solides des trois argiles.. 74	
Tableau III. 8: Densité des grains solides de quelques minéraux d'après Withman et Lambein, in Costet et Sangléat, 1983.	74
Tableau III. 9: Etude du comportement plastique.	76
Tableau III. 10: Paramètres tirés des limites d'Atterberg.	76
Tableau III. 11: Classification des sols selon leurs activités (Skempton, 1953).	79
Tableau III. 12: Activité des différents des argiles étudiées.	79
Tableau III. 13: Activité des différents minéraux (Skempton, 1953 et Mitchell, 1976), (RD Holtz and WD Kovacs, 1981).	79
Tableau III. 14: Paramètres tirés de l'essai au bleu.....	80
Tableau III. 15: Classification selon SST d'après Holtz et Gibbs.	81

Tableau III. 16: Estimation du potentiel de gonflement (SNETHEN et al. 1977).....	82
Tableau III. 17: Estimation du potentiel de gonflement, O'NELL et POORMOAYED (1980).	82
Tableau III. 18: Estimation du potentiel de gonflement selon HOLTZ et al. 1973.	82
Tableau III. 19: Synthèse des paramètres de consistance (Argile Adrar).	82
Tableau III. 20: Synthèse des paramètres de consistance (Argile Bouda).	83
Tableau III. 21: Synthèse des paramètres de consistance (Argile Timimoun).....	83
Tableau III. 22: Résultats des paramètres de l'essai Proctor Modifié.....	83
Tableau III. 23: Paramètres de l'essai œdométrique des trois argiles	88
Tableau III. 24: Risque de gonflement (G.Philippinat 1978).....	89
Tableau III. 25: Classification selon le rapport $C_c/(1+ e_0)$ (Philippinat & Hubert 1997).	89
Tableau III. 26: Classement des valeurs de coefficient de consolidation C_v en fonction de la nature des sols	90
Tableau III. 27: Paramètres de l'essai de consolidation des trois argiles.....	90
Tableau III. 28: Classement des valeurs de coefficient de consolidation C_v en fonction de la nature des sols	90
Tableau III. 29: Classification des sols fins en fonction de la résistance au cisaillement non drainé	92
Tableau III. 30: Synthèse comparative des trois argiles pour l'essai de cisaillement.....	92

Chapitre IV

Tableau IV. 1: Analyse chimique de l'argile AA et de la chaux avec et sans traitement (laboratoire de Lafarge, de Mascara) (Khedidja.B et al, 2024).....	100
Tableau IV. 2: Résultats de l'essai au bleu des trois argiles traitées à la chaux	108

Chapitre V :

Tableau V. 1: Résultats des coefficients de consolidation et de perméabilité sur les trois types d'argiles	116
Tableau V. 2: Variation des paramètres de gonflement des échantillons traités et non traités	117
Tableau V. 3: Paramètres de compressibilité des échantillons traités et non traités.....	119
Tableau V. 4: Résistance au cisaillement pour les mélanges sol argileux-chaux à différentes proportions	122
Tableau V. 5: Comparaison de la perméabilité des CSDD des travaux antérieurs.....	128

Liste des Abréviations

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (France)

AND : Agence Nationale des Déchets

ASP : la Pile Statique Aérée

ASTM : American Society for Testing and Materials

BSP : Barrière de Sécurité Passive

BS : British Standards

CFG : Comité Français de Géosynthétiques

CET : Centre d'Enfouissement Technique

CNDS : Cadastre National des Déchets Spéciaux

COV et COSV : les Composés Organiques Volatils ou Semi-Volatils

CSDSD : Centre de Stockage des Déchets Spéciaux Dangereux

CSD : Centre de Stockage de Déchets

CSDD / ICSD : Installations (ou Centres) de Stockage des Déchets Dangereux

CSDU : Centre de Stockage des Déchets Ultimes

DASRI : Déchets d'activités de soins à risque infectieux

DBO : Demande Biologique en Oxygène

DCO : Demande Chimique en Oxygène

DEDG : Dispositif d'Étanchéité et de Drainage Géosynthétique

DDG : Dispositif de Drainage Géosynthétique

DEEE : Déchets des Equipements Electriques et Electroniques

DEG : Dispositif d'Étanchéité Géosynthétique

DID : Déchets Industriels Dangereux

DMD : Déchets Ménagers et Dangereux

DMA : Déchets Ménagers et Assimilés

DMS : Déchets Ménagers Spéciaux

DMS : Déchets Municipaux Solides

DS/DSD : déchets spéciaux et spéciaux dangereux

EOLE : Laboratoire Eau et Ouvrage dans leur Environnement (Laboratoire)

FNADE : Fédération Nationale des Activités de Dépollution et de l'Environnement

GSB : Géosynthétiques Bentonitique

ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

ISDND : Installations de Stockage de Déchets Ménagers et Assimilés Non Dangereux

JORA : Journal Officiel de la République Algérienne n°

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – France

LNHC : Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

LTPO : Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest

MATE : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (Algérie)

MO : Matière Organique

Mt : Tonnes Métriques

NB : Normes Belges

ONEED : Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable

PEBD : Polyéthylène Basse Densité

PEHD : Polyéthylène Haute Densité

PCB : polychlorobiphényles

PNAE-DD : Plan National d'Action pour l'Environnement et le Développement Durable

PNAGDES : Programme National de Gestion des Déchets Spéciaux

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

PROGDEM : Programme National pour la Gestion Intégrée des Déchets Ménagers

PU : Pneus hors d'usage

PVC : Polychlorure de Vinyl

SERSOA : Sol et Eau Région Sud-Ouest Adrar

SNGID : Stratégie Nationale de la Gestion Intégrée des Déchets

Liste des symboles

A_c : Coefficient d'activité de Skempton

C_c : Indice de compressibilité

C_s : Indice de gonflement

I_L : Indice de Liquidité

I_p : Indice de plasticité

I_R : Indice de retrait

K : Perméabilité cinématique

S_{ST} : Surface spécifique totale

V_{BS} : Valeur au bleu du sol

C_{UU} : Cohésion non consolidée non drainée

ϕ_{UU} : Angle de frottement interne non consolidé non drainé

G_L : Gonflement libre

P_g : Pression de gonflement

M_v : Coefficient de compressibilité volumique

T_v : Facteur temps

C_v : Indice de consolidation

U : degré de consolidation

$CaCO_3$: Carbonate de calcium

SiO_2 : Silice

Al_2O_3 : oxyde d'alumine

Fe_2O_3 : Oxyde de fer

ω_L : Limite de liquidité

ω_{opm} : Teneur en eau à l'optimum

ω_P : Limite de plasticité

ω_R : Limite de retrait

γ_s : Poids volumique des grains solides

γ_d : Poids volumique sec

$\gamma_{d_{OPM}}$: poids volumique sec à l'OPM

σ : Contrainte normale

τ : Contrainte tangentielle

e_0 : Indice de vides initial

σ'_p : Contrainte effective de pré consolidation

Introduction générale

Un déchet dangereux présente une ou plusieurs propriétés qui peuvent être de nature solide, organique (solvants, hydrocarbures...), minérales (acides, boues d'hydroxydes métalliques, ...) ou gazeuse selon la fédération nationale des activités de dépollution et de l'environnement). Le développement technologique rapide et ainsi que les besoins de la population entraînent la production de quantités croissantes des déchets dangereux. À l'échelle mondiale, le Programme des Nations Unies pour l'environnement a estimé que plus de 400 millions de tonnes de déchets dangereux sont produits universellement chaque année, soit près de 13 tonnes par seconde, principalement par les pays industrialisés (Schmit, 1999, The World Counts 2023). Les déchets dangereux peuvent causer des dommages importants à notre santé et à l'environnement.

Dans le sud de l'Algérie, le développement rapide des zones urbaines et la croissance de l'industrie pétrolière commencent à générer d'énormes quantités de déchets dangereux, qui posent un problème fondamental de gestion et le contrôle des risques de pollution de la nappe phréatique.

Les modes de traitement des déchets dangereux comportent différentes techniques : le recyclage et la valorisation, traitements physico-chimique, biologique, thermique ou stockage, l'ingénieur est confronté à un problème de choix en tenant compte des aspects techniques et des aspects environnementaux et économiques. La solution choisie pour traiter ce problème de contamination dans cette recherche est le stockage, qui vise d'enfermer les déchets dans des lieux spécifiques, dites centre de stockage des déchets, en utilisant des barrières isolantes (barrière passive). Ces barrières peuvent être artificielles (géomembranes), naturelles ou rapportées comme les couches compactées.

Dans le but d'une efficacité pour l'isolation, les barrières passive doivent répondre à certaines spécifications ; à savoir :

(1) La perméabilité à l'état saturé est comprise entre 10^{-8} m/s et 10^{-10} m/s (Chapuis 1990 ; Marcoen et al, 2000 ; Souli et al, 2008).

(2) Une stabilité physique du matériau lors de son contact avec l'eau (Thériault, 2001).

(3) Les propriétés de gonflement doivent assurer un bon contact avec la roche mère, ils permettent le remplissage des fissures existantes ou qui se développeraient à l'avenir (Yilmaz and Marschalko, 2014).

Un autre intérêt environnemental et vital de la zone d'étude du sud Algérien contient un grand réservoir des eaux souterraines qui est la nappe de l'Albien (Bellal et al, 2016). Cette nappe est la plus grande réserve mondiale d'eau douce ; elle s'étend entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye. Environ 70% de la nappe se trouve dans le territoire Algérien au sud-est du pays. Cette particularité nécessite une protection urgente devant la progression des sources de pollution.

Dans le cadre du développement durable devant ce problème dans une région vaste et aride, on propose des barrières ouvragées (couche passive) d'argile qui seront destinées à la réalisation des fonds des centres de stockage des déchets. Cette thèse vise d'approfondir des connaissances dans ce sens par exploitation et valorisation des matériaux locaux en respectant les exigences des normes et réglementation en vigueur.

Après cette introduction la thèse comporte cinq chapitres et une liste des références bibliographiques :

Chapitre 1 : Ce chapitre présente une synthèse sur les déchets, les déchets spéciaux dangereux en particulier y compris l'impact et gestion de ces déchets. Nous aborderons aussi dans ce chapitre la quantification des déchets dangereux de la région d'Adrar. Il comporte aussi des généralités sur les décharges.

Chapitre 2 : Le deuxième chapitre est dédié aux différentes phases de conception des centres stockage des déchets suivi par la durabilité et maintenance de la barrière passive de ces types des C.S.D; en finalisant par une vue sur les lixiviats des déchets dangereux et leurs écoulements dans les argiles et les barrières passives à base d'argile en particulier.

Chapitre 3 : Le troisième chapitre illustre l'identification et la caractérisation physico-chimique, mécanique et minéralogique des différents matériaux locaux de la région d'Adrar, méthodologie et planning expérimentales font l'objet de ce chapitre pour les trois argiles étudiées. Une interprétation et analyse des résultats sont détaillées pour répondre aux objectifs visés.

Chapitre 4 : Le quatrième chapitre présente l'amélioration des propriétés des trois argiles par traitement à la chaux et évaluation de l'impact sur leurs caractéristiques géotechniques dans le but de recherche des nouveaux matériaux respectant les exigences et les critères réglementaires des CSD.

Chapitre 5 : Le cinquième chapitre est consacré à une étude expérimentale détaillée sur la perméabilité de l'argile sélectionnée avant et après traitement. Il vise l'observation de comportement hydrique et mécanique de l'argile naturelle avec un traitement à la chaux. Encore une autre fois l'analyse se réfère aux travaux antérieurs et aux exigences réglementaires.

Nous achèverons par une conclusion générale qui regroupe les conclusions partielles des chapitres ainsi que les principaux résultats obtenus dans cette modeste recherche. Des perspectives ainsi que des pistes pour des futurs travaux de recherche sont aussi donnés.

Chapitre I :

Synthèse bibliographique sur les déchets spéciaux et spéciaux dangereux

Chapitre I: Synthèse bibliographique sur les déchets spéciaux et spéciaux dangereux

I.1 Introduction :

À l'échelle mondiale, la quantité de déchets solides municipaux et industriels ne cesse d'augmenter, tant en volume qu'en proportion par habitant. La richesse joue un rôle crucial dans la quantité des déchets qu'un pays produit. Le développement d'un pays engendre une production importante de déchets qui augmente également. Cette croissance entraîne ultimement des risques élevés de pollution des sols, de l'eau et de l'air, mettant sérieusement en péril la santé publique.

En Algérie, les articles 66 et 68 de la constitution nationale, qui date de 2015, sont consacrés à la préservation de la santé publique ainsi qu'au droit à un environnement sain, aussi voit-on une volonté politique d'implémenter une gestion saine et intégrée des déchets. À cet effet, des efforts considérables ont été fournis dans une perspective de gestion des déchets dangereux et des déchets spéciaux et dangereux (DS/DSD) depuis au moins deux décennies. Le retour d'expérience, selon (AND, 2020), aurait permis d'évaluer l'évolution des savoirs réglementaires et institutionnels, savoirs techniques et financiers, mais aussi les défaillances dans la délivrance et gestion de certains programmes. Pas des moindres, la mise en place d'un cadre réglementaire, par le biais de la loi-cadre n°01-19 du 12 Décembre 2001. Mais aussi d'un cadre inter-institutionnel, prévoyant la répartition des responsabilités, selon des modalités précises entre le Ministère de l'Environnement (ME), les organismes sous l'autorité du ME (Agence Nationale des Déchets AND, CNTPP, CNFE, ...), le Ministère de l'Intérieur, des Collectivités Locales et de l'Aménagement du Territoire (MICLAT) et les collectivités locales (Wilayas, Communes, ...). Ce chapitre donne une vue générale sur les déchets. Ensuite, une étude bibliographique sur les déchets spéciaux et spéciaux dangereux a été détaillée, mettant en évidence leurs caractérisation, leurs impacts sur l'environnement et la santé, et mode de traitement et de gestion (à l'échelle mondiale et nationale), leurs quantifications dans la région d'Adrar. La dernière partie du chapitre présente des généralités sur les décharges.

I.2 Généralités sur les déchets

I.2.1 Définition des déchets :

Sur le *plan environnemental*, on englobe sous le terme « déchets » tous les déchets solides, liquides et gazeux. Un déchet peut être défini de différentes manières selon le domaine et l'intérêt d'étude et parfois l'origine et l'état des déchets.

Sur le *plan juridique*, la loi N° 01-19 du 12/12/ 2001 article 3 du journal officiel de la république algérienne N° 77 en 2001, relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets ; définit :

Les déchets : 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 (PNUD-MATE, 2008).

Conformément à la loi N°01-19 du 12 Décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, il existe plusieurs types de déchets classés selon leurs natures, leurs degrés de dangerosité et leurs valorisations ou élimination. Parmi ces déchets on cite

I.2.2 Types des déchets :

Selon l'article 03 de la loi 01-19 du 12 décembre 2001, on définit les types des déchets comme suit :

Les déchets ménagers et assimilés qui Incluent les déchets issus des maisons ainsi que ceux provenant d'activités industrielles, commerciales et artisanales, présentant des caractéristiques (de leur nature et de leur composition) similaires aux déchets domestiques ménagers.

Déchets encombrants : Désignent les déchets ménagers de grande taille qui ne peuvent être collectés avec les déchets ménagers et assimilés.

Les déchets spéciaux : Comprennent les déchets issus de l'agriculture, de l'industrie, des services et des établissements de santé. En raison de leur nature et de leur composition, leur collecte, transport et traitement nécessitent des conditions spécifiques non les même que les déchets ménagers et assimilés, ainsi que les déchets inertes.

➤ **Les déchets spéciaux dangereux** : Catégorie de déchets spéciaux contenant des substances nocives pouvant nuire à la santé publique et/ou à l'environnement.

➤ **Déchets d'activité de soins** : Déchets générés par les activités médicales et vétérinaires, incluant le diagnostic, le traitement et le suivi des patients.

➤ **Déchets inertes** : Résultent de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de construction, démolition ou rénovation. Ces déchets ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge et ne contiennent pas de substances dangereuses.

● Les déchets interdits Représentent un risque pour la santé et la sécurité publique. Cette catégorie inclut :

- ✓ Les déchets contaminés provenant des établissements hospitaliers.
- ✓ Les déchets infectieux ou anatomiques.
- ✓ Les substances non refroidies pouvant provoquer des incendies.
- ✓ Les déchets liquides, même stockés dans des récipients hermétiques.
- ✓ Les déchets radioactifs ou explosifs.

I.2.3 Critères de dangerosité

Selon le décret exécutif n°06-104 du 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux, la dangerosité des déchets repose sur plusieurs critères : (JORA.2006). :

➤ **Explosif**

Déchet pouvant provoquer une réaction exothermique rapide avec dégagement de gaz, entraînant une explosion en cas de confinement partiel.

➤ **Comburante**

Déchet réagissant de manière exothermique au contact d'autres substances, notamment inflammables.

➤ **Extrêmement inflammable**

Déchet ayant un point d'éclair et un point d'ébullition très bas, ou un gaz inflammable à température et pression ambiantes.

➤ **Facilement inflammable**

Déchet pouvant s'enflammer spontanément à température ambiante, brûler après un simple contact avec une source d'ignition, ou produire des gaz inflammables au contact de l'eau.

➤ **Inflammable**

Déchet liquide dont le point d'éclair est bas.

➤ **Irritant**

Déchet non corrosif pouvant provoquer une réaction inflammatoire en cas de contact prolongé avec la peau ou les muqueuses.

➤ **Nocif**

Déchet pouvant entraîner des effets aigus ou chroniques par inhalation, ingestion ou contact cutané.

➤ **Toxique**

Déchet présentant un risque de toxicité même à faible dose, pouvant causer des maladies graves ou la mort.

➤ **Cancérogène**

Déchet augmentant le risque de cancer par inhalation, ingestion ou contact cutané.

➤ **Corrosif**

Déchet capable de détruire les tissus vivants au contact.

➤ **Infectieux**

Déchet contenant des micro-organismes ou toxines pouvant provoquer des maladies.

➤ **Toxique vis à vis de la reproduction**

Déchet susceptible d'affecter la fertilité ou de causer des anomalies chez la descendance.

➤ **Mutagène**

Déchet pouvant induire des défauts génétiques héréditaires.

➤ **Dangereuse pour l'environnement**

Déchet risquant de modifier les équilibres naturels (air, sol, eau, faune, flore) de manière immédiate ou différée.

Toute personne physique ou morale dont l'activité génère des déchets (JORA.2001).

I.2.4 Classification des déchets

Selon la loi n°01-19 du 12 décembre 2001, les déchets sont classés en fonction de leur origine et de leur toxicité :

- Les déchets spéciaux, incluant les déchets spéciaux dangereux.
- Les déchets ménagers et assimilés.
- Les déchets inertes.

Tableau I. 1: Classification des déchets selon la législation française cité dans (Gaidi, 2002).

	Classe I	Classe II	Classe III
Nature des sites	Sites imperméables	Sites semi-imperméable	Sites perméables
Nature des déchets	Industriels spéciaux	Ménagers	Inertes
But	Eviter la dispersion dans l'environnement	Vers un déchet ultime et éviter la dispersion	Eviter la dispersion Dans l'environnement
Aménagement	Enveloppe étanche (fond et couverture)	Enveloppe étanche (Fond et couverture)	Pas d'étanchéité de couverture
Future	Long terme pas d'évolution	20/30 fermentescibles évolutifs	Long terme Pas d'évolution
Ultérieurement	Maintien surveillance	Abandon ; aménagement du site pour d'autres usages	Aménagement du site pour d'autres usages

En Algérie la nomenclature des déchets sont décrits dans le journal officiel de la république Algérienne n° 13 du 5 Safar 1427, 5 mars 2006. Elle est donnée sous forme d'un tableau de quatre colonnes, la première pour le code du déchet, la deuxième pour la désignation du déchet, la troisième pour la classe du déchet et la quatrième donne les critères de dangerosité.

Les classes sont les suivants :

- Classe I : S, SD : Les déchets spéciaux, incluant les déchets spéciaux dangereux.
- Classe II : MA : Les déchets ménagers et assimilés.
- Classe III : I : Les déchets inertes.

Cette étude concerne la classe 1 uniquement.

I.2.5 Les opérations sur les déchets

La gestion des déchets regroupe plusieurs étapes définies par la loi n°01-19 du 12 décembre 2001 :

Générateur de déchets : toute personne physique ou morale dont l'activité produit des déchets.

Détenteur de déchets : Toute personne possédant des déchets, indépendamment de leur origine.

Gestion des déchets : Ensemble des opérations liées à la collecte, tri, transport, stockage, valorisation et élimination des déchets, incluant le contrôle de ces processus.

Collecte des déchets : Récupération et regroupement des déchets en vue de leur acheminement vers un centre de traitement.

Tri des déchets : Séparation des déchets en fonction de leur nature afin d'optimiser leur traitement.

Traitement écologiquement rationnel : Ensemble des mesures visant à assurer que les déchets sont traités (valorisés, stockés et éliminés) sans impact négatif sur la santé humaine et l'environnement.

Valorisation des déchets : Regroupe les procédés de réutilisation, recyclage et compostage visant à donner une seconde vie aux déchets.

Le compostage : il s'agit d'un processus biologique au cours duquel les déchets organiques sont dégradés par les micro-organismes du sol pour produire un matériau stable et hygiénique appelé **compost**.

Élimination des déchets : Regroupe l'ensemble des techniques utilisées pour traiter les déchets lorsqu'ils ne peuvent pas être valorisés. Cela inclut le traitement thermique, physico-chimique et biologique, ainsi que leur mise en décharge, enfouissement, immersion ou stockage.

Immersion des déchets : désigne tout rejet ou déversement de déchets dans le milieu aquatique.

Enfouissement des déchets : Correspond au stockage des déchets en sous-sol.

Installation de traitement des déchets : Regroupe toute installation dédiée à la valorisation, au stockage, au transport et à l'élimination des déchets.

Mouvement des déchets : Englobe les différentes opérations de transport, transit, importation et exportation des déchets.

L'incinération des déchets Procédé consistant à brûler la partie combustible des déchets dans des installations adaptées, permettant ainsi une réduction significative de leur volume. Ce procédé concerne notamment les hydrocarbures, huiles, peintures et déchets issus de l'usage. Les résidus de l'incinération (cendres, mâchefer) sont ensuite acheminés vers un centre d'enfouissement technique.

L'enfouissement technique : Les déchets spéciaux ultimes, qui ne peuvent plus être traités par les techniques actuelles ni valorisés, sont dirigés vers des centres d'enfouissement technique (C.E.T). Ces déchets, principalement solides et minéraux, contiennent des métaux lourds peu mobilisables. Ils présentent une très faible réactivité, une évolution lente et une solubilité réduite, limitant ainsi leur impact environnemental.

I.3 Les Déchets Spéciaux et Spéciaux Dangereux (DSD)

L'essor de l'économie et le développement de certaines industries, couplés à la croissance permanente de la population algérienne, ont concouru à une génération toujours plus forte de déchets spéciaux et spéciaux dangereux.

Dans le cadre de la mise en œuvre du Plan National de Gestion des Déchets Spéciaux (PNAGDES) qui a été alloué au Ministère de l'Environnement et confié à l'Agence Nationale des Déchets (AND) qui a initié un programme de diagnostic ayant pour objectif d'enrichir la base de données sur les déchets spéciaux et spéciaux dangereux en réalisant des bilans sur le site des installations génératrices de déchets spéciaux.

I.3.1 Caractérisation des déchets

La caractérisation des déchets est une exigence essentielle dans l'élaboration d'un plan de gestion efficace des déchets industriels (Sharma et Lewis, 1994). Avant d'établir des stratégies pour le contrôle et le traitement des déchets, il est nécessaire de savoir si les déchets contiennent des constituants dangereux (Hoornweg et Thomas, 1999). L'un des systèmes les plus simples pour la caractérisation des déchets industriels, consiste à examiner les industries qui ont montré un fort potentiel de production de déchets dangereux, par exemple l'électro plaquage, le pétrole, le tannage, les pesticides, les industries des batteries au plomb-acide, etc., et de recueillir des informations concernant la nature des déchets en tenant compte des points suivants :

- Un tableau des classes de déchets identifiant les déchets compatibles et non compatibles devrait être élaboré lors du processus de caractérisation des déchets.
- Identification des produits chimiques critiques dans chaque type pour la surveillance.
- Les déchets potentiellement non compatibles devraient être identifiés, ainsi que les conséquences potentielles de telles mélanges.

De plus, les déchets compatibles voire même amicaux devraient être identifiés.

Après avoir identifié les déchets, les déchets dangereux peuvent être caractérisés sur la base des risques qu'ils présentent. Ces déchets se divisent en trois catégories.

I.3.1.1 Déchets à haut risque

Ils contiennent des concentrations significatives de constituants hautement toxiques, mobiles, persistants et/ou bio accumulatifs, par exemple les solvants chlorés, les déchets de dégraissage des métaux (en raison de leur toxicité, de leur mobilité et dans une certaine mesure de leur persistance dans l'environnement, etc.), les déchets de cyanure (en raison de leur haute toxicité, etc.), les déchets à base de dioxine (en raison de leur potentiel de haute toxicité et d'effets cancérogènes, etc.), les déchets de PCB (polychlorobiphényles) (en raison de leurs propriétés de persistance et de bioaccumulation, etc.).

I.3.1.2 Déchets à risque intermédiaire

Ils contiennent des boues d'hydroxyde de métal (à l'exception du Cr_6^+ qui est classé comme déchet à haut risque en raison de son extrême toxicité). Dans cette catégorie, les métaux toxiques sont relativement insolubles et ont une faible mobilité.

I.3.1.3 Déchets à faible risque

Ils comprennent principalement des déchets à haut volume et faible danger et certains déchets putrescibles.

I.3.2 L'impact des déchets dangereux sur l'environnement et la santé

Une quantité considérable de déchets est potentiellement dangereuse pour les systèmes écologiques (sol, air et eau) et la santé humaine (Xu et al, 2018). La manipulation, le stockage, le traitement et l'élimination incorrects des déchets dangereux ont un impact néfaste sur l'environnement et la santé.

L'inhalation de gaz malodorants générés par les déchets (en particulier les produits chimiques dangereux) peut entraîner de graves problèmes de santé (Torkashvand et al, 2020) et parfois même causer la mort en cas d'absorption significative. Dans certains cas, même de faibles doses de produits chimiques dangereux entraînent des problèmes de santé graves.

L'exposition non contrôlée des déchets dangereux au sol, à l'eau et à l'air entraîne divers problèmes environnementaux et de santé (Bennett, 1988). Plusieurs moyens, tels que le contact cutané, l'inhalation et l'ingestion, permettent d'être exposé aux déchets dangereux. Une exposition à long terme à de tels déchets peut entraîner plusieurs risques pour la santé. L'impact des déchets dangereux sur l'environnement et la santé est représenté dans la Figure I.1.

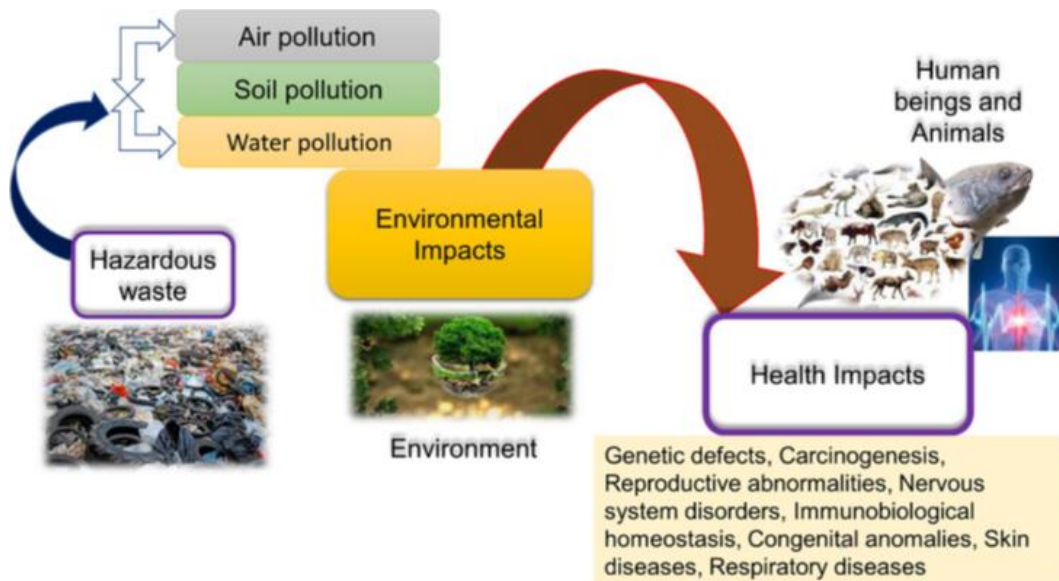


Figure I. 1: L'impact environnemental et sanitaire des déchets dangereux (Kumar et al, 2023).

I.3.2.1 Facteurs influençant la réponse humaine aux produits chimiques toxiques

Les facteurs pertinents influençant la réponse humaine aux produits chimiques toxiques présents dans l'environnement sont :

- Le dosage (car une grande dose peut signifier un effet immédiat),
- L'âge (puisque les personnes âgées et les enfants sont plus susceptibles aux toxines),
- Le sexe (puisque chaque sexe présente des hypersensibilités contrôlées par les hormones),
- Le poids corporel (qui est inversement proportionnel aux réponses/effets toxiques),
- Le statut psychologique (car le stress augmente la vulnérabilité),
- La génétique (car différents taux métaboliques affectent les réponses des récepteurs),
- Le statut immunologique et la présence d'autres maladies (car l'état de santé influence le métabolisme général),
- Les conditions météorologiques (puisque la température, l'humidité, la pression barométrique, la saison, etc., peuvent potentiellement affecter les taux d'absorption).

I.3.2.2 Effets sanitaires sur les populations exposées à des produits chimiques dangereux

Plusieurs effets sanitaires d'une importance primordiale peuvent affecter les populations exposées à des produits chimiques dangereux (Grisham, 1986). Ces effets sanitaires comprennent :

- La carcinogenèse (c'est-à-dire la formation de cancers).

- Les défauts génétiques, y compris la mutagenèse (c'est-à-dire des altérations des gènes transmises d'une génération à l'autre ou causant des dommages génétiques héréditaires).
- Les anomalies de la reproduction, y compris la tératogenèse (c'est-à-dire des dommages au fœtus en développement qui ne sont pas nécessairement liés aux effets toxiques sur la mère).
- Les altérations de l'homéostasie immunobiologique.
- Les troubles du système nerveux central (SNC).
- Les anomalies congénitales.

I.3.2.3 La pollution de l'eau

La contamination de l'eau peut résulter de la dispersion anarchique des déchets ou de leur élimination irresponsable, pouvant entraîner des maladies transmissibles par voie hydrique telles que le choléra et la typhoïde (Bhardwaj et al, 2025). De plus, les rejets polluants peuvent affecter les eaux souterraines, qui constituent une source cruciale d'eau potable, en raison de l'infiltration des lixiviats provenant du lessivage des décharges par les eaux de pluie (Dorbane, 2004). Cette pollution des nappes phréatiques est exacerbée par la lente percolation des nombreux contaminants provenant des décharges industrielles (Ramade, 2005).

I.3.2.4 La pollution de l'air

Lorsque l'air contient des substances qui ne font pas partie de sa composition naturelle de base, on le considère comme pollué, ce qui peut entraîner diverses nuisances, plus ou moins graves (Desachy, 2001 ; Bhardwaj et al, 2025). La décomposition naturelle des déchets produit divers sous-produits et émissions, tels que le méthane (CH₄), le dioxyde de carbone (CO₂), l'hydrogène (H₂), l'ammoniac (NH₃), les chlorofluorocarbones (CFC), dont la concentration dans l'atmosphère peut avoir des effets irréversibles et dangereux, tels que l'effet de serre et les pluies acides (Dorbane, 2004).

La combustion, qu'elle soit provoquée de manière intentionnelle, accidentelle ou spontanée des dépôts de déchets à l'air libre, constitue la principale source de pollution de l'air. Elle génère d'importantes quantités de fumées et d'odeurs nauséabondes.

I.3.2.5 La pollution de sol

Les sols, en raison de leur rôle central dans les échanges avec les autres composantes des écosystèmes, sont des systèmes particulièrement vulnérables et sont fréquemment exposés à la pollution par diverses particules toxiques. Ils servent de voies de passage pour de nombreux flux de matières (Ngo and Regent, 2004 ; Bhardwaj et al, 2025).

Dans les zones périphériques des agglomérations, on observe presque systématiquement une contamination des sols au niveau des friches industrielles et des sites industriels en activité. Ces zones présentent souvent une pollution très intense résultant de déversements, parfois volontaires dans le passé, de divers résidus minéraux ou organiques extrêmement toxiques, ainsi que des dépôts de déchets associés (Ramade, 2005).

Les retombées atmosphériques provenant de l'incinération, comprenant des métaux lourds, des composés organiques volatils, et la percolation des lixiviats des décharges, ainsi que l'épandage de divers composants ou de boues, contribuent à la contamination physico-chimique et/ou microbiologique des sols (Nollet and Beaulieu, 1995).

I.3.2.6 Détérioration des paysages

Les décharges sauvages, constituées des déchets abandonnés par les piétons (tels que papier, mégots de cigarettes, tickets, emballages divers, etc.), ainsi que ceux laissés par les animaux, sont une source de nuisances esthétiques et visuelles dans notre environnement. La circulation automobile contribue également à cette problématique. De nombreux sites touristiques voient leur attractivité diminuer en raison de la détérioration de la qualité de leur environnement, notamment en raison de l'accumulation impressionnante de déchets qui s'y amassent (Desachy, 2001). Aussi que les décharges non contrôlées entraînent une dégradation des paysages, provoquent des incendies et des explosions, ainsi que des dommages aux infrastructures. Ces impacts visuels et environnementaux affectent la qualité de vie des populations locales (Greenfield, 2023).

Invariablement, l'exposition aux déchets dangereux s'échappant dans l'environnement peut entraîner une réduction de l'espérance de vie et éventuellement une période de qualité de vie réduite (en raison de l'anxiété causée par les expositions, les maladies, etc.). Une pratique d'élimination des déchets non contrôlée peut donc être perçue comme une source potentielle de plusieurs problèmes sanitaires et environnementaux.

I.3.3 Production des déchets

I.3.3.1 A l'échelle mondiale

Défini que les déchets dangereux proviennent de produits de consommation mis au rebut, de produits chimiques, de produits pharmaceutiques, de pesticides, de produits d'hygiène personnelle, de sous-produits industriels, de boues et de produits électroniques, produits électroniques, sous-produits industriels, boues et huiles usées. Les Nations unies estiment qu'environ 68 % de la population mondiale sera urbanisée d'ici à l'an 2050 (Knickmeyer 2020). À l'échelle mondiale, le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) a estimé que plus de 400 millions de tonnes de déchets dangereux sont produits chaque année, soit près de 13 tonnes par seconde, principalement par les pays industrialisés (The World Counts 2023). En une seule génération, la production de produits chimiques artificiels a augmenté de 40 000 %, passant de 1 million à 400 millions de tonnes par an (Kumar et al, 2023 The World Counts 2023). Certains pays développés produisent des quantités considérables de déchets dangereux, tandis que d'autres n'en produisent que de très faibles quantités (Gautam et al, 2019). Les États-Unis, la Chine et certains États de l'Union européenne (UE) sont les principaux producteurs de déchets dangereux. La classification des déchets dangereux est complexe et il n'existe pas de classification universellement acceptée. Même au sein d'un même pays, les programmes réglementaires classent les déchets dangereux

différemment. La classification et les définitions des déchets/produits dangereux peuvent varier dans le temps en raison du changement climatique (Rabbani et al, 2019).

Les déchets solides et liquides proviennent des industries chimiques, des hôpitaux, des ménages, des mines, de la construction, etc. Les émissions des usines et des industries contribuent aux déchets gazeux. Les effluents industriels se déversent dans les rivières et les masses d'eau, ils contribuent fortement à la pollution des eaux de surface. Il existe trois principaux types de déchets dangereux : les déchets ménagers dangereux, les déchets industriels dangereux et les déchets électroniques (Kumar et al, 2023).

➤ Les déchets ménagers dangereux (DMD) sont un autre problème majeur qui doit être traité de manière appropriée. L'Agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA) définit les DMS comme des "restes de produits ménagers qui peuvent s'enflammer, réagir ou exploser dans certaines circonstances, ou qui sont corrosifs ou toxiques" (Household Hazardous Waste US EPA). En Europe, les DMD sont définis comme "les déchets qui pourraient potentiellement augmenter les propriétés dangereuses des solides municipaux lorsqu'ils sont mis en décharge, incinérés ou compostés". Les DMD comprennent principalement les peintures, les piles, les détergents, les produits de soins personnels, les produits pharmaceutiques, les insecticides et les produits chimiques de nettoyage (Inglezakis and Moustakas, 2015). La prise de conscience de la nature dangereuse des DMD est essentielle pour éviter leurs conséquences potentielles sur la santé et l'environnement.

➤ Les industries utilisent différents produits chimiques dangereux pour atteindre leur productivité et leur rendement, ce qui génère une quantité massive de déchets dangereux. Au niveau mondial, l'industrie manufacturière est la principale source de déchets dangereux. Les déchets industriels banals DIB proviennent principalement des centrales thermiques, des aciéries intégrées, des usines sidérurgiques et des usines de traitement du fer thermiques, des aciéries intégrées, des exploitations minières, des cimenteries, des papeteries, des engrais, des textiles et d'autres industries connexes. En Chine, l'industrie chimique est le plus grand producteur de déchets dangereux, suivie par les industries d'extraction et de fonte des métaux non ferreux. Ces deux industries représentent 45% des DID en Chine (Su et al, 2022).

➤ Les équipements électriques et électroniques (EEE) et la technologie sont désormais partie intégrante de la vie. La croissance et la demande des EEE ont entraîné une augmentation significative du volume de déchets électroniques. Selon le rapport (Forti et al, 2020 Global E-waste Monitor 2020) des Nations Unies récent et (Bagwan, 2024), 53,6 millions de tonnes métriques (Mt) de déchets électroniques ont été générés dans le monde en 2019, avec une augmentation de 21 % en seulement 5 ans. Les déchets électroniques mis au rebut dans le monde avec une batterie ou une prise devrait atteindre 74 millions de tonnes Mt d'ici à 2030 et 120 Mt d'ici à 2050, (Forti, et al 2020 in Global E-waste Monitor 2020 ; Yu, Gao et al, 2023). En général, 60,2 % des déchets électroniques sont constitués de divers métaux précieux (tels que l'or, l'argent, l'aluminium, le fer, le cuivre et le platine), de matières plastique (15,2 %), de mélanges plastique-métal (5 %), d'écrans et de tubes (12 %), cartes de circuits

imprimés (PCB, 2 %), câbles (2 %), et d'autres composants (Roy et al, 2022). Les déchets électroniques contiennent plusieurs matériaux dangereux tels que des métaux toxiques (Hg, Pb, Cd, Cr, etc.), des produits chimiques (retardateurs de flamme halogénés, polybromobiphényles, polybromodiphényléthers, etc.), et non toxiques (plastiques, câbles, etc.) qui peuvent causer plusieurs problèmes environnementaux et de santé lorsqu'ils sont mobilisés (Sengupta et al, 2022). Selon le rapport, l'Asie a généré le plus grand volume de déchets électroniques en 2019 - quelque 24,9 Mt, suivie par les Amériques (13,1 Mt) et l'Europe (12 Mt), tandis que l'Afrique et l'Océanie ont généré respectivement 2,9 Mt et 0,7 Mt (Forti et al, 2020 in Global E-waste Monitor 2020).

I.3.3.2 A l'échelle nationale

En Algérie, les déchets spéciaux et spéciaux dangereux (DS/DSD) se distinguent par leur impact potentiel sur l'environnement et la santé publique. Leur gestion est soumise à une réglementation spécifique visant à limiter les risques associés à leur manipulation, leur transport et leur traitement. Les déchets spéciaux, Selon l'article 3 de la loi 01-19 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, les déchets spéciaux proviennent d'activités industrielles, agricoles, médicales et autres services. Leur nature et leur composition chimique empêchent leur traitement selon les mêmes modalités que les déchets ménagers ou inertes. Les déchets spéciaux dangereux également définis par l'article 3 de la loi 01-19, regroupent les déchets spéciaux contenant des substances nocives susceptibles de représenter un danger pour la santé et l'environnement.

Leur classification repose sur les 14 critères de dangerosité énumérés dans l'annexe I du décret exécutif n° 06-104, qui établit la nomenclature officielle des déchets dangereux. Il convient de rappeler ces 14 critères de dangerosité sont cités dans le paragraphe I.2.3.

En raison de leurs caractéristiques physico-chimiques, ces déchets requièrent des méthodes de gestion adaptées. Ils peuvent être :

Éliminés par incinération ou stockage dans des centres d'enfouissement technique de classe 1 après stabilisation.

Valorisés dans des filières de recyclage adaptées.

I.3.3.3 Sources et Types de Déchets

Les ménages et administrations produisent également des déchets spéciaux en quantités variables. Parmi ces déchets, on retrouve :

- Déchets d'équipements électroniques (DEEE)
- Piles et batteries usagées

- Produits chimiques ménagers (détergents, peintures, solvants, phytosanitaires, etc.)
- Déchets issus de la construction et de la démolition contaminés par des substances toxiques

Certains secteurs industriels génèrent des volumes plus importants de DS/DSD, notamment :

- Industrie pétrolière et gazière
- Secteur chimique
- Industrie du caoutchouc et du plastique
- Sidérurgie, métallurgie, mécanique et électronique

Chaque producteur est tenu d'identifier, classer et quantifier ses déchets afin d'assurer leur prise en charge adéquate.

I.3.3.4 Quantification et Évolution des Déchets

En 2003, le Cadastre National des Déchets Spéciaux (CNDS) estimait la production de déchets spéciaux dangereux à 325 000 tonnes par an. Pour actualiser ce chiffre, le Ministère de l'Environnement a initié des campagnes de collecte de données dans le cadre de la Stratégie Nationale de la Gestion Intégrée des Déchets (SNGID). L'Agence Nationale des Déchets (AND) a ainsi réalisé des enquêtes ciblant des flux spécifiques à fort potentiel économique, tels que (Figure I.2) :

- Huiles alimentaires et industrielles usagées
- Pneus hors d'usage (PU)
- Filtres à huile (FHU)
- Déchets d'activités de soins à risque infectieux (DASRI)

Les déchets spéciaux non dangereux sont générés en plus grande quantité que les déchets spéciaux dangereux.

D'ici 2028, une augmentation significative des huiles usagées et pneus usagés est attendue, en raison de l'évolution des secteurs économiques qui utilisent ces produits.

Concernant les déchets d'activités de soins à risque infectieux (DASRI), les données actuelles ne reflètent pas encore les quantités réelles, notamment celles issues du secteur privé en pleine expansion. Une étude de l'AND vise à établir un diagnostic détaillé de ces déchets au sein des établissements de santé afin d'actualiser les chiffres.

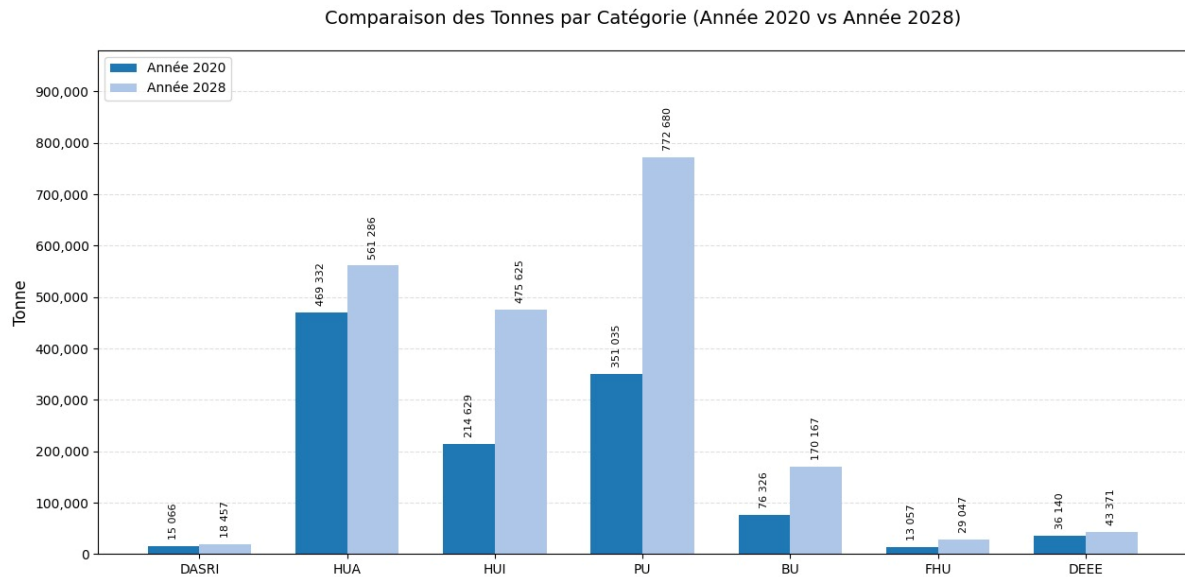


Figure I. 2: Quantité de quelques types de déchets spéciaux et spéciaux dangereux ; (Source : AND, 2020).

DASRI : Déchets d'activités de soins à risque infectieux

HUA : Huiles usagées alimentaires

HMU : Huiles moteurs usagées

PU : Pneus usagés

BU : Batteries usagées

FHU : Filtres à huiles usagés

DEEE : Déchets d'équipements électriques et électroniques.

I.3.3.5 Inventaire et Suivi

Les missions de diagnostic sont assurées par des techniciens de l'AND qui collectent les données auprès des producteurs de DS/DSD. Une fois les informations nécessaires sont disponibles, un inventaire détaillé est élaboré pour :

- Estimer les quantités annuelles produites à l'échelle de wilaya et nationale.
- Identifier les stocks de déchets spéciaux dangereux non encore traités.

I.3.4 Gestion des déchets spéciaux dangereux

La gestion des déchets spéciaux dangereux repose sur des principes fondamentaux, des bonnes pratiques et des filières spécifiques permettant leur prise en charge optimale. Il est essentiel d'appliquer des mesures de sécurité strictes afin de limiter les risques pour l'environnement et la santé publique.

I.3.4.1 A l'échelle mondiale

La gestion des déchets dangereux donne plusieurs repères (Figure I. 3) tel que :

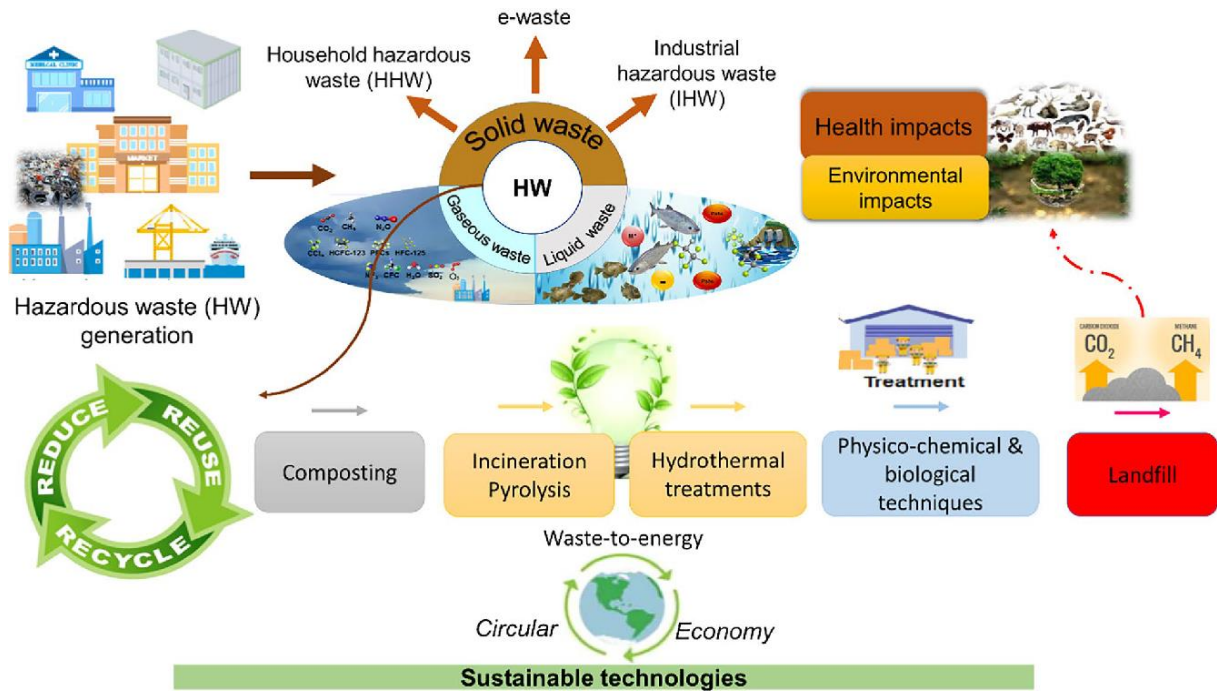


Figure I. 3: Un cadre graphique de la génération, de la classification, des stratégies de gestion et des impacts des déchets dangereux. (Kumar et al, 2023)

I.3.4.1.1 Le recyclage (Recycling)

Le recyclage est une stratégie de gestion durable des déchets dangereux qui permet de minimiser l'impact nocif de ces derniers et de les réutiliser en toute sécurité avant de les éliminer. Certains matériaux de déchets dangereux, tels que les plastiques, les composants en verre et les déchets électroniques, ont une grande valeur économique et peuvent être réutilisés ou retraités pour récupérer des biens de valeur. Cela permettrait d'économiser des ressources et de l'énergie (Kong et al, 2020). Les méthodes courantes de recyclage des déchets industriels comprennent :

- (a) la décomposition des déchets en un produit de valeur (Savoldelli et al, 2017),
- (b) la récupération des ressources (Sadala et al, 2019),
- (c) la récupération des produits de valeur à partir des déchets (Ilyas et al, 2021).

Les chercheurs ont étudié le recyclage de déchets tels que les plastiques (Dalhat et Al-Abdul Wahhab, 2015), les pneus broyés (Pouranian et al, 2020), le verre (Ahmad et al, 2024), les mégots de cigarettes (Rahman et al, 2020) et les cendres volantes (Mohammadinia et al, 2017) comme agrégats, additifs et charges dans le béton bitumineux et le bitume pour la construction des routes et d'autoroutes. La gestion durable des huiles de cuisson usagées dangereuses est une tâche difficile (Gupta and Rathod, 2018).

I.3.4.1.2 Le compostage (Composting)

Le compostage est une stratégie prometteuse pour la gestion des déchets provenant de différentes sources (Wei et al, 2020). Cette stratégie permet de traiter les déchets de jardin, les boues d'épuration et les déchets agricoles avec des concentrations négligeables de substances organiques dangereuses (Wang et al, 2018). Le compostage réduit la taille et le volume des déchets, ce qui permet de les éliminer plus facilement. Cette méthode est utilisée pour traiter non seulement les déchets domestiques, mais aussi les déchets provenant des activités industrielles. Cette méthode aérobie convertit les déchets nocifs en biofertilisants utiles (Smith et Aber, 2018). Les biofertilisants sont ensuite utilisés pour améliorer la productivité des sols et supprimer les maladies des plantes (Sun et al, 2020). Le compostage libère également des gaz toxiques tels que SO_x, NO_x et CO₂. Les émissions provenant du compostage se caractérisent par des débits élevés, de faibles concentrations de polluants). La biofiltration est couramment utilisée pour minimiser les émissions du compostage (Hong and Park, 2004). Les trois systèmes de compostage les plus répandus sont l'andain, la pile statique aérée (ASP) et le compostage en cuve.

I.3.4.1.3 Incinération (Incinération)

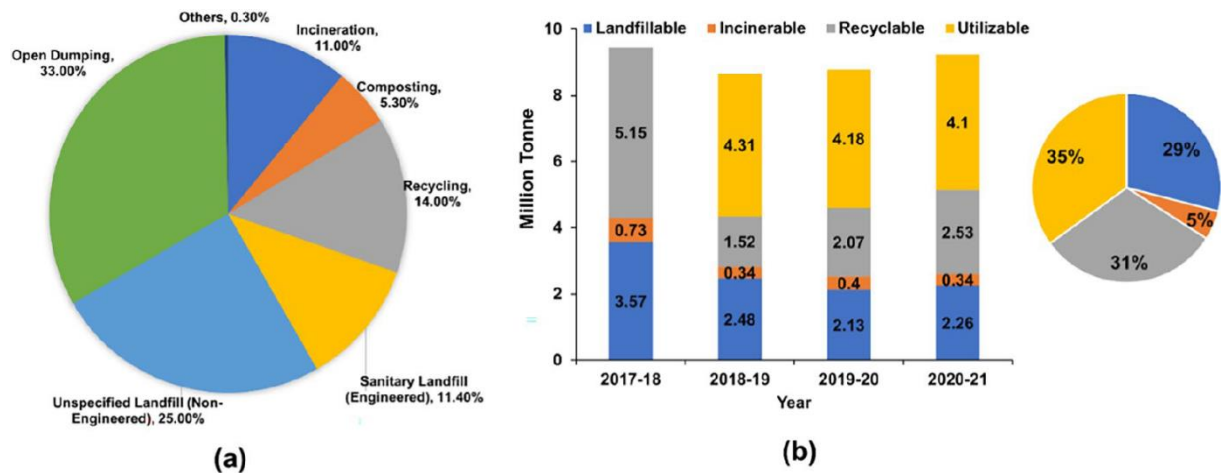
L'incinération est une méthode qui permet de brûler les composants organiques toxiques des déchets dangereux et de réduire le volume des déchets. Les incinérateurs sont couramment utilisés pour brûler les déchets dangereux à des fins de destruction/traitement des déchets et pour récupérer les matériaux, les produits chimiques et l'énergie des déchets (Block et al, 2014). Il existe différents types d'incinérateurs de déchets dangereux (Trinh et al, 2019), à savoir les fours rotatifs (Jiang et Li, 2019), les unités à lit fluidisé (Azam et al, 2019) et les unités d'injection de liquide (Anufriev, 2021). L'incinération présente plusieurs avantages par rapport à d'autres stratégies de traitement. Les avantages significatifs d'incinération permettent notamment d'éviter la pollution des eaux souterraines, la récupération d'énergie et l'utilisation d'un espace relativement réduit pour gérer les déchets. Les principaux inconvénients de cette méthode sont les émissions de polluants toxiques et les coûts plus élevés des installations. L'émission de contaminants organiques provenant de l'incinération des déchets solides en Chine a été évaluée et a établi une relation entre les avantages énergétiques et les émissions de polluants (Li et al, 2021).

I.3.4.1.4 La mise en décharge (Landfilling)

La mise en décharge est la stratégie de gestion des déchets la plus couramment utilisée dans les pays développés. Les déchets dangereux sont séparés avant la mise en décharge afin de réduire les dommages causés à l'environnement. Les déchets mis en décharge subissent les transformations physico-chimiques et biologiques dans les sites de décharge. Les éléments essentiels de la mise en décharge sont les revêtements de décharge. Cette stratégie convient mieux aux déchets à faible teneur en matière organique et en humidité. Cette méthode génère une grande quantité de lixiviats toxiques et de gaz à effet de serre. L'analyse énergétique et environnementale de la mise en décharge avec compostage des DSM a été réalisée en Iran (Behrooznia et al, 2018). L'enquête a révélé que la consommation d'énergie de la mise en décharge avec le compostage était supérieure à celle de la mise en décharge. La mise en

décharge par compostage est plus écologique que la mise en décharge (Behrooznia et al,2018).

La Figure I.4 (a) illustre la situation mondiale de la gestion des DSM, et la figure (b) représente le scénario indien des statistiques par catégorie de déchets ménagers générés entre 2017et 2021. Les statistiques montrent qu'entre 2017 et 2021, près d'un tiers des déchets solides étaient des décharges d'incinération, tandis que les deux tiers restants étaient recyclables et utilisables.



**Figure I. 4: Situation mondiale de la gestion des déchets solides municipaux (Geyer et al. 2017).
b Statistiques par catégorie des déchets solides municipaux générés entre 2017 et 2021 en Inde (Kumar et al, 2023).**

I.3.4.1.5 Techniques de traitement des déchets dangereux

Les différents déchets dangereux générés par les industries sous forme de produits chimiques (par exemple, polluants organiques persistants, produits pharmaceutiques, pesticides, insecticides, produits de soins personnels et produits halogénés), de métaux lourds, de sels et d'oxyanions contaminent l'environnement (Wang et al, 2019) et les nappes d'eau souterraines (Fakhru'l-Razi et al, 2009). Les déchets ménagers (déchets de légumes et de fruits, plastiques, tissus), déchets électroniques, etc, sont les principaux contributeurs aux déchets solides municipaux (DSM). Lorsqu'ils sont exposés à des décharges à ciel ouvert ou à des dépôts non autorisés, ces déchets polluent la terre, l'eau et l'air en raison des odeurs nauséabondes et insupportables qu'ils dégagent. Le traitement des déchets solides municipaux à l'aide de technologies avancées est essentiel avant leur élimination. Différentes méthodes physiques, chimiques et biologiques sont employées à cette fin. Mais le choix de ces techniques dépend des caractéristiques des polluants. Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients en termes de faisabilité, d'efficacité, d'impact sur l'environnement, de coût, etc.

➤ Les procédés physiques sont principalement basés sur le transfert de masse de polluants toxiques. Le faible coût d'exploitation, la simplicité de conception simple, l'efficacité de l'assainissement et la nécessité d'une quantité négligeable de produits

chimiques sont les principaux avantages de ces procédés. Les besoins énergétiques élevés et les coûts opérationnels élevés sont les inconvénients des méthodes physiques (Thakur et al, 2022) sont la filtration de l'air, l'adsorption, la coagulation, les technologies à base de membranes, etc. (Thakur et al, 2021). Les méthodes chimiques sont principalement basées sur l'oxydation chimique des polluants toxiques. Les méthodes d'oxydations chimiques telles que les procédés d'oxydation, dangereux du flux de déchets (Mudoï et al, 2021). Les procédés d'oxydation avancés sont rentables, efficaces et sûrs pour l'assainissement efficace des contaminants dangereux des effluents industriels. Les processus d'oxydation chimique sont confinés à l'échelle du laboratoire et leur mise à l'échelle est difficile.

➤ Les biologiques reposent sur la décomposition ou la dégradation des polluants dangereux par des micro-organismes dans un cycle aérobie ou anaérobie. Les techniques biologiques sont rentables, produisent moins de boues et de métabolites non métabolites non dangereux et utilisent moins d'eau que les méthodes physiques/chimiques. Mais les processus biologiques sont lente biodégradabilité médiocre et nécessitent un environnement optimal pour les micro-organismes (Khan et al, 2022).

I.3.4.2 A l'échelle nationale

Le programme de Gestion des déchets spéciaux se compose notamment de :

- Estimation par les producteurs/détenteurs d'un inventaire des quantités de déchets spéciaux, notamment ceux à caractère dangereux, produits chaque année à l'échelle nationale ;
- Le stockage, à la fois temporaire et permanent, des déchets selon leur catégorie ;
- La choix des options de traitement pour les différentes catégories de déchets ;
- La localisation des sites et des installations de traitement existants ;
- Les besoins de capacités en matière de traitement des déchets, en tenant compte déjà des capacités installées, des priorités relatives à la création de nouvelles installations et des moyens économiques et financiers nécessaires à la mise en œuvre (JORA.2001).

I.3.4.2.1 Collecte et transport

La gestion des déchets spéciaux et dangereux requiert une logistique spécifique en raison des risques qu'ils présentent. Leur collecte, stockage et transport sont soumis à des réglementations strictes afin de limiter les impacts environnementaux et sanitaires.

A/ Pré-Collecte

Les déchets sont triés directement à la source et conditionnés selon leur état physique (liquide, solide, pâteux ou gazeux) et leur dangerosité.

Dans le cas des déchets issus des activités de soins, un système de codification par couleur est appliqué (Figure I.5):

- **Jaune** : déchets à risques infectieux

- **Rouge** : déchets toxiques
- **Vert** : déchets anatomiques



Figure I. 5: Code couleur des déchets, activité de soins. source AND 2020.

Les déchets mous sont stockés dans des sacs en plastique rigides, tandis que les déchets piquants, coupants et tranchants (PCT) sont placés dans des collecteurs spécifiques. (Figure I.6).



Figure I. 6: Boîtes pour les PCT et Sacs en plastique pour déchets mous.

Pour les huiles usagées (HU), principalement issues des vidanges, elles sont généralement stockées dans des fûts, des citernes ou des cuves hermétiques avant leur collecte par des entreprises spécialisées. (Figure I.7).



Figure I. 7: Exemples de stockage des HU à l'état non conforme.

Le transport des déchets spéciaux dangereux doit être effectué dans des emballages adaptés à leur nature, leur état et leur dangerosité, résistant aux secousses, aux chocs, aux pressions, à la chaleur et à l'humidité.

B/ Collecte

La collecte des déchets spéciaux et dangereux est encadrée par le décret exécutif n° 09-19 du 20 janvier 2009, qui définit les obligations des producteurs et des collecteurs. Toute entreprise souhaitant exercer cette activité doit obtenir un agrément du Ministère de l'Environnement, valable pour cinq ans et renouvelable.

En 2020, plus de 500 entreprises étaient actives dans ce secteur en Algérie, prenant en charge une ou plusieurs catégories de déchets spéciaux et dangereux.

C/ Stockage

Après leur collecte, certains déchets spéciaux et dangereux sont temporairement stockés avant d'être traités ou valorisés. En l'absence d'installations nationales adaptées, certains flux, comme les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), les huiles usagées et les PCB (polychlorobiphényles), sont exportés pour traitement.

Lors du stockage, les déchets doivent être entreposés dans des conteneurs hermétiques ou des locaux étanches, facilement nettoyables, bien ventilés et accessibles. Un étiquetage et un code couleur spécifique sont également requis pour assurer une gestion sécurisée.

D/ Transport

Le transport des déchets spéciaux dangereux est réglementé par le décret exécutif n° 04-409 du 04 décembre 2004, qui fixe les modalités de chargement, de déchargement et de déplacement.

Les véhicules utilisés (comme les camions à benne basculante avec couvercles coulissants) doivent répondre à des normes strictes en matière de sécurité, d'emballage et de logistique. Le transporteur doit également détenir un brevet professionnel attestant d'une formation spécialisée.

❖ Mouvements transfrontaliers

Les exportations de déchets spéciaux dangereux sont régies par la Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontaliers des déchets dangereux et leur élimination, adoptée en 1989 et ratifiée par l'Algérie en décembre 1998.

En 2019, l'Algérie a exporté 67 696,65 tonnes de déchets spéciaux vers quatre pays comme le montre la figure I.8:

- France (74% des déchets exportés) représente la principale destination,
- Grèce
- Inde
- Turquie

Les huiles usagées représentaient 99,95% des flux exportés, avec une quantité de 67 666,65 tonnes.



Figure I. 8: Flux de déchets exportés en 2019 ; (Source : AND 2020).

I.3.4.2.2 Valorisation

L'objectif principal de la valorisation des déchets spéciaux dangereux est de réduire leur toxicité et de limiter les risques environnementaux et sanitaires.

Différentes méthodes de valorisation existent, allant du recyclage au traitement thermique ou chimique. Un schéma détaillé (Figure I.9) illustre les principales filières de valorisation des déchets spéciaux et dangereux.

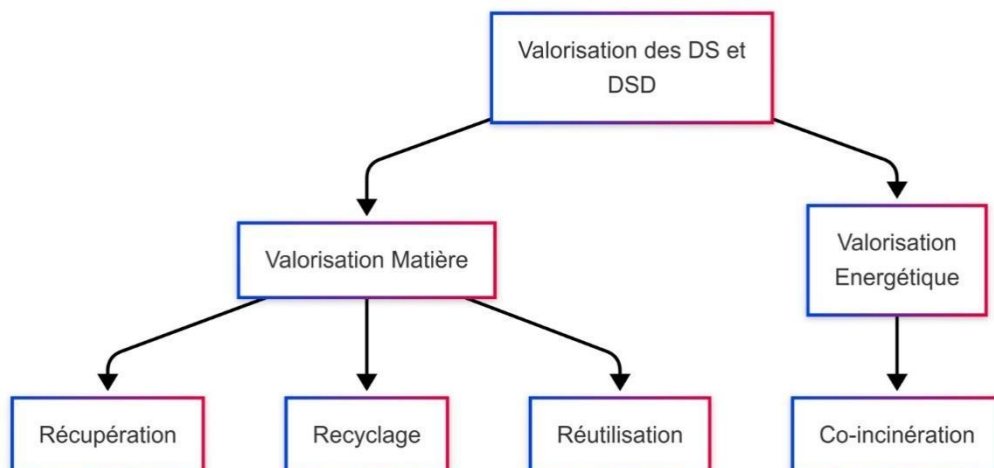


Figure I. 9: Diagramme présentant la valorisation des déchets spéciaux et spéciaux dangereux.

Cela justifiant la récupération des composants précieux tels que les métaux et les matières, suivie de leur transformation en matières premières secondaires ou en sous-produits

conformément à la réglementation (loi 01-19). Par exemple, les pneus usagés peuvent être réutilisés dans la construction civile pour renforcer les sols et prévenir l'érosion.

La co-incinération est également une méthode utilisée, où les déchets sont utilisés comme combustible dans des installations telles que les cimenteries (tel que La société LAFARGE OGGAZ), sans compromettre la qualité du produit final. Cependant, la récupération et le stockage des déchets spéciaux dangereux ne sont pas assurés dans les déchetteries, ce qui entraîne des pratiques potentiellement dangereuses et frauduleuses, notamment le détournement de matières précieuses comme le plomb (à partir des batteries usagées) et le cuivre (à partir de la transformation des câbles électriques) par des opérateurs non autorisés.

I.3.4.2.3 Elimination

Selon la réglementation applicable, les entreprises sont responsables de la prise en charge des déchets qu'elles produisent. Pour les déchets spéciaux dangereux (DSD), la prise en charge doit être faite par leurs propres installations, mais il est cependant admis de traiter ces DSD au sein d'organismes étrangers si aucune installation nationale n'est disponible.

Ce traitement est largement organisé par des entreprises privées nationales créées à cet effet et autorisées par le Ministère de l'Environnement. Ces entreprises utilisent deux méthodes de traitement principales : l'incinération et la banalisation (Tableau I.2).

Tableau I. 2: Nombre des installations privées d'élimination des DSD en Algérie.

Type d'installation	Nombre	Type de déchets traités
Incinérateur	3	Déchets industriels (les boues, les emballages contaminés, et les résines)
	10	Déchets d'activités de soins (déchets coupants)
Banaliseur	7	Piquants, tranchants)

En 2020, la quantité incinérée par des prestataires spécialisés a atteint 4 820 tonnes pour les DSD d'hôpitaux, la quantité traitée dans les installations propres à certains établissements de santé n'étant pas considérée, alors que les nouvelles installations construites depuis lors en prévision d'une augmentation des capacités de stockage et de traitement au niveau national n'ont pu être mises en service comme indiqué dans le Tableau I.3 suivant :

Tableau I. 3: Nombre d'installations de stockage et d'élimination des DSD en Algérie; (Source : AND).

Désignation	Consistance	Etat D'avancement	Contrainte
CSD des déchets Ultimes de Bir El Ater, site Ain Fouris	S=39,14 hectares Capacités= 1.600.000t Démarrage des travaux 2014 Délais d'exécution 26mois Montant 2.248.686.953,98 DA	Etat d'avancement 10 %	Arrêt du projet à cause de l'opposition des citoyens
CSD des déchets Ultimes	Année démarrage 2012	Etude de projet	/

de Sidi Bel Abbes, site de Ras El Ma	Montant 22.525.513,39 DA Capacité 360.000 t	finalisé	
Traitement et confinement de potiches de mercure du complexe mercuriel d'Ismail ENOF de Azzaba	Capacités = 1.000.000 t Cout 3.300.000 DA	Procédure de l'appel d'offres en cours	/

Une fois ces projets réalisés, ils permettront de traiter et de réduire de manière significative les déchets spéciaux dangereux (DSD) sur l'ensemble du territoire, offrant ainsi de nouvelles opportunités économiques et d'emplois à la population locale.

Actuellement, le recours au stockage demeure la meilleure solution en raison de l'absence d'unités de traitement pour certains flux, tels que les PCB (Polychlorobiphényles), les déchets phytosanitaires et les déchets d'amiante. Les quantités de ces déchets seront mieux évaluées une fois que les données mises à jour dans le cadre du Plan National de Gestion des Déchets Spéciaux (PNAGDES).

Il est évident que les lieux de stockage doivent répondre à certaines normes, notamment en ce qui concerne l'isolation, l'étanchéité, etc.

I.3.5 Quantification des déchets dangereux de la région d'Adrar et leurs modes de traitement

Les tableaux I.4 et I.5 présentent les données de l'année 2011 et l'année 2020.

Aux vues des deux tableaux, la majorité des déchets vont passer par la valorisation ou le recyclage, la réutilisation et l'incinération, sauf que les boues des raffineries de pétrole qui sont passées par le stockage.

Une des raffineries bien connues dans cette région est celle de Sbaa, située dans la zone industrielle d'Adrar, à plus de 44 kilomètres à l'est de la ville d'Adrar. Occupant une superficie totale de 75 hectares, elle est divisée en six zones pour différents usages. La capacité nominale de traitement de la raffinerie de Sbaa est de douze mille cinq cents (12 500) barils par jour, traitant le pétrole brut provenant des gisements de la cuvette de Sbaa, Hassi Ilatou. La raffinerie comprend plusieurs zones, notamment une unité de production, une zone de stockage, une zone d'expédition, un centre de traitement du propane et du butane, des bâtiments techniques et administratifs, ainsi qu'une base de vie. La capacité annuelle de traitement de la raffinerie de Sbaa est d'environ 600 000 tonnes de pétrole brut pendant une période de 330 jours par an en continu (Benmeriama and Laguel, 2017).

➤ Les produits résultant du processus de l'épuration de cette raffinerie sont les suivants :

- L'eau épurée : Avant d'être rejetée dans le lac, elle doit être analysée en laboratoire. Si la qualité est jugée satisfaisante selon les résultats d'analyse, elle peut être utilisée comme eau d'appoint pour la tour de refroidissement ou pour l'arrosage.

- Boues : Elles sont d'abord épaissies, puis hydratées sur des lits de séchage avant d'être envoyées en décharge (ou utilisées à des fins agricoles).

- Les produits de Dégrillage : Ces refus sont évacués par un convoyeur à bande ou un tapis de transport vers une benne à ordures.
- Graisses et Huiles : Elles sont stockées dans une fosse a graisse en attendant leur enlèvement.
- Sables : Ils sont extraits lors de la phase de prétraitement, séparés de l'eau à l'aide d'un classificateur, puis stockés dans une benne relevable.

Tableau I. 4: Production et stocks des déchets spéciaux et /ou dangereux -Année 2011. Wilaya D’Adrar – Direction de l’environnement

Secteur d’activité	Dénomination de structure	Désignation et consistance des déchets	Code Des déchets	Quantité générée (t/an)	Quantité stockée (t/an)		Conformité Du stockage vis-à-vis de la réglementation	Quantité Traitée Valorisée ou recyclée (tonne)	Mode et Lieu de traitement
					Temporaire	Permanente			
Forage de pétrole	Oc Touat	Les huiles	13 00 00	10.85t	10.85 t		Conforme à la réglementation	10.85t	Réutilisation
Production d’électricité	Centrale électrique	Huile utilisée de vidange de machine	13 02 00	1,8 t		1,8 t	Conforme à la réglementation	1,8 t	Réutilisation
Fabrication des humidificateurs et menuiserie métallique	ECOMES	Tôle et tube métallique et bois	03 00 00	18 t		18 t	Conforme à la réglementation	18 t	Réutilisation de métal et incinération de bois
Les services pétroliers	Schlumberger	Déchets des explosifs	16 04 03	0.100 t	0.100 t	-	Conforme à la réglementation	-	Incinération
Total				30.75 t	10,95 t	19,8 t			

N.B: 10 batteries, 115 filtres sont générés annuellement par l’entreprise OC Touat

WILAYA D'ADRAR - DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT –
Suite **Tableau I. 4** : Production et stocks des déchets spéciaux et /ou dangereux -Année 2011

Secteur d'activité	Dénomination de structure	Désignation et consistance des déchets	Code Des déchets	Quantité générée (t/an)	Quantité stockée (t/an)		Conformité Du stockage vis-à-vis de la réglementation	Quantité Traitée Valorisée ou recyclée (t)	Mode et Lieu de traitement
					Temporaire	Permanente			
Raffinerie	Soral chine	Déchets provenant de raffinage du pétrole (Réacteur Charbon actif Catalyseur Jets souillés Déchets de billes de porcelaine) Les boues	050000	230,7 t		230,7 t		/	Décharge
			050100	300 t		300 t		/	
Raffinerie	Repsole	-boues de forage	1.4		/				
		-Filtres huiles usées	1.4.1		/				
		-huile moteur usées	13.2.2		/				
Total				530,7 t		530,7 t			

Tableau I. 5: Production et stocks des déchets spéciaux et /ou dangereux -Année 2019/2020

Secteur d'activité	Dénomination de structure	Désignation et consistance des déchets	Code Des déchets	Quantité générée (t/an)	Quantité stockée (t/an)		Conformité Du stockage vis-à-vis de la réglementation	Quantité Traitée Valorisée ou recyclée (tonne)	Mode et Lieu de traitement
					Temporaire	Permanente			
Travaux publics	Cosider Travaux publics	Les huiles de moteur et usagées	13 .02.00	1.3 t/an	1.3t/ an				Récupéré par la société Naftal pour réutilisation
		Les filtres à huiles a usagés	16.1.4	2000 filtres /an	2000 filtres /an	/	Conforme à la réglementation		Transfert vers la DCM Msila
		Batteries	16.6.1	150 Batteries/an	150 Batteries/an	/		50 batteries/an	
Commercialisation et distribution des produit carburant	NAFTAL SPA / District CBR Bechar/ dépôt carburant 108G ADRAR	- filtres a huile moteur	16.1.4	95 unités	35 unités	/	Conforme à la réglementation	/	Traitement des déchets selon une instruction de gestion des déchets
		- pastilles de plomb	17.4.3	25 kg	25 kg				
		- Climatiseurs	16.2.5	2 unités	2 unités				
		- Tolles et ferrailles	16.1.14	35	35				
		- toner et cartouche	3.8.3	80 unités	80 unités				

Commercialisation et distribution du produit	Naftal (centre aviation Timimoune)	-fibres cellulosiques - nylon -fibres de verre - tissus de coton et colle polyuréthane -Laine de verre	17.4.8	0.011t/an	0.011/an	/	Conforme à la réglementation	/	/
Fabrication des humidificateurs et menuiserie métallique	Etablissement de construction métallique du sud	Résidus de fer / plastique (chutes)	12. 01	06	06	/	Conforme à la réglementation	06	Stockage temporaire et Recyclage
		Huiles moteur	13.2.5	80.4 M ³	20.89 t/an	/	Conforme à la réglementation	48.808 t/an	Transfert vers Naftal
		Piquant /coupant /tranchant	18.1.1	9.2 kg	0 t/an			Elimination9.2 kg	Incineration
		- filtre à l'huile - cartouches d'huile	16.1.4	2.52 kg	1.728 t	/	Conforme à la réglementation	0.8t/an!!	Recyclage
		Equipement électrique en rebut	20.118	0.6535 kg	0.5 t/an	/	Conforme à la réglementation	Réutilisation 0.1 Recyclage 0.0835	Recycler après le stockage

	TOUAT GAZ Tecnicasreuni das	Emballages contenant des résidus de substances dangereuses ou contaminés par de tels résidus	15.1.1	0.673 T	0.673 t/an	/	Conforme à la réglementation	Recyclage /	Recycler
		Batteries usagées	16.6.1	0.253t/an	0.253 t/an		Conforme à la réglementation	Recyclage /	Recycler
		Tube fluorescent	20.1.6	0.361/an	0.0375	/	Conforme à la réglementation	0.3235 t/an	Recycler
		Déchets toner d'impression contenant des substances dangereuses	8.3.8	01.2t/an	0.65t/an	/	Conforme à la réglementation	0.3705t/an	Recycler
		Equipement contenant des (HCFC ou HFC)	20.1.7	150 kg	/	/	Conforme à la réglementation	Recyclage /	Valorisation
		Déchets des Bains de blanchiment et bains de blanchiment/fixati on	9.1.5	4.641t	1.85	/	Conforme à la réglementation	2.791tt	Recycler
		Terres et cailloux contenant des substances dangereuses	17.5.1	60.2 t/an	0.02 t/an	/	Conforme à la réglementation	Valorisation 60 t/an	/

		Déchets provenant de l'industrie photographique	9.1.7	0.125T	0.125	/	Conforme à la réglementation	Recyclage	Recyclage
		Solvants et mélanges de Solvants	60.10.1	85.05T	85.05 T	/	Conforme à la réglementation	5.474T	Réutilisation
		Acides	60.1.6	8.985 T	/	/	Conforme à la réglementation	8.988T	Réutilisation
		Déchets (bois. Verre.et matières plastiques contenant des substances dangereuses	17.2.1	900.04 t/an	73.318 t	/	Conforme à la réglementation	826.722 t	Réutilisation
Naftal (centre Aviation Timimoune)	Aéroport de Timimoune	Filtres jet-A1 de différents types	17.4.8	0.011 t/an	0.011	/	Conforme à la réglementation	/	Traitement des déchets selon une instruction de gestion des déchets
Naftal (centre Aviation adrar)	Aéroport d'adlar	Filtres jet-A1 de différents types Pneus /futs/	17.4.8 16.1.4 15.1.1 16.2.5	0.02 T/an	0.11	/	Conforme à la réglementation	/	Traitement des déchets selon une instruction de gestion des

		climatiseurs	16.1.1						déchets
Naftal (centre Aviation B.B Mokhtar)	Aéroport de B.B Mokhtar	Filtres jet-A1 de différents types Pneus /futs/ climatiseurs	17.4.8 16.1.4 15.1.1 16.2.5 16.1.1	0.02 T/an					Traitement des déchets selon une instruction de gestion des déchets
EURL AVA ALGERIE PROJET ADRAR		Déchets solides contenant des substances dangereuses	Déchets solides contenant des substances dangereuses	5.97 t	5.97 t	/	Conforme à la réglementation	5.97 t	Récupération et recyclage par ; GGS/Grenn life russikada
Service pétroliers	Schlumberger	Néant	Néant	Néant	Néant	Néant	Néant	Néant	Néant

I.3.6 Généralités sur les décharges

I.3.6.1 Décharge commune

Cette méthode d'élimination comprend le mélange des déchets avec du sol, l'évaporation et l'infiltration, et/ou l'enterrement peu profond. Les déchets solides seront normalement incorporés dans une décharge et enterrés. Les liquides, les boues et les matières en suspension peuvent également être incorporés dans une décharge. Le potentiel de dommages environnementaux causés par les déchets dangereux enfouis varie en fonction de la composition et de la quantité de ces déchets. De nombreuses décharges polyvalentes accepteront de petites quantités de déchets dangereux, notamment s'ils sont dans des fûts ou des contenants en plastique. Les cyanures (des composés chimiques toxiques qui contiennent l'ion cyanure (CN⁻)), les composés d'arsenic (des composés chimiques contenant de l'arsenic, un élément chimique toxique pour les humains) et certains composés de métaux lourds (comme le plomb, le mercure, le cadmium, etc) sont des exemples de tels matériaux.

I.3.6.2 Décharge approuvée

Un site adapté à l'élimination des déchets solides inertes et des matériaux organiques décomposables. Le site doit permettre de séparer les déchets des eaux souterraines utilisables sous-jacentes ou adjacentes en raison des possibilités de lixiviation.

I.3.6.3 Décharge sécurisée

Une décharge sécurisée, correctement située et désignée, minimise les impacts négatifs sur l'environnement. Un site adapté à l'élimination de tous les déchets, y compris les déchets dangereux liquides et/ou solides, ne doit permettre aucun déversement de ces matériaux ou de leurs sous-produits dans les eaux souterraines ou de surface utilisables par lixiviation, percolation ou tout autre moyen (Lidskog, 1998). La condition préalable essentielle pour une telle élimination est que les contenus dangereux de la décharge soient isolés de l'environnement environnant. La qualité de l'eau de surface et des eaux souterraines ne doit pas être compromise. La qualité de l'air doit également être maintenue. Selon la nature des déchets, différents types de décharges sécurisées, telles que les décharges ouvertes, contrôlées et fermées, sont utilisés.

Décharges ouvertes. Les déchets tels que les boîtes métalliques et les bouteilles en verre sont enterrés dans des décharges ouvertes.

Décharges contrôlées. Les déchets faiblement toxiques ou potentiellement toxiques, tels que les cendres d'incinérateur ou les boues d'épuration, sont enterrés dans des décharges contrôlées.

Décharges fermées. Les déchets hautement toxiques tels que les sols contaminés par des biphényles polychlorés ou des composés de mercure sont enterrés dans des décharges fermées où les déchets sont complètement isolés de l'environnement extérieur par un plancher, un mur et un toit en béton. Comme l'eau de pluie n'entre pas dans les décharges fermées, la quantité de lixiviats est faible.

Le principal problème environnemental associé à la décharge sécurisée est la contamination des eaux souterraines liée à l'infiltration du lixiviat. Afin de minimiser l'infiltration du lixiviat dans les sols de surface sous la décharge et de réduire considérablement le potentiel de contamination des eaux souterraines, l'USEPA a proposé un Double Doublage et un Système de Collecte et d'Évacuation des Lixiviats (LCRS). Le choix du matériau de doublure dépend de la conductivité hydraulique, de la compatibilité chimique avec le lixiviat, de la perméation des gaz de décharge, des caractéristiques de vieillissement et de durabilité, des caractéristiques de contrainte et de déformation, de la facilité d'installation, etc. Darcy (1856) a établi une relation empirique (appelée loi de Darcy) entre le débit (q) à travers une zone A et la force motrice (appelée gradient hydraulique), pour calculer l'infiltration (débit) pour les trois types de doublures suivants :

(a) Doublure de sol

(b) Doublure géo-membrane

(c) Doublure composite (doublure géo-membrane recouvrant une doublure en argile compactée)

Débit (q) (m^3/s)

= $K_s i A$ (doublures en sol) (loi de Darcy).

= $C_B a (2gh)^{0.5}$ (doublures en géo-membrane) Équation de l'orifice de Bernoulli.

= $0.21n^{0.9}a^{0.1}k_s^{0.74}$ (composite avec bon contact)

= $1.15n^{0.9}a^{0.1}k_s^{0.74}$ (composite avec mauvais contact)

Où K_s = conductivité hydraulique du sol (m/s) ; i = gradient hydraulique $[(h+d)/d]$; h = charge liquide (m) ; d = épaisseur du sol (m) ; A = superficie du sol (m^2) ; C_B = 0,6 (coefficient d'écoulement) ; a = superficie du trou (m^2) ; g = accélération due à la gravité (m/s^2) ; n = porosité = volume des vides/volume total.

I.3.6.4 Préparation des déchets pour l'élimination en décharge

En raison des risques liés à certaines réactions chimiques dangereuses, il est essentiel de séparer les déchets et de maintenir des registres précis des zones d'élimination. Avant leur dépôt en décharge, des techniques de prétraitement comme la neutralisation, la fixation chimique et l'encapsulation sont souvent requises pour limiter leur impact.

Les fortes concentrations de déchets dangereux peuvent rapidement saturer la capacité d'atténuation des sites d'enfouissement. De plus, le traitement des lixiviats est particulièrement complexe en raison de la diversité des substances présentes. Certains matériaux, en raison de leur volatilité ou d'autres caractéristiques, nécessitent une couverture immédiate pour éviter toute contamination atmosphérique ou dispersion.

Ainsi, l'élimination des déchets dangereux en décharge requiert un niveau de précaution et de sophistication bien supérieur à celui des déchets municipaux, tant dans la conception que dans l'exploitation des sites. (Misra et Pandey, 2004)

De nombreux déchets chimiques dangereux doivent subir une préparation spécifique avant leur enfouissement afin de réduire leur impact sur l'environnement et la santé. Parmi les principales méthodes de traitement préalable, on retrouve :

1. La stabilisation chimique (fixation des polluants pour limiter leur migration).

2. La réduction du volume afin d'optimiser l'espace de stockage.
3. La ségrégation des déchets pour éviter les réactions indésirables.
4. La détoxification et la dégradation des substances nocives.
5. L'encapsulation, qui consiste à confiner les déchets dans un matériau isolant pour prévenir la dispersion des contaminants.

I.3.6.4.1 Fixation chimique (solidification et stabilisation)

La technologie de solidification et de stabilisation, qui utilise des additifs pour réduire la mobilité des polluants, a gagné en popularité ces dernières années suite à des réglementations strictes sur l'élimination des déchets dangereux en décharge « cette technique, très utilisée dans le domaine du nucléaire, visait à faire réagir toute l'eau libre du déchet avec le liant, afin de lui donner une certaine structure physique ». Il s'agit essentiellement d'une option rentable impliquant des matériaux additifs facilement disponibles et peu coûteux, ainsi que des techniques simples. Dans la fixation chimique, des produits chimiques propriétaires sont mélangés aux boues de déchets, et le mélange résultant est pompé sur le terrain, où la solidification se produit entre quelques jours et quelques semaines (selon le processus). Certains de ces processus conduisent à la formation d'une matrice dans laquelle les déchets sont piégés ; d'autres prétendent que des polluants tels que les métaux lourds sont chimiquement liés dans des complexes insolubles. Aujourd'hui, la solidification regroupe toutes les techniques qui tendent à donner aux déchets une certaine structure physique. (Lun et Christensen, 1989 ; Conner, 1990).

I.3.6.4.2 Réduction du volume

L'incinération est la technique de réduction du volume des déchets dangereux la plus largement utilisée. Environ 60 % en poids des déchets dangereux générés dans ce pays sont organiques et peuvent normalement être détruits et/ou détoxifiés par incinération. De nombreux déchets peuvent être complètement détruits ; d'autres laissent de petites quantités de résidus solides qui peuvent être ou non dangereux.

I.3.6.4.3 Ségrégation des déchets

La ségrégation par type et caractéristiques chimiques des déchets est généralement pratiquée pour éviter les réactions indésirables dans la décharge. Un certain nombre de problèmes dangereux peuvent survenir en mélangeant les déchets. Par exemple, les déchets acides combinés avec des déchets contenant du cyanure produisent un gaz d'hydrogène cyanure extrêmement toxique. La ségrégation avant l'élimination peut permettre l'acquisition de quantités suffisantes de types de déchets particuliers pour réaliser des économies d'échelle dans la conception des installations de traitement pour la détoxification ou la récupération. De plus, il peut être possible d'utiliser des déchets acides pour neutraliser des déchets à pH élevé, ou peut-être d'utiliser des sulfures de déchets pour précipiter des métaux lourds toxiques.

I.3.6.4.4 Détoxification

La détoxification avant l'élimination en décharge peut souvent être accomplie par des processus thermiques, chimiques ou biologiques. Cette catégorie comprend des techniques telles que la neutralisation par échange d'ions, l'oxydoréduction, la pyrolyse, l'incinération, les

boues activées, les lagunes aérées, les étangs de stabilisation des déchets et les filtres ruisselants.

I.3.6.4.5 Dégradation

Plusieurs méthodes de dégradation chimique ont été développées et sont principalement utilisées pour l'élimination des pesticides, notamment l'hydrolyse, la déchloration, la photolyse et l'oxydation. Toutefois, aucune technique unique ne permet de traiter efficacement l'ensemble des substances dangereuses. (Misra, et Pandey 2004)

- L'hydrolyse est particulièrement efficace pour la destruction des pesticides organophosphorés et des carbamates.
- La déchloration chimique permet la dégradation des pesticides polychlorés.
- L'oxydation avec des agents oxydants puissants constitue une autre alternative pour éliminer certains pesticides et herbicides.

Sur le plan économique, la dégradation biologique représente une solution intéressante. Elle consiste à incorporer les pesticides dans le sol afin de favoriser leur décomposition par des micro-organismes. Avec les avancées en génie génétique, il est désormais possible d'utiliser des microbes spécialement conçus pour dégrader des composés spécifiques, maximisant ainsi l'efficacité du processus.

Dans certains pays, comme l'Inde, la détoxification par dégradation photochimique est également une approche viable pour l'élimination des pesticides.

I.3.6.4.6 Encapsulation, enrobage ou fixation physique

Les déchets qui ne peuvent pas être détoxifiés peuvent être encapsulés dans un matériau permanent avant leur élimination. Cette technique consiste à enfermer les composants polluants dans une enveloppe étanche afin de limiter leur dispersion (Misra et Pandey, 2004). On distingue deux formes d'encapsulation :

- Micro-encapsulation : le déchet est mélangé intimement à un liant pour former une masse homogène.
- Macro-encapsulation : le déchet, éventuellement prétraité, est totalement enrobé dans un matériau isolant.

Parmi les matériaux utilisés pour l'encapsulation, on retrouve le béton, l'asphalte fondu et les plastiques (comme le polyéthylène). Les déchets métalliques lourds sont un exemple de résidus nécessitant une encapsulation avant leur mise en décharge.

L'objectif principal de cette méthode est de réduire la lixiviation des substances toxiques en empêchant le contact entre l'eau et les matériaux dangereux. À cet effet, des fûts en acier, seuls ou doublés de plastique, sont largement employés pour le stockage et le transport de petites quantités de déchets dangereux inorganiques (environ une tonne par jour ou moins). Ces contenants assurent une barrière physique durable contre les infiltrations d'eau.

Dans les régions humides, certaines zones de décharges sont encapsulées par des couches d'argile ou d'asphalte, formant des cellules d'isolation imperméables pour protéger les

déchets contre les infiltrations d'eau de pluie et les inondations. De plus, des agents neutralisants comme la chaux peuvent être ajoutés pour stabiliser les déchets, réguler leur pH et éviter toute réaction chimique susceptible d'aggraver leur impact environnemental.

En revanche, dans les régions arides, où les précipitations sont faibles et l'accumulation d'eau n'est pas un problème, l'encapsulation généralisée des décharges n'est pas nécessaire.

Enfin, les décharges sont classées selon la nature des déchets qu'elles contiennent, garantissant une gestion adaptée à chaque type de résidu.

I.3.6.5 Critères de sélection et d'évaluation des sites d'enfouissement des déchets chimiques

Les sites d'enfouissement des déchets chimiques doivent être choisis pour tirer parti des facteurs géologiques responsables de l'atténuation optimale des déchets et de tout produit de décomposition, et conçus pour surmonter les inconvénients posés par les sites moins favorables (Tableau I.6).

Tableau I. 6: Prise en compte dans le choix du site d'une installation d'élimination des déchets dangereux (Misra et Pandey, 2004)

Caractéristiques physiques	Caractéristiques écologiques	Caractéristiques d'utilisation des terres	Logistique	Valeurs humaines
(a) Topographie	(a) Flore et faune	(a) Potentiel de développement	(a) Proximité avec les utilisateurs	(a) Paysage
(b) Stabilité du terrain	(b) Valeur de conservation	(b) Désignation d'utilisation des terres (résidentiel/industriel)	(b) Accès aux transports	(b) Loisirs
(c) Stabilité sismique	(c) Habitat	(c) Valeur agricole	(c) Disponibilité des services publics et services (hôpitaux, services d'incendie, etc.)"	(c) Historique et archéologique
(d) Sols de surface		(d) Couloir de transport	(d) Utilisation des terres/zonage adjacent(e)	(d) Densité de population et état de santé".
(e) Eaux de surface et cours d'eau		(e) Industrie extractive/minière		(e) Opportunités d'emploi
(f) Géologie de surface et aquifères				
(g) Direction du vent				

Parmi les options ci-dessus pour l'élimination finale, l'enfouissement est considéré, de loin, comme la procédure d'élimination finale la plus répandue, mais le problème de la contamination potentielle des terres environnantes ou des nappes phréatiques en raison de la lixiviation de substances toxiques à partir des boues doit être pris en compte. Certains critères généraux à prendre en compte pour la sélection et l'évaluation d'un site d'enfouissement des déchets chimiques sont les suivants :

- Les sites d'enfouissement des déchets chimiques devraient idéalement être situés dans des zones de faible densité de population, de faible valeur d'utilisation alternative des terres et de faible potentiel de contamination des eaux souterraines.
- Tous les sites doivent être situés loin des plaines inondables, des dépression naturelles et des pentes excessives.
- Tous les sites doivent être clôturés ou autrement surveillés pour empêcher l'accès du public.
- Dans la mesure du possible, les sites devraient être situés dans des zones à forte teneur en argile en raison de la faible perméabilité et des propriétés absorbantes bénéfiques de ces sols.
- Tous les sites doivent être à une distance relativement courte des moyens de transport existants par rail et par route.
- La génération de déchets importante devrait être à proximité.
- Les déchets transportés sur le site ne doivent pas nécessiter de transfert pendant le transport.
- Tous les sites doivent être situés à une distance adéquate des puits existants qui servent de sources d'eau potable pour la consommation humaine ou animale.
- Dans la mesure du possible, les sites devraient avoir des taux de pluie faibles et des taux d'évaporation élevés.
- Des enregistrements doivent être tenus des emplacements des différents types de déchets dangereux dans la décharge pour permettre une récupération future si l'économie le permet. Cela facilitera l'analyse des causes si des réactions indésirables ou d'autres problèmes se développent sur le site.
- Des études détaillées de caractérisation du site et des déchets sont nécessaires pour estimer la stabilité à long terme et la lixiviation des boues de déchets sur le site spécifique sélectionné.
- Le site doit être situé ou conçu pour empêcher toute lixiviation significative ou tout ruissellement prévisible des déversements accidentels survenant lors de la livraison des déchets.
- La base du site d'enfouissement des déchets doit être à une distance suffisante au-dessus de la nappe phréatique pour empêcher le déplacement des lixiviats vers les aquifères.

I.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de dresser une revue générale des connaissances disponibles dans la littérature sur les déchets en général et les déchets spéciaux dangereux en particulier. Les déchets dangereux possèdent une ou plusieurs propriétés pouvant être solides, organiques (solvants, hydrocarbures, etc.), minérales (acides, boues d'hydroxyde métallique, etc.) ou gazeuses, selon la Fédération Nationale des Activités de Dépollution et de l'Environnement (FNADE). Ces déchets peuvent causer des dommages importants à la santé humaine et à l'environnement. Les modes de traitement des déchets dangereux comprennent différentes

filières, telles que le recyclage, la valorisation, ainsi que des traitements physico-chimiques, biologiques, thermiques ou par stockage et confinement, selon la FNADE.

Dans le sud de l'Algérie, le développement urbain rapide et l'essor de l'industrie pétrolière entraînent la production de grandes quantités de déchets dangereux, posant un problème majeur de gestion et de contrôle des risques de pollution des nappes phréatiques. La solution au problème de contamination abordé dans cette recherche repose sur le stockage, qui permet de confiner les déchets dans des sites spécifiques, appelés centres de stockage des déchets, en utilisant des barrières isolantes (barrières passives). Nous aborderons au second chapitre les généralités sur les centres de stockages des déchets et en citant quelques travaux de recherche dans l'utilisation des barrières de sécurité passives artificielle, enfin on finalise le chapitre par l'état de l'art sur les lixiviats des déchets dangereux

Chapitre II :

Généralités sur les Centres de Stockage des Déchets

Chapitre II:Généralités sur les Centres de Stockage des Déchets.

II.1 Introduction

Pendant longtemps, les déchets ont été enfouis de manière instable, sans aucun contrôle ni limitation, ni contrainte sur les différentes catégories des déchets enfouis. Or, cet enfouissement peut avoir de graves conséquences pour l'homme, les êtres vivants et le milieu environnant. L'infiltration des eaux de pluie génère des « boues ou des produits » contaminées issues de la décomposition des déchets, appelées lixiviats. Ces lixiviats sont chargés d'éléments extrêmement nocifs pour l'environnement et la santé humaine. Les déchets produisent également du dioxyde de carbone et du méthane, qui sont des gaz à effet de serre.

La construction des décharges nécessite une double barrière de sécurité, composée d'une « barrière passive » (une avec une formation géologique peu perméable, naturelle ou ajoutée au fond ou sur les côtés (les flancs), pour empêcher la contamination du sol et de l'eau) et d'une « barrière active » (une structure de drainage étanche pour drainer et collecter les lixiviats). Si les conditions optimales souhaitées ne sont pas naturellement présentes sur le site où la décharge doit être construite, la barrière passive peut être reconstituer en ajoutant un autre matériau naturel ou synthétique (artificiel de substitution), tel- que des mélanges de sable et de bentonite réalisés par (Gueddoua et al, 2016) ; des mélanges de sable, de bentonite et d'argile organophile (Heidarzadeh and Parhizi, 2019) ; de la bentonite, du sable calcaire et du tuf (Demdoun et al, 2016; Demdoun, 2019; A Demdoun et al, 2020) ; mélange de la bentonite et les cendres volantes réalisé par (Wasil, 2020) et de mélange sol et chaux et de fumée de silice avec (Fattah et al, 2022).

Le présent chapitre introduit une Présentation des Centres de Stockage des Déchets (CSD). Dans la deuxième partie, nous allons présenter la durabilité et la maintenance de la barrière passive d'un CSD. Ensuite on abordera la définition des lixiviats des déchets dangereux et leurs caractéristiques. En outre, dans la dernière partie on présente l'état de l'art sur les écoulements des lixiviats dans les argiles en général, et dans les barrières passives à base d'argile en particulier.

II.2 Présentation des Centres de Stockage des Déchets (CSD) :

II.2.1Définition des CSD :

Les centres de stockage des déchets sont des lieux où sont stockés les déchets qui ne peuvent être recyclés ou valorisés techniquement, afin de maîtriser leur impact sur l'environnement. On recherche les conditions économiquement acceptables au moment où les déchets sont mis en en place.

Les CSD sont également appelées des décharges pendant les années 1970. Lorsque la réglementation a été introduite, un certain nombre de restrictions au dépôt ou l'enfouissement des déchets ont étaient imposés. Ils ont alors pris le nom de Centre d'enfouissement technique.

II.2.2 Classification des CSD :

On distingue trois grands types de centres de stockage, en fonction du type des déchets acceptés :

- *Les centres de stockage nommés de classe 1*, également appelées installations (ou centres) de stockage des déchets dangereux (ISDD ou CSDD). Dans des conditions strictes (équipements spéciaux et systèmes d'étanchéité) dictées par la réglementation, ces installations reçoivent des déchets classés pour la protection de l'environnement (ICPE), dits déchets industriels spéciaux. Ces déchets sont dangereux pour l'environnement et/ou pour les êtres vivants avant d'être enfouis, ils subissent un traitement pour les stabiliser (déjà cité dans le chapitre I paragraphe 3.6.4).
- *Les centres de stockage nommés de classe 2* également appelées installations de stockage de déchets ménagers et assimilés non dangereux (ISDND), ou centres de stockage de déchets ultimes (CSDU). Ces installations accueillent en général des déchets, même industriels, qui ne peuvent être traités autrement dans les conditions techniques et économiques. En tant que centres de stockage des déchets ultimes, ils sont soumis à une réglementation stricte régissant leurs conceptions et leurs constructions, ainsi que leurs exploitations et même leurs post-exploitations.
- *Les centres de stockage dits de classe 3* également appelés installations (ou centres) de stockage de déchets inertes, de granulats et de déblais de dragage (ISDI ou CSDI). Ils sont principalement destinés aux déchets de construction et des travaux publics.

II.2.3 Étude des paramètres géologiques et géotechniques de cas d'implantation d'un CSD

II.2.3.1 Réalisation des CSD : contextes réglementaires

Les CSD sont réalisées avec une attention très particulière aux problèmes de l'environnement dans la situation opérationnelle et sociale. Elles doivent donc être conçues, et planifiées en fonction de critères économiques et sociétaux de l'environnement dans lequel elles se trouvent, ainsi que de critères techniques. Au niveau de la conception des décharges, voici les éléments principaux à prendre en compte :

- Types et quantités de déchets au plan physique, technique, chimique ou biologique.
- Caractéristiques et propriétés des déchets.
- Niveau technique élevé.
- Prétraitement des déchets souhaité.

Contextes réglementaires en Algérie

En Algérie, la mise en place des centres d'élimination des déchets est régie par un cadre législatif et réglementaire spécifique destiné à encadrer la gestion des déchets tout en protégeant l'environnement et la santé publique. Le cadre juridique algérien repose

principalement sur la loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, qui définit les principes de base de la gestion des déchets solides, y compris les déchets dangereux. Cette loi impose des obligations strictes aux installations de stockage, notamment en termes de localisation, de conception et d'exploitation, afin de minimiser l'impact sur l'environnement.

En outre, plusieurs décrets d'application définissent les modalités pratiques de mise en œuvre, comme le décret n° 02-175 du 20 mai 2002, qui définit les conditions techniques de gestion des installations de stockage des déchets, notamment en matière de surveillance des eaux souterraines, de prévention des risques de pollution et de gestion des gaz produits. En outre, l'Algérie fait partie à plusieurs conventions internationales, telles que la Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontalières des déchets dangereux et de leur élimination, ceci renforce sa pérennité en faveur d'une gestion responsable des déchets. Par conséquent, le respect de ce cadre réglementaire est essentiel pour assurer la durabilité et la sécurité des décharges de déchets dangereux en Algérie, tout en traitant les questions d'environnement et de santé publique.

II.2.3.2 Principe de confinement suivant la réglementation Algérienne :

Le confinement défini dans ces réglementations a été développé en réponse à certaines préoccupations dues aux expériences précédentes avec les sites de décharge, il est conçu pour garantir et minimiser la quantité d'eau entrant et sortant du site.

- un drainage efficace des lixiviats afin de minimiser la lixiviation dans le sol.
- la durabilité du système de confinement pendant plusieurs décennies, conformément à l'évolution lente des déchets (figure II.1).

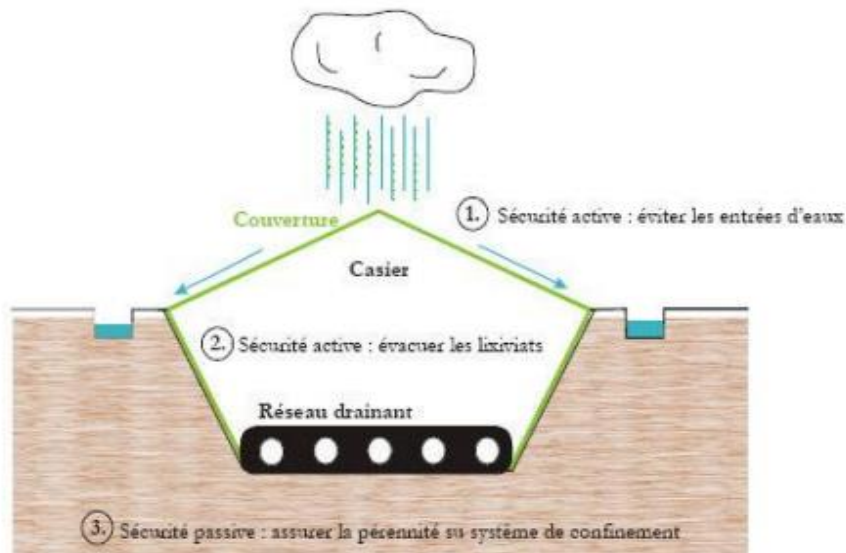


Figure II. 1: principe de confinement (ADEME, 1999).

II.2.3.3 Barrières de sécurité d'un centre de stockage de déchets (barrières étanches)

Les réglementations régissant la réalisation des CSD exigent une double barrière de sécurité :

- *Une barrière de sécurité active* : pour assurer le drainage et la collecte des lixiviats. Cette barrière est constituée d'un composé d'étanchéité qui combine des matériaux synthétiques appelés géosynthétiques (géomembrane et géotextile) et des matériaux naturels (couche de drainage constituée de drains et de graviers non calcaires roulés) (Figures II.2 et II.3).

Une barrière de sécurité passive : Prévenir autant que possible la contamination du sol et de l'eau à long terme, minimiser les infiltrations, contenir les lixiviats et assurer une protection permanente des aquifères (Rowe et al, 2004, 2022). Il s'agit d'une formation géologique de faible perméabilité, naturelle ou rapportée, située au fond et sur les flancs de l'alvéole (Figures II.2 et II.3).

II.2.3.3.1 Fonctions principales de la barrière de sécurité passive

La barrière de sécurité passive constitue l'élément fondamental garantissant la protection de l'installation de stockage. Elle doit assurer une étanchéité maximale, tant au niveau du fond et sur les flancs de préserver le milieu naturel environnant, en empêchant :

- La migration des lixiviats vers les eaux souterraines et le sol environnant (« flux sortants » de l'installation de stockage).
- L'infiltration des eaux souterraines pénétrant sur le site de stockage (« flux entrants »), notamment dans certaines formations géologiques particulières.

L'efficacité de cette barrière repose principalement sur sa capacité d'étanchéité, laquelle est déterminée par la perméabilité du matériau constituant la barrière. Le coefficient de perméabilité, K (m/s), est le paramètre utilisé pour mesurer cette perméabilité. Le tableau II.1 indique les valeurs de la conductivité hydraulique de l'eau à ne pas dépasser, conformément aux recommandations de la législation.

Par ailleurs, la durabilité de l'étanchéité doit être assurée sur le long terme. La barrière doit ainsi résister: - aux sollicitations et contraintes mécaniques liées à sa mise en œuvre et à son entretien, ainsi qu'aux éventuelles agressions chimiques provoquées par les lixiviats (Ait Saadi, 2003).

II.2.3.3.2 La réglementation Algérienne

Le projet d'arrêté ministériel algérien relatif aux règles d'aménagement et d'exploitation applicables aux centres d'enfouissement technique, aux décharges et aux centres de stockage des déchets pour le stockage de certains *déchets industriels spéciaux*, précise que la barrière de sécurité passive doit être constituée d'une formation géologique naturelle en place ou rapportée, d'une épaisseur minimale de 5 m. Cette formation doit présenter un coefficient de perméabilité inférieur ou au plus égal à 1.10^{-9} m/s au fond et sur les côtés des flancs de chaque alvéole.

La figure II.2 montre une coupe transversale typique conforme aux prescriptions relatives aux barrières pour un dépôt de déchets industriels spéciaux

Tableau II. 1: Résumé de l'épaisseur et de la perméabilité des couches géologiques recommandées dans le règlement pour l'établissement des barrières de sécurité passives dans les décharges pour les déchets industriels spéciaux et les déchets ménagers et assimilés (Guide technique, août 1996).

	Type de centre de stockage				
	Déchets d'ordures ménagères et assimilés			Déchets industriels spéciaux	
	Epaisseur min (m)		K _{max} (m/s)	Epaisseur min (m)	K _{max} (m/s)
Barrières de sécurité passive normalement constituée par le substratum du site	Partie supérieure	1	1.10 ⁻⁹	5	1.10 ⁻⁹
	Partie inférieure	5	1.10 ⁻⁶		
Barrières de sécurité passive	Partie supérieure rapportée	1	1.10 ⁻⁹	5	1.10 ⁻⁹
	Partie inférieure en place	5	1.10 ⁻⁶		
	Si substratum sur 5m> 1.10 ⁻⁶ m/s	Solutions particulières			

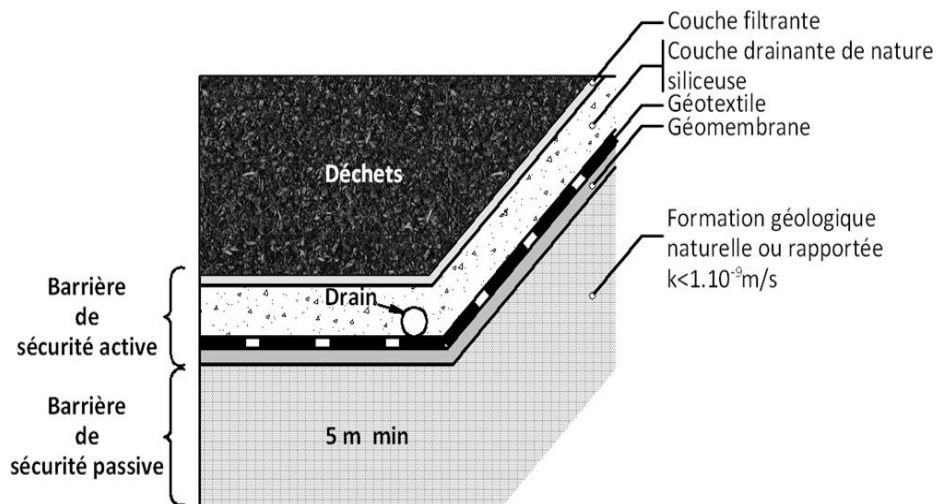


Figure II. 2: Coupe schématique de la double sécurité préconisée pour le stockage des déchets industriels spéciaux et dangereux (Cartaud, 2004), (Ait Saadi, 2003) et (guide technique août 1996).

Dans le cas du stockage *des déchets ménagers et assimilés*, les exigences de la barrière de sécurité passive diffèrent légèrement, elle doit présenter, de haut en bas :

- Une perméabilité inférieure à 1×10^{-9} m/s sur une hauteur minimale de 1 mètre ;
- Une perméabilité inférieure à 1×10^{-6} m/s sur une hauteur d'au moins 5 mètres.

-La figure II.3 illustre une coupe schématique des barrières de sécurité dans le cas d'une installation de stockage destinées aux déchets ménagers et assimilés.

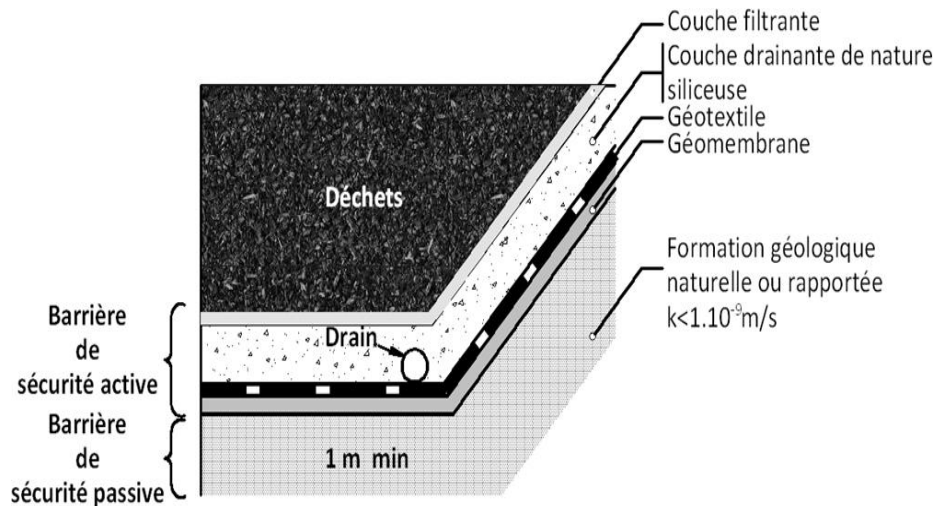


Figure II. 3: Coupe schématique de la double sécurité préconisée pour le stockage des déchets ménagers et assimilés selon la réglementation française, (Gautam et al, 2019) et (guide technique aout 1996).

Le tableau II.2 ci-dessous montre les recommandations pour le confinement en fond du casier pour quelques pays européens, où la valeur de la perméabilité tourne autour de 10^{-9} m/s pour 1 mètre d'épaisseur.

Tableau II. 2: Réglementations pour les installations de stockage des déchets pour différents pays (Devernay, 2008).

Pays	Déchets non dangereux		Déchets dangereux	
	h (m)	k (m/s)	h (m)	k (m/s)
Union européenne	1	1×10^{-9}	5	1×10^{-9}
Allemagne	0,75	5×10^{-10}	1,5 3	5×10^{-10} 1×10^{-7}
Autriche	0,5 0,75	5×10^{-10} 1×10^{-9}	0,5	5×10^{-10}
Belgique	3	1×10^{-9}	1	Nd
France	1 5	1×10^{-9} 1×10^{-6}	5	1×10^{-9}
République Tchèque	1	1×10^{-9}	1 3	1×10^{-9} 1×10^{-7}
Suisse	0,5 10	1×10^{-9} 1×10^{-7}	-	-

Lorsque les formations géologiques du site ne satisfont pas aux exigences réglementaires de la perméabilité (pas moins de 1.10^{-9} m/s à une hauteur d'au moins 1 m, mais moins de 1.10^{-6} m/s à une hauteur d'au moins 5 m, hors eau), la barrière de sécurité passive peut être complétée par une barrière géologique artificielle reconstituée par l'ajout de matériaux naturels dans un mélange homogène d'argiles spécifiques (par exemple la bentonite). Si de tels matériaux argileux naturels n'existent pas à proximité du site, ils peuvent également être

remplacés par des matériaux synthétiques (géosynthétiques bentonitiques). Toutes ces alternatives doivent avoir une épaisseur d'au moins 1m et une perméabilité d'au moins 1.10^{-9} m/s. Tableau II.3.

Figure II. 4 : Diagramme du principe de l'étanchéité composite et des matériaux utilisés (Cartaud, 2004).

SYSTÈME	FONCTION	MATÉRIAUX UTILISÉS
BARRIÈRE ACTIVE	Drainage des lixiviats	- Couche drainante (50 cm) : éléments granulaires non calcaires (calibrés et de surface arrondie) - Géosynthétiques drainants éventuels.
	- Étanchéité active - Protection de la barrière passive	- Étanchéité par géomembrane, assurant l'absence de contact entre les lixiviats et la barrière minérale. - La géomembrane est séparée et protégée de la couche drainante par un géotextile anti-poinçonnant
BARRIÈRE PASSIVE	- Protection du sous-sol à long terme - Atténuation	- Formation géologique en place à dominance argileuse (sol naturel) - Sols argileux rapportés (éventuellement traités à la bentonite ou à la kaolinite) et compactés - Renforcement des propriétés hydrauliques par ajout d'un géosynthétique bentonitique

II.2.3.3 Barrière de sécurité passive artificielle (matériau rapporté)

Si la barrière géologique ne répond pas naturellement aux exigences susmentionnées, elle peut être complétée et renforcée artificiellement par d'autres moyens offrant une protection équivalente ; cette barrière géologique artificielle doit avoir une épaisseur d'au moins 0,5 mètre. L'argile peut être utilisée en fonction de ses propriétés.

En effet, une large gamme de matériaux naturels répond à ces critères, tous ayant une forte proportion d'argile, mais pouvant également comporter une fraction silteuse ou même sableuse. Le terme de matériau argileux est donc plus indiqué ; plusieurs chercheurs ont travaillé sur ces mélanges ; telles que des mélanges de sable et de bentonite réalisés par (Gueddouda et al, 2016; Kouloughli et Lehocin, 2007) ; des mélanges de sable, de bentonite et d'argile organophile étudié par (Cui et al, 2008 ; Heidarzadeh et Parhizi, 2019) ; des combinaisons de bentonite, de sable calcaire et de tuf traité par (Demdoun et al, 2016; Demdoun, 2019; Demdoun et al, 2020). Des revêtements géosynthétiques en argile (bentonites et géotextiles) (Shankar et Muthukumar, 2017) préparée artificiellement en laboratoire (Ören, A. H. et AkarR. Ç, 2017) ; des sols limoneux par (Holtz, Kovacs, 1981) ; des argiles compactées (Daniel, 1984 ; Mosavat et Nalbantoglu, 2013 ; Shankar et Muthukumar, 2017) ; du sable argileux (Daniel et Wu, 1993) ; des mélanges de sols et de poussière de four à ciment (CKD) (Amadi et Eberemu, 2013) ; des mélanges de sols traités à

la chaux (Tsai et Vesilind, 1998 ; Bozbey et Guler ; 2006 ; Rahmani, 2014 ; Fattah et al, 2022) ; argile et bentonite (Shakir et Ali, 2019).

➤ **On peut citer d'autres matériaux de substitution (déchets) :**

En ce qui concerne la valorisation des sous-produits des industries minérales pour la réalisation de la barrière passive artificielle, de nombreux travaux ont été entrepris par l'utilisation des boues ou des stériles miniers tel que la boue rouge (un déchet de la raffinerie) étudié par (Rubinos et al, 2013) ; boue rouge avec argile et ciment (Kalkan, 2006) ; des boues adoucissant la chaux (Dąbska, 2019) ; sédiments de barrage et bentonite (Bounouara et al 2020); mélange de déchets d'argile et de la bentonite (Zhao, 2017 ; Banar et al, 2019), la même démarche que celle préconisée pour les matériaux argileux naturels permettra de vérifier s'ils peuvent répondre aux exigences de la qualification.

On peut penser que à :

- Apporter des matériaux naturels adéquats en quantités suffisantes ou des matériaux de substitution (remplacement) issus de gisements homogènes.
- Traitement in-situ des sols naturels en l'améliorant par l'ajout de bentonite ou d'un matériau argileux performant (de bonne qualité disponible).

Le choix de la solution optimale dépendra non seulement des problèmes techniques rencontrés (adaptation au site), mais aussi des critères économiques ; notamment le coût du transport des matériaux qui permettront d'identifier la solution la plus intéressante dans un concept de base.

Les barrières d'argile artificielles sont liées à :

- ❖ La nature et les propriétés des matériaux argileux ; la composition minéralogique ; la granulométrie, en particulier la capacité d'échange cationique et donc à former un environnement permettant d'absorber (stabilisation en surface) et d'adsorber (stabilisation en masse) des polluants sur une période assez longue,
- ❖ La perméabilité définit par le comportement hydraulique, dont la valeur dépend de leur fonction et utilisation en tant que barrière étanche ou couverture.
- ❖ La capacité à mise en œuvre définit par l'ouvrabilité, correctement sans recourir à des techniques spéciales en tenant compte des conditions climatiques locales.
- ❖ La résistance mécanique incluant la compressibilité, la résistance, y compris la résistance à l'érosion
- ❖ La stabilité dans le temps, notamment la résistance à l'impact des lixiviats (l'agressivité chimique), de l'eau stagnante des eaux sous-jacentes- (en cas d'utilisation comme couche d'isolation) ou des gaz issus des déchets et, éventuellement, au séchage.

Les caractéristiques des matériaux utilisés sont fonction des paramètres suivants :

- ❖ La nature du matériau (granulométrie, composition minéralogique, CEC - capacité d'échange de cationique, cations échangeables, pH, composition chimique : Fe, Mn, S, matière organique)
- ❖ L'homogénéité du gisement ;
- ❖ La possibilité d'homogénéisation ou d'amélioration ;
- ❖ Les conditions initiales et les méthodes de mise en œuvre (compactage, teneur en eau)
- ❖ La nature des fluides avec lesquels la barrière peut entrer en contact.

II.2.4 Choix des matériaux adéquat, qualification d'échantillons

Pour sélectionner un matériau adéquat pour une barrière passive artificielle en CSD (Centre de Stockage de Déchets), les critères de nature, ouvrabilité, et perméabilité sont essentiels. Pour ce faire, ce matériau doit répondre aux conditions suivantes (d'après le Manuel relatif aux matières naturelles pour les barrières argileuses ouvragées des C.E.T).

II.2.4.1 Critères de nature :

Il est important de rappeler que l'utilisation de l'argile dans le concept de la barrière passive se justifie pour différentes raisons :

Sa finesse (moins de 2 μm), qui implique une taille de pore très réduite, ses charges électriques de surface qui permettent l'adsorption (mais aussi la désorption) des éléments chimiques présents dans la solution (CEC), et son comportement mécanique au sens large afin de définir les conditions de sa mise en œuvre sur site (Derras, 2012 ; Sadok, 2013 ; Belatra and Beroman, 2017)

- ❖ Granularité :
 - ❖ 15 % de passant à 2 μm (fraction argileuse)
 - ❖ 30 % de passant à 60 μm
 - ❖ < 10 % de refus à 10 mm
 - ❖ Pas d'élément > 50 mm
- ❖ Fraction argileuse contenant plus de 10 % des sols gonflants ;
- ❖ CEC / % < 2 μm doit être > 0.3 ;

II.2.4.2 Critères d'ouvrabilité :

Le matériau doit être manipulable et mis en œuvre facilement sur le site. Critères à vérifier :

- ❖ Limite de liquidité < 80%.
- ❖ Indice de plasticité supérieur à 10 %, de préférence entre 10 et 30 %, et inférieur à 40 % (les argiles de plasticité plus élevée forment des mottes si le matériau est sec et sont trop collantes si le matériau est humide).

- ❖ Épaisseur : 5 couches de 20 cm $\pm$ 5 cm d'épaisseur après compactage, chacune, avec une épaisseur totale de 1m (guide Algériens pour la conception de C.E.T des déchets ménagers 2005) (Gueddouda et al, 2016).

II.2.4.3 Critères de perméabilité :

La perméabilité d'une barrière d'argile est le principal paramètre d'une barrière d'étanchéité de fond de CSD, qu'il s'agisse d'une barrière d'étanchéité de fond ou d'une barrière de couverture semi-imperméable, la perméabilité est un critère clé pour garantir la rétention des lixiviats. Pratiquement toutes les autres analyses ne contribuent qu'à

- ❖ Préciser les propriétés des matériaux utilisées pour prévoir la perméabilité.
- ❖ Mesurer sa valeur en fonction des différents paramètres
- ❖ Garantir que la perméabilité sera obtenue lors de la pose et restera constante au dans le temps.

La perméabilité est mesurée par le coefficient de perméabilité, k , (également connu sous le nom de conductivité hydraulique), en supposant la loi de Darcy applicable (milieu saturé et $K > 1.10^{-12}$ m/s, sinon la diffusion prédomine). Dans ce qui suit, les termes « perméabilité » et « coefficient de perméabilité » sont parfois utilisés de manière interchangeable, selon l'usage.

La perméabilité est mesurée pour les liquides (principalement l'eau mais aussi parfois les hydrocarbures ou d'autres fluides) et pour les gaz. Si le coefficient de perméabilité est mesuré avec de l'eau, il est exprimé en m/s. Si le coefficient de perméabilité est mesuré avec un autre fluide, il est de préférence exprimé en unités Darcy (ou en μm^2).

De nombreux auteurs ont étudié la perméabilité de la couche passive des sites d'élimination des déchets dangereux, On peut citer :

- ❖ Fathollahi et al, 2015, ont analysé la perméabilité des bentonites modifiées pour le lixiviat de pétrole brut et ont obtenu des valeurs de $K = 5,2 \times 10^{-9}$ m/s et de $9,56 \times 10^{-11}$ m/s avec de l'eau.
- ❖ Heidarzadeh et Parhizi, 2019 ont étudié un mélange de 70 % de sable et 30 % de bentonite sodique (S70B30) et ont obtenu $K = 1,16 \times 10^{-11}$ m/s.
- ❖ Gueddouda et al, 2016 ont analysé un mélange de 85 % de sable et 15 % de bentonite (S15B85) et ont obtenu $K = 4,58 \times 10^{-11}$ m/s.
- ❖ Une combinaison de 30 % de sépiolite en poids de zéolite exposée à des déchets de cuivre et de chrome (Tuncan et al, 2016) ont montré une perméabilité de $K = 1,17 \times 10^{-8}$ m/s.
- ❖ Shakir et Ali, 2019 ont trouvé une perméabilité de $K = 6,83 \times 10^{-11}$ m/s avec de l'eau et $K = 7,8 \times 10^{-9}$ m/s avec du pétrole brut.
- ❖ Green et al, 1981 Ont calculés la perméabilité à l'eau de trois types de sols :
 - $K = 13,5 \times 10^{-9}$ m/s pour l'argile de Fire Clay,

- $K = 220 \times 10^{-9}$ m/s pour le kaolin de Kosse,
- $K = 38 \times 10^{-9}$ m/s pour le schiste de Ranger Shale.

Enfin, Dabska, 2019 a obtenu une valeur de $6,5 \times 10^{-9}$ cm/s pour un revêtement en boue de chaulage compactée.

II.2.4.4 Les paramètres mécaniques

Le comportement mécanique des matériaux est caractérisé par des propriétés qui permettent de déterminer les tassements, la compressibilité ou la consolidation, et la résistance au cisaillement du sol. Ces propriétés sont déterminées à partir d'essais géotechniques en laboratoire (essai œdométrique, essai Proctor et essai de cisaillement).

Les valeurs de résistance et de déformation déterminent les caractéristiques de conception et de dimensionnement de la barrière.

II.2.4.5 Tenue dans le temps

Leur tenue dans le temps dépend principalement de la nature du matériau :

Argile gonflante ou non gonflante, capacité d'échange d'ions, teneur en carbonate (CaCO_3) et en matière organique (MO).

Elle dépend également de l'environnement géochimique, c'est-à-dire de la nature des fluides en contact (liquides ou gaz). Cet environnement géochimique doit être défini et les essais de qualification doivent être déterminés dans des conditions aussi proches que possible de la réalité.

II.2.4.6 Paramètres et essais

Une fois les propriétés souhaitées du matériau sont définies, il est nécessaire de les évaluer à travers différentes mesures :

- Paramètres liés à la nature et à l'état initial du matériau : Ils incluent la composition minéralogique, la granularité ainsi que les propriétés physiques initiales, mesurées in situ, telles que la teneur en eau, la compacité et la plasticité.
- Paramètres caractérisant les propriétés du matériau : Ils englobent des aspects comme la perméabilité, les propriétés mécaniques, l'ouvrabilité et la résistance dans le temps, etc.
- Les résultats obtenus doivent permettre d'établir des corrélations entre les propriétés recherchées et la nature du matériau. Ces corrélations seront ensuite utilisées pour guider les processus d'acceptation et d'inspection du matériau.

II.2.5 Traitements des matériaux constituant la barrière étanche

Les matériaux constituant la barrière passive sont traités en raison de la difficulté de trouver des formations argileuses homogènes étendues et caractérisées par des propriétés mécaniques appropriées pour la réalisation des sites de stockage des déchets.

Malgré cet obstacle, des solutions peuvent être trouvées : Soit du côté du sol naturel du site, ou soit en ajoutant des additifs.

L'objectif principal de ces traitements est d'améliorer :

- Les paramètres de comportement hydraulique (perméabilité).
- Les paramètres du comportement mécanique (stabilité des talus).
- Ou les deux :

Dans le but d'améliorer le comportement hydraulique d'un matériau naturel, la solution du traitement la plus courante est l'ajout de bentonite (Didier et al, 1996; Chapuis, 2002b; Yosra 2023). Il est clair que l'ajout d'un faible pourcentage de bentonite améliore les performances hydrauliques du matériau à traiter (Figure II.5).

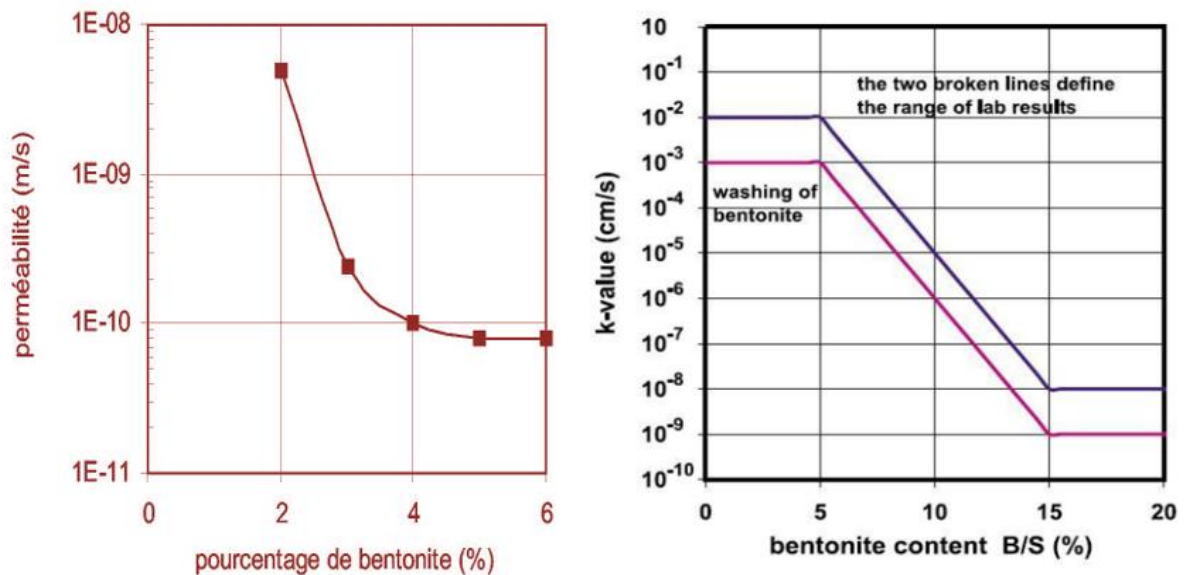


Figure II. 5: Influence de la teneur en bentonite sur la perméabilité (Didier and Rocha, 1996 ; Chapuis, 2002b, in Yosra 2023)

Un autre ajout la chaux peut améliorer le comportement hydraulique d'un matériau naturel, de nombreux travaux ont été entrepris pour étudier l'effet de la chaux sur la perméabilité des sols compactés (Figure II.6).

Certains montrent une augmentation de la perméabilité avec le traitement à la chaux (Tran TD et al, 2014 ; Nalbantoglu et Tuncer, 2001) tandis que d'autres montrent une diminution, (Terashi et al, 1980 ; Brandl, 1981).

D'autres travaux montrent que la perméabilité des sols traités augmente au début puis diminue après plusieurs jours de cure (Locat et al, 1996 ; Metelková et al, 2011).

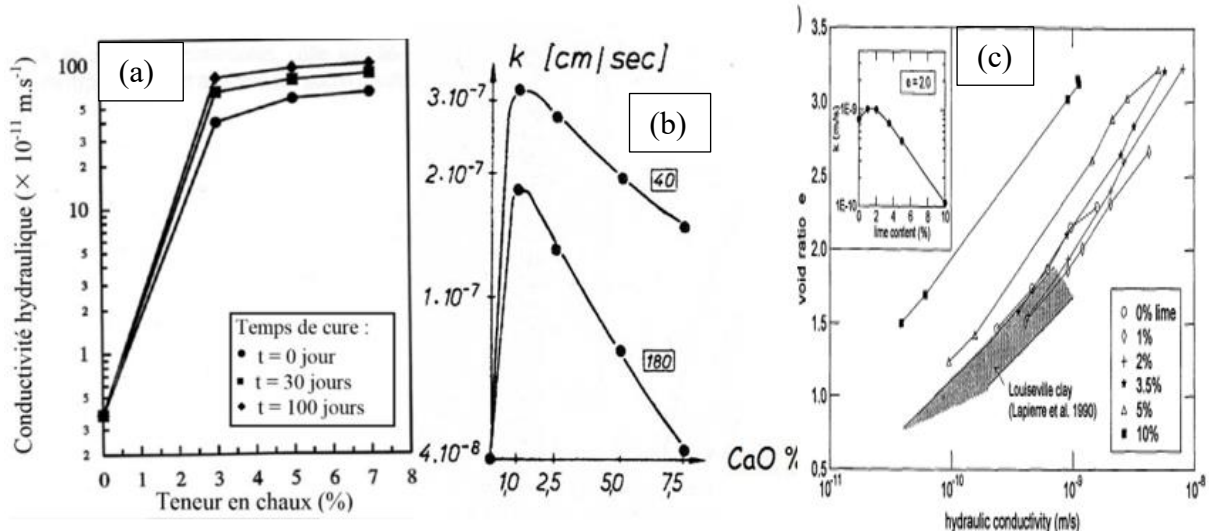


Figure II. 6: Influence de la teneur en chaux et du temps de cure sur la perméabilité d'une argile compactée à l'optimum (a) pour (Nalbantoglu and Tuncer, 2001) ;(b) d'un sol limoneux traité à la chaux (Brandl, 1981) ; même pour un sol à indice des vide $e=2.0$ (Locat et al, 1996)

II.3 Durabilité et maintenance de la barrière passive d'un CSDD.

La durabilité et la maintenance des barrières passives dans les centres de stockage des déchets dangereux représentent des enjeux environnementaux et économiques majeurs. Ces structures sont conçues pour empêcher la migration des contaminants vers les sols et les eaux souterraines. Cependant, leur efficacité dépend de la stabilité des matériaux utilisés et des facteurs environnementaux externes, notamment l'évolution de l'état hydrique, les contraintes thermiques et mécaniques, ainsi que les interactions avec les lixiviats (Wu et al, 2024).

II.3.1 Facteurs impactant la durabilité des barrières passives

II.3.1.1 Variations hydriques selon les phases de construction (influence climatique)

Les barrières d'argile compactées sont particulièrement sensibles aux conditions climatiques pendant et après leur installation.

Phase 1 : Exposition Climatique Avant la Pose de la Géomembrane. Pendant cette phase, des baisses rapides de la teneur en eau peuvent survenir en cas de conditions climatiques sèches, ce qui expose la barrière à la dessiccation. Cependant, sa faible conductivité hydraulique limite la saturation rapide même sous de fortes précipitations. Une étude récente a observé qu'une intense mais courte pluie augmente temporairement la teneur en eau, mais n'atteint pas la profondeur nécessaire pour une saturation complète (Wu et al, 2024).

Phase 2 : Après la Pose de la Géomembrane. Une fois la géomembrane posée, les températures élevées dues à l'exposition solaire (parfois jusqu'à 70°C) provoquent des cycles d'humidité (Koerner, 2005). Ces cycles favorisent la condensation sur la géomembrane et, avec le temps, des pertes significatives de la teneur en eau dans la barrière sous-jacente. Ces

pertes augmentent le risque de dessiccation et de fissures dans l'argile compactée, ce qui est particulièrement problématique pour la durabilité globale de l'installation (Ali Ghavan et Abbas, 2016 ; Philip et al, 2002 ; Min Wang et al, 2022).

II.3.1.2 Contraintes mécaniques et consolidation (impact mécanique)

Pendant la phase d'exploitation, la barrière subit des contraintes mécaniques dues au poids des déchets stockés. Cette pression peut entraîner une consolidation de la couche d'argile, réduisant la taille des pores par compression qui pourrait contribuer à augmenter la teneur en eau globale de la couche d'argile.

II.3.1.3 Gradient thermique dû à la dégradation des déchets (influence biologique)

La dégradation biologique des matières organiques produit de la chaleur, avec des températures atteignant 60 °C (Rowe et al, 2005 ; Rowe, 2018 ; Abuel-Naga et Bouazza, 2013) dans le massif des déchets. Ce gradient thermique induit une migration de l'humidité vers les zones plus froides, notamment vers le sol sous-jacent. Cependant, la géomembrane imperméable limite les apports d'eau par le haut, ce qui aggrave la dessiccation de l'argile (Döll, 1997; Ali Ghavan and Abbas, 2016 ; Philip et al, 2002; Döll et al, 2021). C'est le cas même de la dessiccation pour les argiles à faible plasticité argiles compactées à 1-2% de la teneur en eau optimale Proctor standard (Figure II.7), et plus particulièrement si la barrière d'argile est compactée à proximité ou au-dessus de la limite de plasticité (Rowe, 2018).

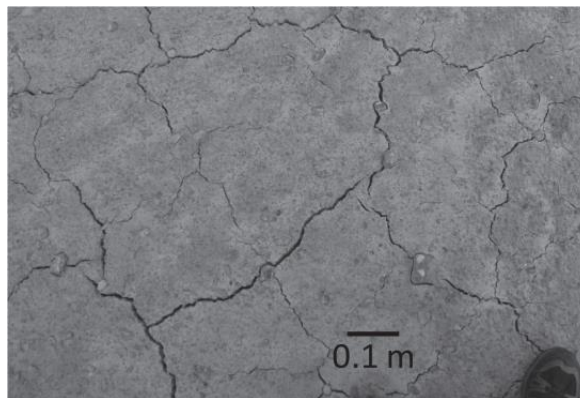


Figure II. 7: Dessiccation de barrières d'argile compactées (Rowe, 2018).

II.3.1.4 Effet des lixiviats en cas de défauts (influence chimique)

Les défauts dans la géo-membrane, qu'ils soient liés à la fabrication ou aux dommages mécaniques, permettent la percolation des lixiviats vers l'argile sous-jacente. Cela peut entraîner une augmentation localisée du degré de saturation, modifiant les propriétés hydrauliques et mécaniques de la barrière (Ali Ghavan et Abbas 2016).

II.3.1.5 Défauts et endommagements des dispositifs d'étanchéité composite

Les dispositifs d'étanchéité composite, combinant une géo-membrane et une couche d'argile compactée sont présentés sur la figure II.2 (et déjà cité dans le paragraphe 2.3.3), visent à garantir une étanchéité optimale des casiers de stockage. Cependant, leur mise en œuvre sur chantier engendre des écarts significatifs par rapport aux concepts théoriques, il ne sera jamais parfaitement conforme à la figure II.8.

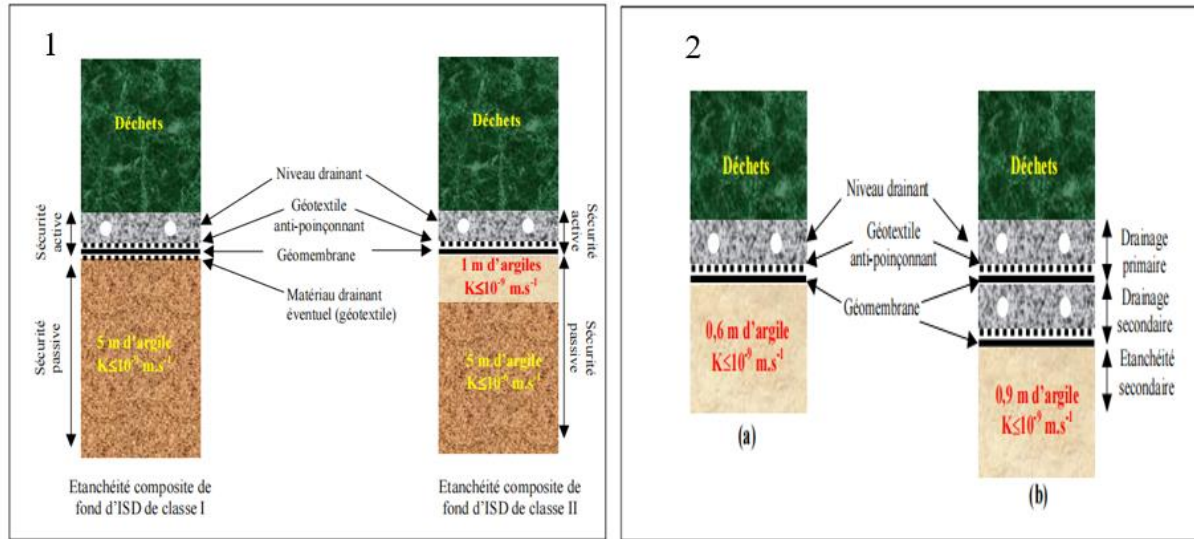


Figure II. 8: Principe d'étanchéité de fond d'un CSD selon la réglementation :(1) française (2) américaine ((a) pour les CSD de déchets ménagers et (b) pour les déchets dangereux) (Touze-Foltz, 2001).

Les principaux défauts identifiés sont les suivants :

➤ Défauts de la géomembrane

La géomembrane, bien que conçue comme une nappe continue imperméable, présente souvent des discontinuités qui permettent des transferts adjectifs entre ses faces (Touze-Foltz, 2001). Ces défauts, inévitables en chantier, peuvent provenir de la fabrication, de la pose, ou des dommages mécaniques.

➤ Non-planéité de la barrière minérale :

La surface de l'argile compactée n'est pas parfaitement plane en raison de la granulométrie et de la plasticité des sols.

Les traces des engins de compactage laissent un aspect de surface irrégulier et donne des ondulations et ornières (Figure 2.9), compromettant ainsi le contact intime avec la géomembrane (Rowe, 1998, 2018).

Des recommandations pratiques pour éviter ce type de problème sont fournies dans Benson et al. (1999)

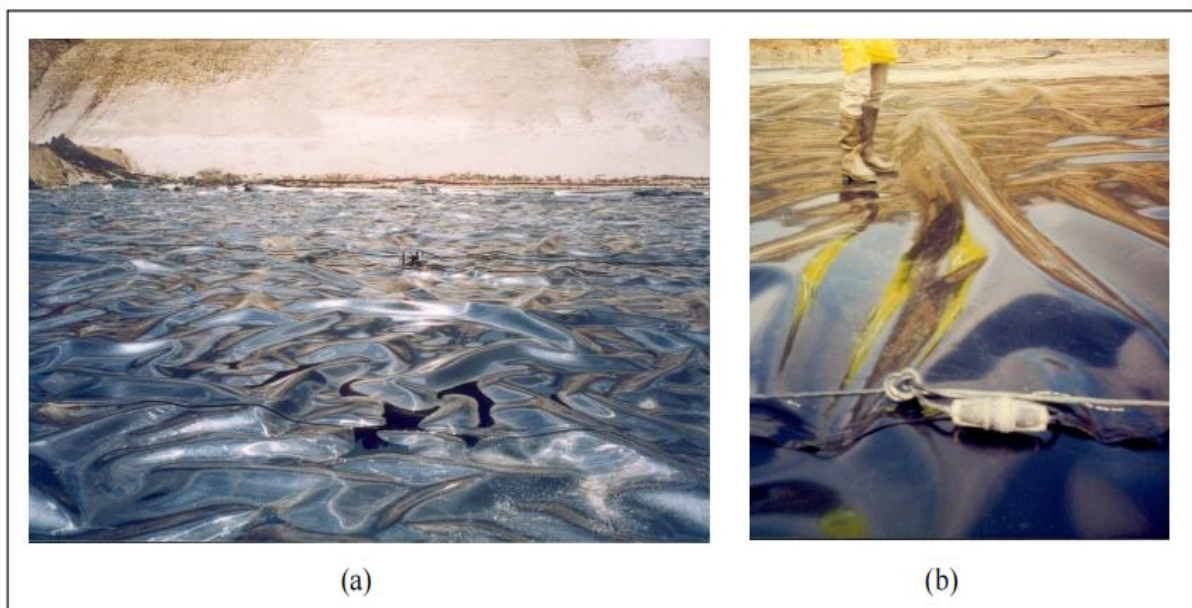


Figure II. 9: Exemple de surface de barrière minérale compactée de façon inappropriée (Cartaud. F, 2004)

➤ **Plis dans la géomembrane :**

Exposée aux rayons solaires, la géomembrane subit des dilatations thermiques entraînant des plis de dimensions significatives (voir) Figure II.10.

(Giroud and Morel, 1992 ; Pelte et al. 1994) ont mesuré des plis pouvant atteindre une largeur de 30 cm et une hauteur de 10 cm. Ces plis altèrent l'efficacité de l'étanchéité composite, transformant les deux niveaux en systèmes distincts.



**Figure II. 10: Exemple de plis affectant une géomembrane PEHD soumise aux rayons solaires
(a) plis de faible amplitude organisés de façon non-ordonnée (b) pli de grande Dimension
Cartaud. F,2004**

II.3.2 Approches de maintenance et améliorations techniques

II.3.2.1 Précautions de conception et du sol

L'expérience a montré qu'avec un sol approprié et une bonne construction (Benson et al, 1994, 1999 ; Daniel and Koerner 1995 ; Rowe et Brachman, 2004), les barrières d'argile compactées peuvent facilement atteindre la perméabilité typique de conception avec $k = 1 \times 10^{-9}$ m/s, mais beaucoup atteignent facilement $k = 5 \times 10^{-10}$ m/s et, avec $k \sim 3-5 \times 10^{-11}$ m/s après consolidation (par exemple, (Rowe et al, 1993 ; King et al, 1993 ; Rowe, 2005) dans les applications de décharge. Cependant, une bonne conception et une bonne construction sont aussi courantes. Aujourd'hui, les ingénieurs travaillant sur le terrain sont pleinement conscients de ce qui est nécessaire pour construire une bonne barrière d'argile compactée. La construction d'une bonne barrière d'argile compactée dépend de la nature essentielle d'une inspection continue qualifiée. Pendant sa construction, il faut prendre les précautions nécessaires dans la sélection du sol et le compactage, une barrière d'argile compactée peut également facilement avoir 1×10^{-9} m/s $< k < 1 \times 10^{-8}$ m/s.

II.3.2.2 Maintenance Préventive

La maintenance préventive repose sur des inspections régulières pour identifier les défauts potentiels dans la géomembrane et les couches d'argile. L'utilisation de capteurs pour surveiller les changements hydriques et thermiques en temps réel est essentielle pour prévenir les défaillances structurelles (Wu et al, 2024).

II.3.2.3 Utilisation de Matériaux Innovants

Des recherches récentes suggèrent que l'intégration de matériaux composites ou de géosynthétiques renforcés peut améliorer la stabilité hydraulique et mécanique des barrières passives, même dans des conditions environnementales extrêmes (Koerner et al, 2005).

II.4 Les lixiviats des déchets dangereux : définitions et caractéristiques.

Les lixiviats de décharge sont générés par le passage de l'eau (provenant des précipitations, de l'humidité contenue dans les déchets ou d'autres sources) à travers les déchets, d'eau produite par la biodégradation des déchets et d'eau inhérente aux déchets eux-mêmes (Liu et al. 2015; Wang and Qiao.2024).

En raison de la complexité des déchets solides déposés dans les décharges, les lixiviats contiennent une variété de polluants, qui peuvent être classés en macro-composants inorganiques, métaux lourds, matière organique dissoute (MOD), composés organiques xénobiotiques et micro-organismes (Zhang et al, 2013 ; Teng et al, 2021 ; Kumar; V et al, 2023; Wang and Qiao, 2024).

La composition des lixiviats dépend d'une variété de paramètres, tels que les types de déchets mis en décharge, les conditions climatiques, l'âge de la décharge et le mode d'exploitation (Chen et al, 2004 ; Dabaghian, et al 2018).

II.4.1 Définition des lixiviats des déchets dangereux

Les lixiviats issus des déchets dangereux se distinguent par leur forte concentration en substances toxiques (El Saadony et al, 2023) telles que les métaux lourds (plomb, mercure, cadmium) et les composés organiques volatils ou semi-volatils (COV et COSV).

Les lixiviats produits par les décharges de déchets dangereux sont toxiques et contiennent une forte concentration de substances très toxiques, telles que l'azote ammoniacal, les métaux lourds (plomb, mercure, cadmium), les sels inorganiques et les composés organochlorés (Gautam et al 2019; Gautam et kumer, 2021).

Exemple:

Dans les centres de stockage, les lixiviats des déchets industriels dangereux (DID) contiennent souvent des hydrocarbures, des solvants chlorés et des résidus métalliques. Ces éléments sont particulièrement préoccupants en raison de leur persistante et de leur bioaccumulation dans les écosystèmes.

II.4.2 Origine et formation des lixiviats

Les lixiviats sont générés par plusieurs processus :

- Percolation des eaux de pluie : L'eau s'infiltré dans les couches de déchets et se charge en polluants.
- Dégradation biologique : La décomposition des matières organiques, souvent dans des conditions anaérobiques, ils libèrent des composés organiques dans le lixiviat.
- Réactions chimiques : Les interactions entre les composants des déchets peuvent produire des substances solubles et toxiques.
- Migration des contaminants : Les liquides provenant de fuites ou d'infiltrations peuvent enrichir le lixiviat en polluants.

II.4.3 Caractéristiques des lixiviats des déchets dangereux

Les caractéristiques des lixiviats varient en fonction de la nature des déchets, des conditions climatiques et des processus chimiques ou biologiques.

Elles dépendent de nombreux facteurs opérationnels et environnementaux (Reinhart and Townsend, 1998) dans Teng, 2021 ; El Saadony et al, 2023), y compris les caractéristiques des déchets de base broyés, la teneur en humidité et l'âge de la décharge (Dabaghian et al, 2018) et se caractérisent souvent par une demande biologique en oxygène (DBO) faible, une demande chimique en oxygène (DCO) élevée, un $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (ammoniac) élevé, un rapport DCO/DBO5 élevé, une couleur noirâtre ou brun dense et un potentiel redox (d'oxydoréduction) élevé. La génération de lixiviats peut également être considérée comme une transformation des polluants de la phase solide à la phase liquide (Teng et al, 2021).

Cependant, certains paramètres clés permettent d'évaluer leur dangerosité.

II.4.3.1 Composition chimique

- **Matières organiques :** Mesurées en termes de demande chimique en oxygène (DCO) et demande biologique en oxygène (DBO), elles incluent des composés volatils, des hydrocarbures, et des substances réfractaires.
- **Métaux lourds :** Cadmium, plomb, cuivre, zinc, et mercure sont courants dans les lixiviats dangereux, en particulier ceux des déchets industriels.
- **Substances toxiques spécifiques :** Solvants, pesticides, PCB (polychlorobiphényles), et produits chimiques industriels.

II.4.3.2 Paramètres physiques

- **Couleur et odeur :** Les Lixiviats sont souvent de couleur foncée, associés à une odeur désagréable due à la présence d'ammoniac et de composés soufrés.
- **pH :** Le pH Varie de très acide (déchets acides) à basique, en influençant la solubilité des polluants.
- **Conductivité :** Il Indique une forte concentration en ions dissous.

II.4.3.3 Toxicité environnementale

Les lixiviats issus des déchets dangereux présentent une toxicité chronique et aiguë pour la faune et la flore aquatiques, entraînant des perturbations chimiques et biologiques dans les écosystèmes récepteurs.

II.4.4 Impact environnemental et sanitaire

Les lixiviats des déchets dangereux représentent une menace grave car ils sont à l'origine de contaminations :

- **Contamination des eaux souterraines et de surface :** Migration de polluants dans les eaux souterraines, avec dévalorisation de la ressource en eau potable ;
- **Santé humaine :** Risque de maladie grave pour l'homme, touchant directement ou indirectement l'individu (par les aliments ou l'eau) ; les cancers, troubles neurologiques ou malformations congénitales ;
- **Impact sur les sols :** La structure et la fertilité des sols dégradées par les lixiviats, avec effondrement des zones agricoles ou à usage productif.

II.4.5 Méthodes modernes de gestion des lixiviats

Des technologies avancées sont employées pour gérer les lixiviats :

- **Traitement physico-chimique :** Précipitation des métaux, coagulation-floculation, adsorption sur charbon actif.
- **Biotraitement :** Utilisation de filtres biologiques pour dégrader les composés organiques.

- Traitement par membranes : Techniques comme l'osmose inverse pour éliminer les contaminants récalcitrants et épuration via osmoses membranaires.

La gestion des lixiviats des déchets dangereux reste un défi majeur demandant des solutions intégrées et innovantes. Les strictes exigences réglementaires devant s'attacher à recourir à des technologies de traitement efficaces sont indispensables pour limiter leur impact sur l'environnement et la santé humaine.

II.5 État de l'art sur les écoulements des lixiviats dans les argiles et les barrières passives à base d'argile

Comprendre et prévenir la contamination des sols et des nappes phréatiques nécessite une étude approfondie des écoulements des lixiviats à travers les argiles. Les lixiviats, qui sont le résultat de la percolation de l'eau à travers les déchets, peuvent transporter divers polluants nocifs. Les argiles sont des barrières naturelles ou artificielles qui jouent un rôle essentiel en raison de leur faible perméabilité. Elles permettent de limiter la migration des substances polluantes.

II.5.1 Écoulement des lixiviats dans les argiles

La faible perméabilité des argiles, qui est en général inférieure à 10^{-9} m/s, fait d'elles un matériau idéal pour freiner l'infiltration des lixiviats, qui sont souvent chargés en composés organiques et métaux lourds. Cette faible conductivité hydraulique a pour effet de limiter la propagation des contaminants dans les sols et les eaux souterraines (Mitchell et Soga, 2005).

Cependant, il a été montré par des recherches que des modifications chimiques et minéralogiques peuvent être induites par l'interaction prolongée entre les lixiviats et les argiles. Par exemple, la structure des feuillets argileux peut être altérée par l'adsorption des ions présents dans les lixiviats, réduisant ainsi leur capacité de rétention et pouvant augmenter la perméabilité du matériau (Shackelford, 1994 ; Shackelford et al, 2000 ; Rowe, 2013).

II.5.2 Les écoulements des lixiviats dans les barrières passives à base d'argile

Les barrières passives à base d'argile jouent un rôle crucial dans la gestion des lixiviats générés par les centres de stockage de déchets, en limitant la migration des contaminants vers l'environnement. Notre état de l'art examine les propriétés des argiles, les mécanismes d'écoulement des lixiviats et les interactions chimiques, en mettant en avant des recherches récentes dans ce domaine.

II.5.2.1 Propriétés des argiles utilisées dans les barrières passives

Les argiles sont largement utilisées dans les barrières passives en raison de leurs caractéristiques suivantes comme on a cité avant :

- Faible perméabilité : La conductivité hydraulique des argiles compactées est généralement inférieure à 10^{-9} m/s, ce qui les rend efficaces pour restreindre le flux des lixiviats (Booker et al, 2004).
- Aptitude à l'adsorption : les argiles, en particulier les bentonites sont capables d'adsorber les cations métalliques (les métaux lourds) et les molécules organiques, diminuant la mobilité des polluants tels que (les attaques chimiques des lixiviats) (Meer et Benson, 2007 ; Scalia et Benson, 2010).
- Compatibilité chimique : les argiles compactées gardent leurs propriétés hydrauliques même en contact avec des lixiviats chimiques variés, néanmoins cela dépend de la nature des lixiviats et de l'argile (Shackelford, 1994 ; Shackelford et al, 2000).

II.5.2.2 Mécanismes d'écoulement des lixiviats dans les argiles

Les mécanismes de transport des lixiviats à travers une barrière passive argileuse se caractérisent par :

- Une percolation lente : le flux des lixiviats se voit réduit à cause de la faible perméabilité des argiles compactées, limitant ainsi leur dispersion dans l'environnement (Bouazza, 2002; Bouazza et Bowders, 2010).
- La migration des contaminants : la lutte contre la migration des polluants est assurée par les interactions physico-chimiques (échange ionique, adsorption...) entre polluant et argile, même si, dans des cas particuliers, l'existence de gradient fort peut amener quelquefois à une migration plus rapide qu'escompté (Jo et al, 2005).
- Une désaturation partielle : Certaines argiles compactées peuvent subir des cycles alternés de séchage et de réhydratation (Benson et al. 1994) qui risquent d'affecter leur structure et par conséquent augmenter leur perméabilité (Benson et al, 1994).

II.5.2.3 Interactions chimiques entre lixiviats et argiles

Les relations chimiques entre les lixiviats et les argiles sont complexes. Les processus de dissolution, de précipitation, d'échange ionique peuvent modifier la structure et les propriétés des matériaux argileux.

Ainsi, une étude a été réalisée sur des barrières passives dans des climats humides a montré que la perméabilité des argiles compactées est influencée par des variations dans les lixiviats lorsque des changements de pH sont réalisés (Jo et al, 2005).

Dans les climats arides, où l'accumulation d'eau est moins problématique, les barrières recouvertes de membranes en polyéthylène haute densité (PEHD) sont souvent préférées pour compléter les couches d'argile (Bouazza, 2002 ; Bouazza et Bowders, 2010 ; Liu et al, 2015).

Ces interactions entre les lixiviats et les argiles peuvent altérer les propriétés des barrières passives par :

Altération chimique : Les lixiviats acides ou alcalins peuvent provoquer des modifications minéralogiques des argiles, entraînant une dégradation de leur capacité à retenir les contaminants (Sun et al, 2024).

- Effets des métaux lourds : Les métaux lourds des lixiviats tels que le plomb et le cadmium peuvent être adsorbés par les argiles. Mais leur accumulation au fil du temps finit par saturer les sites d'adsorption et accroître leur migration (Gates et al, 2009).
- Solubilité des polluants organiques : Les lixiviats contenant des composés organiques hydrophobes peuvent interagir avec les argiles en modifiant leur surface, ce qui peut influencer la solubilité et le transport des polluants (Sharma et Lewis, 1994).

II.5.3 Développements récents et innovations

Des recherches récentes se concentrent sur l'amélioration des performances des barrières passives :

- Matériaux hybrides : L'incorporation de géosynthétiques avec des argiles compactées, comme les géomembranes, améliore l'étanchéité des barrières et leur résistance chimique (Rowe et al, 2013).
- Modification des argiles : Le traitement des argiles avec des polymères ou des agents chimiques peut renforcer leur capacité d'adsorption et réduire leur perméabilité (Khan et al, 2020; Ismadji et al, 2015).
- Barrières réactives : L'utilisation de matériaux réactifs, comme les argiles enrichies en zéolithes, permet de piéger et de neutraliser les polluants avant leur migration (Park et al, 2021).

II.6 Conclusion

Une vue globale sur les Centres de Stockage des Déchets (principe de confinement et contexte réglementaire) a été présentée dans ce chapitre en déterminant la barrière de sécurité passive naturel et artificielle d'où les travaux récents portent sur les types de ces barrières. La plupart de ces études ont utilisé des barrières de sécurité passive artificielle (matériaux rapportée) surtout lorsque les formations géologiques du site ne peuvent pas répondre aux objectifs de la perméabilité, et toujours dans le cadre d'une stratégie économique durable.

Les barrières passives à base d'argile constituent une solution efficace pour limiter les écoulements des lixiviats et prévenir la pollution environnementale. Cependant, leurs performances dépendent des propriétés des argiles, de la composition des lixiviats et des conditions d'exploitation.

L'objectif de notre recherche est de valoriser les argiles de la région d'Adrar, en explorant la possibilité de les utiliser en tant qu'une barrière de sécurité passive dans les Centres de Stockage des Déchets spéciaux et spéciaux dangereux.

Le chapitre suivant traitera, les différentes approches de la région d'Adrar, la climatologie et la géologie, les particularités de cette zone aride, par la suite on situera les gisements étudiés, la localisation de la chaux utilisée et les différents prélèvements des argiles utilisées, suivie par une étude expérimentale.

Chapitre III :

Identification des matériaux et méthodologie

Chapitre III: Identification des matériaux et méthodologie

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'identification et la caractérisation des gisements situés dans la région d'Adrar. Ce chapitre présente les propriétés physico-chimiques, mécaniques et minéralogiques des trois types de sols à examiner (Argile Adrar, Timimoun et Bouda) collectés à divers endroits dans la région d'Adrar. Ces paramètres faciliteraient la reconnaissance de la valorisation d'une argile dans la construction d'une barrière passive dans un Centre de Stockage des Déchets dangereux (CSD).

La première partie de ce chapitre est consacrée géolocalisation des sites de prélèvement des sols étudiés. La seconde étape implique l'attribution de l'identification minéralogique et physico-chimique de ces sols. La caractérisation chimique inclut l'analyse minéralogique, DRX, MEB, la concentration en carbonate de calcium, le pH ainsi que la teneur en matière organique (MO). Les tests physiques incluent l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, l'activité des argiles et la détermination de la surface spécifique. Ensuite, nous concluons avec la classification des sols basée sur le guide technique (USCS). La troisième partie se concentre sur la caractérisation mécanique, incluant l'essai Proctor, l'essai œdométrique et l'essai de résistance au cisaillement. Pour conclure, nous faisons un récapitulatif des divers résultats par une synthèse.

III.2 Géolocalisation des sites d'étude

III.2.1 Site de prélèvement

III.2.1.1 Situation géographique de la région d'Adrar

La Wilaya d'Adrar, située dans le Sahara central au sud-ouest de l'Algérie (fig III.1), s'étend sur une superficie de 427.971 km², soit près de 20 % du territoire national (Dubost, 2002).. Elle se trouve à environ 1.543 km d'Alger (la capitale), à une altitude de 279 m. La wilaya est composée de 28 communes réparties en 11 daïras. Géographiquement, elle se divise en quatre zones principales : le Gourara (Son centre administratif est de Timimoun), le Touat (Elle se prolonge du Brinkane (Tsabit) jusqu'à la daïra de Reggane ; c'est la plus vaste des régions), le Tidikelt (Cette région se prolonge d'Aoulef à Ain Saleh), et le Tanezrouft (qui signifie « désert » en tamazight) la région de de Bordj Badji Mokhtar). Le Touat, souvent appelé la "rue des palmiers", prolonge la vallée de la Saoura et s'étire sur environ 220 km de Tsabit à Reggane.

Le travail s'est concentré dans la ville d'Adrar, la plus grande du Touat, délimitée par le Gourara et le Grand Erg occidental au nord, le Tanezrouft au sud, le plateau de Tademaït à l'est, et l'Erg Chech à l'ouest. (Suivant l'ancien découpage) (Dubost, 2002).

Suivant le nouveau découpage (photo 2 de la figure III.1), elle est délimitée géographiquement comme suit (Figure III.1) : Au Nord, par les wilayas de Timimoun.

A l'Ouest, par la wilaya de Béni Abbès et Tindouf.

A l'Est, par la wilaya de In Salah et Tamanrasset.

Au Sud, par la Mauritanie et de Bordj Badji Mokhtar et le Mali.

La wilaya comprend 16 communes et comptait une population de 432 000 habitants selon le recensement de 2024.

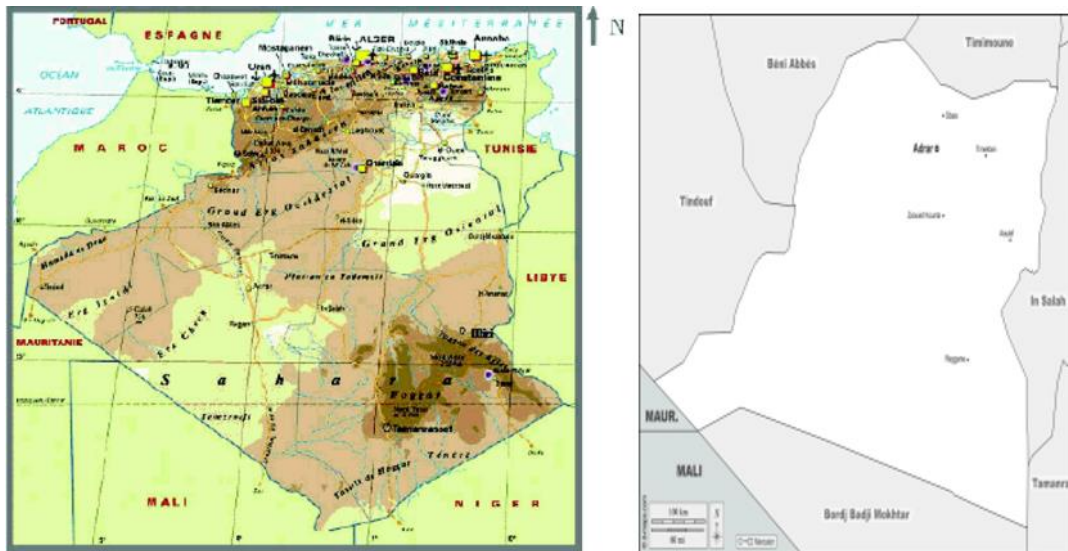


Figure III. 1: Situation géographique de la région d'Adrar

Notre étude s'est déroulée dans la ville d'Adrar (figure III.2), la plus importante de la région du Touat. Elle est délimitée par le Gourara et le Grand Erg occidental au nord, le plateau de Tanezrouft au sud, le plateau de Tademaït à l'est, et l'Erg Chech à l'ouest.

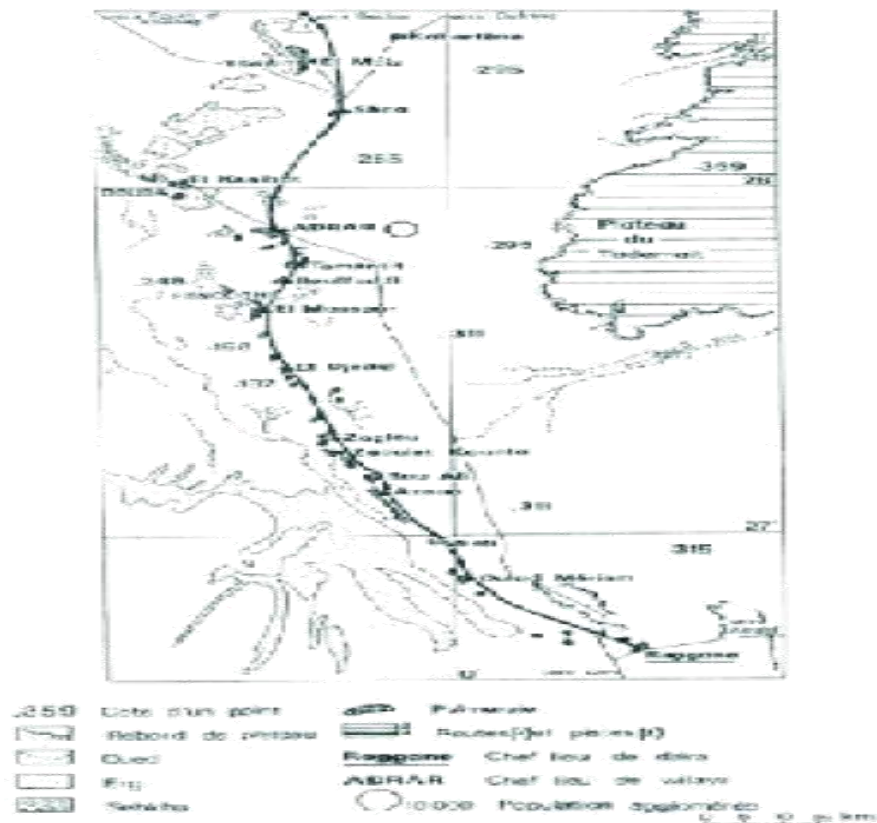


Figure III. 2: Carte de la région de Touat (Dubost, 2002)

III.2.1.2 Contexte géologique

La région locale est localisée dans le crétacé inférieur communément appelé « continentale intercalaire », il est constitué de grès fins faiblement cimentés et d'argiles. La formation Cambrien est représentée par des grès à galets, des quartzites ferrugineuses et des schistes gréso-argileux, et localement des terrains de faible puissance de sables et d'anhydrite) (Selon la direction des mines d'Adrar, et Figure III.3).

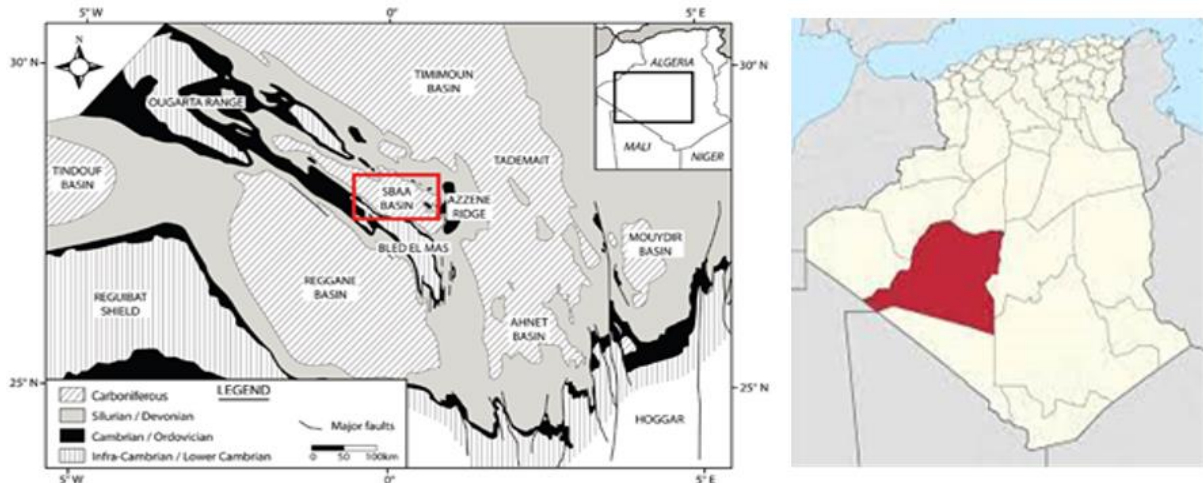


Figure III. 3: Carte géologique du sous-affleurement de l'Algérie d'après WEC Algérie 1996 (Schlumberger / Sonatrach). (Tournier et al. 2010).

Au Sahara, la formation des sols est principalement influencée par le vent et les fortes variations thermiques quotidiennes. L'eau joue un rôle secondaire, agissant surtout par ruissellement et évaporation, tandis que le lessivage, courant en climat humide, est quasiment absent en milieu aride. Toutefois, des paléosols témoignent de conditions climatiques plus humides ayant existé dans le passé (Dutil, 1971).

Les sols d'Adrar sont majoritairement squelettiques, à dominance de particules grossières et faible teneur en argile. Ils sont principalement sablonneux à sablo-limoneux, pauvres en matière organique, faciles à travailler, avec un pH neutre à légèrement alcalin et une salinité variable. On trouve aussi des sols limono-argileux dans les lits d'oueds, ainsi que des sols de regs à croûtes gypso-salines. En raison de la salinité élevée de certaines terres, les cultures sont essentiellement halotolérantes, comme le palmier-dattier, l'ail et l'oignon (tableau III.1).

Tableau III. 1: Caractéristiques des sols de la région d'Adrar

Type de sol	Texture / Composition	Propriétés
Sols squelettiques	Faible en argile, riche en fraction grossière	Peu fertiles, pauvres en MO, faciles à travailler
Sols sablonneux / sablo-limoneux	Texture grossière, particulière	Profonds, neutres à légèrement alcalins, salinité variable
Sols limono-argileux / alluvionnaires	Argile + calcaire (lits d'oueds)	Plus fins, localisés, mieux structurés
Sols de regs à croûtes gypso-salines	Riche en gypse et sels	Très salés, contraignants pour la culture

III.2.1.3 Hydrologie

La région d'Adrar est alimentée par deux principales nappes phréatiques : le Continental intercalaire (Albien figure introduction générale) et le Complexe terminal. La nappe du Continental intercalaire, importante sur les plans qualitatif et quantitatif, est alimentée par les ruissellements des oueds provenant du plateau de Tademaït. Elle circule vers le sud et le sud-ouest à travers des formations sablo-gréseuses et argilo-gréseuses reposant sur des schistes primaires. Quant à la nappe des foggaras, elle reçoit ses eaux des oueds de l'Atlas saharien et du piémont, traverse l'erg occidental et rejoint la nappe du Continental intercalaire. Elle est exploitée à l'aide de foggaras et de puits (Dubost, 2002).

III.2.2 Caractéristiques climatiques de la région d'étude, Adrar

III.2.2.1 Températures

Adrar connaît des variations extrêmes tout au long de l'année. En hiver (décembre à février), les températures nocturnes peuvent descendre sous les 4 °C, tandis qu'en été (juillet-août), elles atteignent jusqu'à 45 °C la nuit et 55 °C le jour, plaçant Adrar parmi les villes les plus chaudes au monde (Bassoud, 2022).

III.2.2.2 Humidité

L'humidité relative est très faible, ne dépassant généralement pas 25 %. Elle tombe à moins de 5 % le jour entre mars et octobre. En hiver, elle peut atteindre 50 % la nuit. Dans les oasis, l'irrigation améliore localement l'humidité.

III.2.2.3 Vents

Les vents dominants viennent du nord et nord-est, particulièrement forts de janvier à avril. D'est, ils s'intensifient de juin à septembre, tandis que les vents du sud-ouest soufflent entre mars et mai. Le Sirocco, chargé de sable, peut atteindre 100 km/h (Guyot, 1999).

III.2.2.4 Précipitations

Très faibles, avec un taux annuel moyen de 12 mm. Les rares pluies surviennent entre octobre et février, surtout en décembre, parfois sous forme d'averses orageuses rapidement évaporées. (Zami and Angela, 2010).

III.2.3 Localisation des gisements

Dans nos travaux de recherche, nous allons caractériser trois types d'argile se trouvant à Adrar dans un rayon de 200 Km. Deux gisements d'argiles seront proches des CSD déjà construits à savoir : Un CSD localisé à Timimoun, le second dans la commune d'Adrar (Bouda).

Le premier échantillon (AA) est connu sous le nom argile d'Adrar, il provient d'un gisement se trouvant à quelques kilomètres au nord de la ville d'Adrar (partie Est de la RN6). Il a été prélevé à une profondeur de 5 à 10 m (photo AA de la figure III.4) ; ce matériau a une

couleur rouge et sert à alimenter la briqueterie d'Adrar. Le deuxième échantillon (AB) est nommé argile de Bouda, il se situe au nord de la ville d'Adrar, il est prélevé à une profondeur de 2 à 3 m (photo AT de la figure III.4), et enfin le troisième échantillon (AT) est nommé argile de Timimoune, il se situe à l'ouest de la ville Timimoun, il est prélevé à une profondeur de 0,5 à 1 m (photo AT de la figure III.4). D'après le code de « MUNSELL (Soil color charts, revised edition 1994 », l'argile d'Adrar est classée entre 10R 4/6 et 10R 4/8, tandis que l'argile de Bouda est classée entre 10R 6/4 et 10R 6/6 et l'argile de Timimoun est classée entre 2.5YR 5/8 et 2.5YR 4/8. La figure III.4 présente les photos et également une vue de satellite des gisements étudiés.

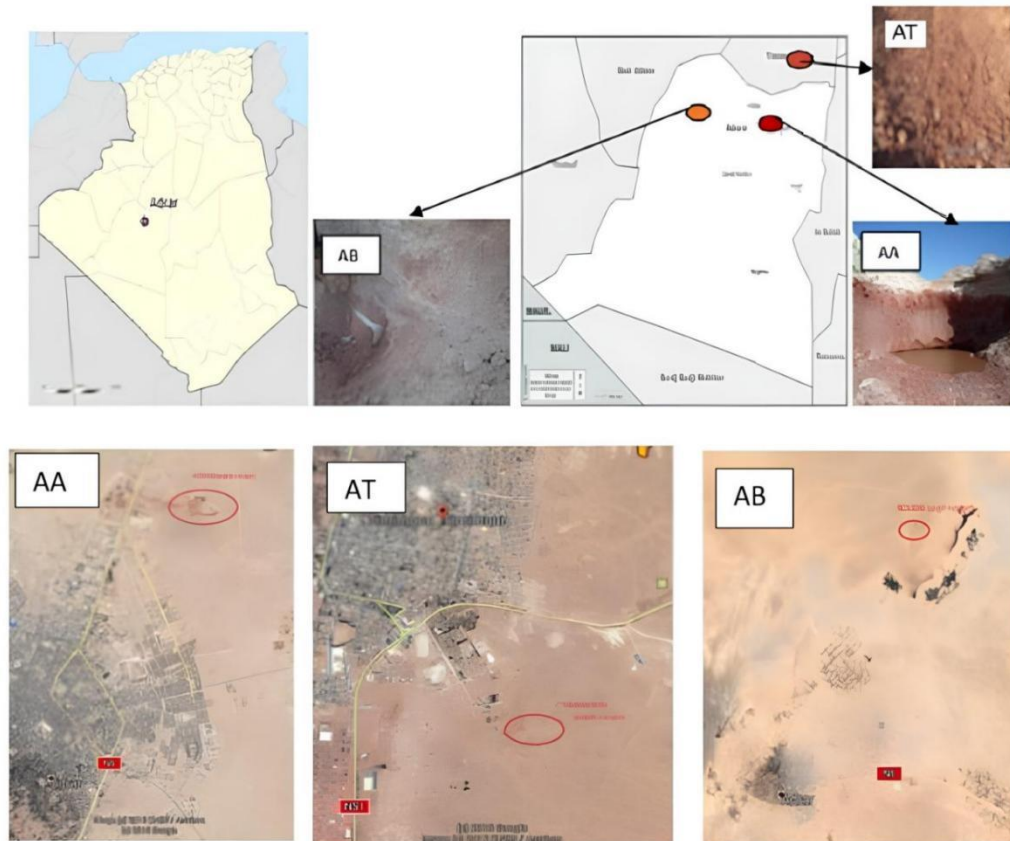


Figure III. 4: Localisation des sites étudiés : de Timimoun (AT) d'Adrar (AA), Ouayena Bouda (AB)

III.3 Identification des sols étudiés

III.3.1 Caractéristiques chimiques

III.3.1.1 Composition minéralogique par diffraction aux rayons X (DRX)

Le diffractomètre à rayons X a été utilisé dans cette étude pour déterminer les différentes proportions des minéraux qui composent nos sols (voir Figure III.5). Les essais ont été effectués au laboratoire de département SM d'Adrar (réf : Proto AXRD benchtop powder diffraction system).



Figure III. 5: Schéma du mode opératoire et de l'appareillage de rayons X à réflexion des trois argiles, (laboratoire SM, université d'Adrar)

Les diffractogrammes (Figure III.6) révèlent que le sol AA présente un mélange significatif de muscovite/illite ($\text{KA13 SiO}_2(\text{OH})$), ainsi que du quartz (SiO_2 -illite) et de la kaolinite, avec la présence de fer (goethite FeO_2 , hématite Fe_3O_2 et magnétite Fe_3O_4).

En revanche, le sol AB présente un mélange de quartz (SiO_2), de phengite (Ph), de saphirine, ainsi que quelques traces de magnétite (Fe_3O_4). Enfin, la chaux est constituée d'un mélange de chaux, de portlandite et de calcite. Le sol AT présente un mélange de quartz (SiO_2), illite et aussi qu'hématite Dolomite.

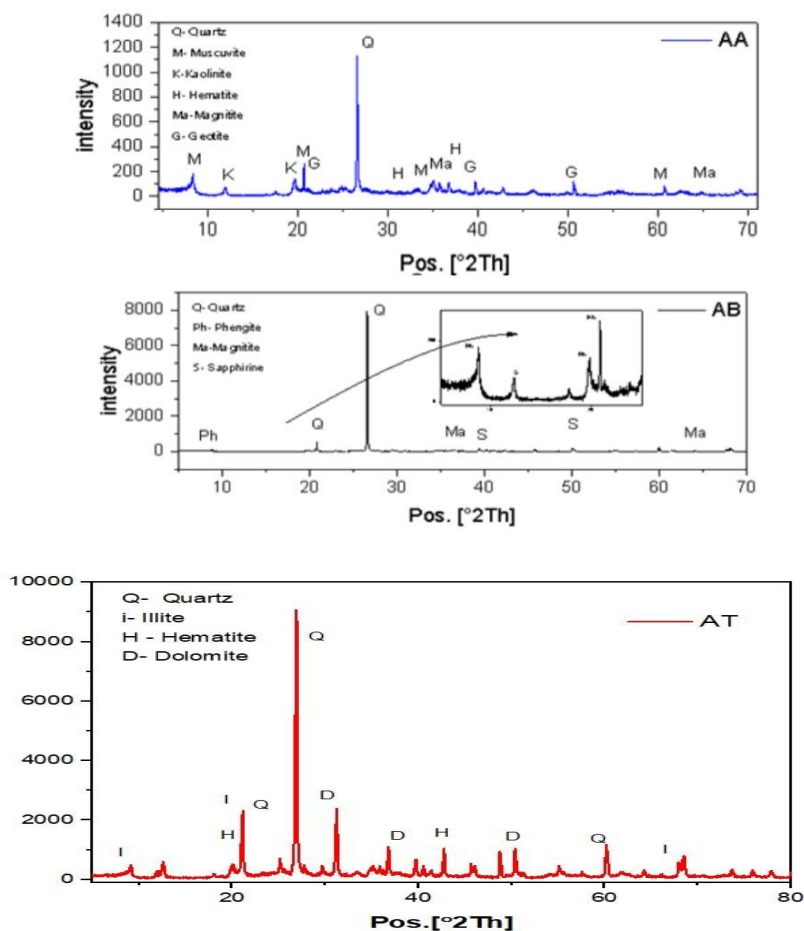


Figure III. 6: Analyse minéralogique des matériaux utilisés.

III.3.1.2 Microscope électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (SEM) permet d'observer la texture des échantillons d'argile et de caractériser les assemblages minéralogiques. Les images SEM des trois échantillons, AA (a), AB (b) et AT(c), sont présentées dans la Figure III.7. Les particules argileuses apparaissent sous forme d'amas d'agrégats fins et de plaquettes en forme de bâtonnets aux contours irréguliers. Cette morphologie est également caractéristique des illites/muscovite.

Les images des Figures III.7(a), III.7(b) et III.7(c) confirment les résultats obtenus par diffraction des rayons X (XRD), révélant la présence de carbonates dans l'argile AB et de fer dans l'argile AA. Les carbonates (calcite CaCO_3) se présentent sous forme d'agrégats bien visibles, tout comme le fer. Par ailleurs, le quartz (SiO_2) est présent sous forme de grains de petite taille.

Le spectre EDX des Figures III.7(d), III.7(e) et III.7(f) met en évidence, pour les trois types d'argile, la présence des principaux constituants argileux tels que le silicium et l'aluminium, avec une quantité constante de potassium. L'argile (AA) contient également une quantité importante de fer, tandis que l'argile (AB) présente quelques traces de fer, de magnésium et de calcium, enfin l'argile de (AT) en plus de ces deux derniers, il existe aussi le Clore, Potassium et Titane.

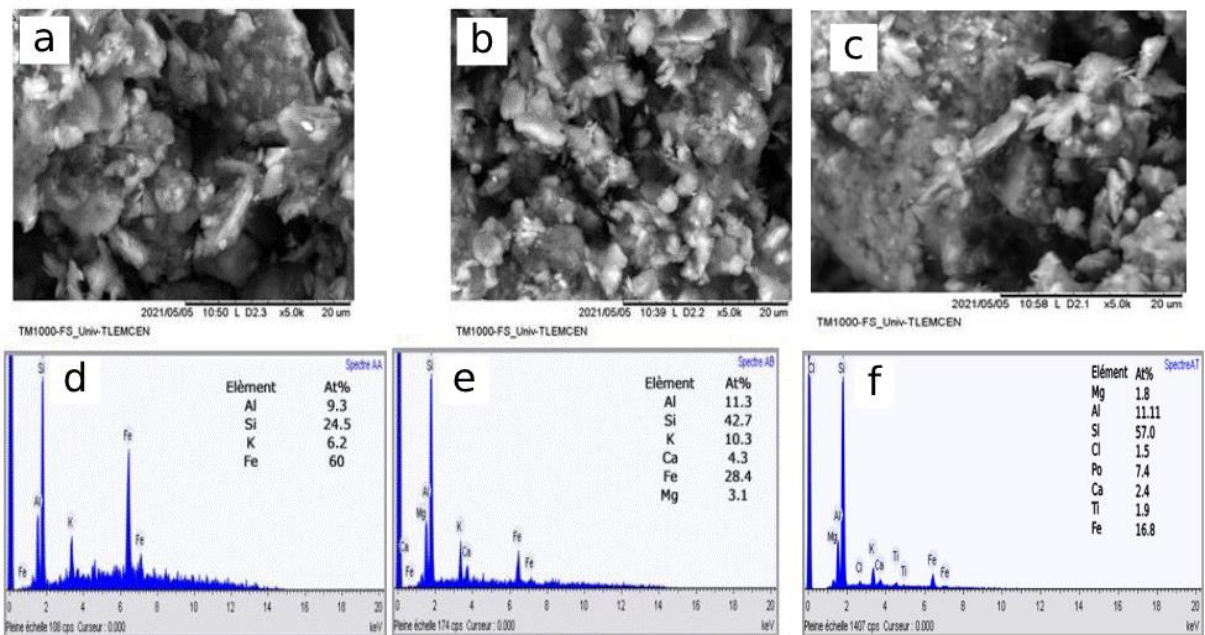


Figure III. 7: Photographies au microscope électronique à balayage et analyse EDX des argiles AA, AB et AT successivement (laboratoire chimie dép. SM, université de Tlemcen).

III.3.1.3 Composition chimique

Les analyses chimiques des 3 sols argileux ont été réalisées par fluorescence X, au niveau de Lafarge de Mascara. Les résultats sont résumés dans le tableau III.2

Tableau III. 2: Analyse chimique des trois argiles

Minéraux	AA (%)	AB	AT
SiO ₂ (%)	51,23	59,23	61,64
Al ₂ O ₃ (%)	16,89	10,46	9,96
Fe ₂ O ₃ (%)	17,45	7,99	9,28
CaO (%)	0,06	4,66	3,34
MgO (%)	0,82	0,11	0,32
SO ₃ (%)	0,04	0,13	0,08
K ₂ O (%)	4,10	3,17	2,57
Na ₂ O (%)	0,24	0,24	0,23
P ₂ O ₅ (%)	0,03	0,04	0,05
TiO ₂ (%)	1,40	1,07	1,08
Perte au feu	7,28	11,60	9,93

Les principaux constituants minéralogiques des trois sols sont la silice et l'alumine, un silicate à tendance alumineuse avec une teneur élevée en (SiO₂). Par ailleurs, la teneur en potassium (K₂O) montre l'existence d'illite dans ce sol. La faible teneur en (CaO) dans l'argile AA indique qu'elle contient un faible pourcentage de carbonate de calcium (calcite), contrairement à l'argile de Bouda AB et de Timimoun AT, où la présence de calcite (CaO) est bien remarquée.

Le rapport Alumine/Silice renseigne sur la perméabilité du matériau à l'humidité. Plus ce rapport est élevé, plus la perméabilité est grande (Jarraya et al, 2010 ; Qlihaa et al, 2016). Dans notre cas, ce rapport est faible : 0,32 pour AA ; 0,26 pour AB et 0,16 pour AT, ce qui implique que ces argiles ont une faible perméabilité.

Le rapport SiO₂/Al₂O₃ est de 3,03 pour AA ; 3,86 pour AB et 6,18 pour AT ; cette variation indique la présence de quartz libre en proportion élevée dans la fraction argileuse (Qlihaa et al, 2016 ; Besq et al, 2003). De plus, la forte teneur en oxydes (MgO, K₂O et Na₂O) par rapport aux autres oxydes suggère probablement que l'argile contient des cations échangeables tels que Mg²⁺, K⁺ ou Na⁺ (Sadki et al, 2014).

Par ailleurs, on note que le pourcentage de SiO₂ dans les trois argiles est autour de 60 %, ce qui permet de conclure que ces sols ont tendance à gonfler. En effet, les argiles non gonflantes ont une teneur en silice supérieure à 80 % (Hachichi and Fleureau, 1999). En plus de ces constituants, on observe des proportions moyennes de fer (Fe₂O₃) dans les trois argiles plus élevées pour AA, dues à la présence de goéthite, hématite et cations ferreux en substitution de l'illite (Truche, 2010). Cela explique sa grande capacité d'absorption d'eau et sa forte capacité de gonflement.

III.3.1.4 Teneur en carbonate de Calcium CaCO_3 (ASTM D4373-96)

Cet essai vise à déterminer le pourcentage de carbonate de calcium (CaCO_3) contenu dans l'échantillon.

Il consiste à mesurer le volume de dioxyde de carbone (CO_2) dégagé après réaction d'une quantité définie de matériau sec avec de l'acide chlorhydrique. Selon l'expression III.1, citée ci-dessus.

$$\text{CaCO}_3 = \frac{\text{volume du CO}_2 \text{ dégradé par 0.5 d d'échantillon}}{\text{volume du CO}_2 \text{ dégradé par 0.5 de CaCO}_3 \text{ pur}} \quad (\text{III. 1})$$

L'essai a été déterminé par le calcimètre au de laboratoire de génie civil de l'université de Tlemcen, selon la norme (ASTM D4373-96). Les résultats des essais des trois types sols sont indiqués dans le tableau III.3.

Tableau III. 3: Teneur en CaCO_3 %

Échantillon	Teneur en CaCO_3 %
Argile Adrar	3.59
Argile Timimoun	10.08
Argile Bouda	8.65

Le tableau III.4 ci-dessous, nous permet de classer le sol selon la teneur en CaCO_3 trouvé.

Tableau III. 4: Teneur en CaCO_3 de quelques sols (RE Grim, 1959).

CaCO_3 (%)	Nature du sol
0-10	Argile ou limon
10-30	Argile calcaire
30-70	Marne
70-90	Calcaire marneux
90-100	Calcaire

Selon les résultats du test de la teneur en carbonate de calcium, elle est de 3,78 % (pour AA), 10.08% (pour AT) et de 8,65 % (pour AB), ce qui indique que nous sommes en présence d'argile ou de limon pour AA et AB, et pour AT en présence d'argile calcaire selon la classification tableau III.3 de (Grim et Division, 1959).

D'autres analyses chimiques ont été effectuées au Laboratoire d'Analyses Sol et Eau Région Sud-Ouest Adrar (SERSOA).

Les résultats sont présentés dans le tableau III.5, D'après les résultats de la valeur de la matière organique (MO), on peut conclure que les trois valeurs sont très faibles ($3\% \leq$) ; ceci implique que nos sols sont inorganiques.).

Tableau III. 5: Composition chimique des argiles étudiées (laboratoire SERSOA d'Adrar).

Composé	Sulfate SO ₃	Chlorures Cl (%)	Conductivité électrique (ms/cm)	Matière organique (MO)
AA (%)	0.97	0.05	1.3	0.086
AT (%)	1.37	0.23	11.76	0.172
AB (%)	1.01	0.02	3.29	0.086

III.3.1.5 Détermination du pH (ASTM D 4972)

La mesure du pH des trois sols a été réalisée conformément à la norme ASTM D 4972 à l'aide d'un pH-mètre au (laboratoire de département SM, université d'Adrar).

Cette méthode consiste à préparer un mélange en diluant 20 g de sol sec dans 100 ml d'eau distillée. Le mélange est ensuite placé dans un bécher en verre et agité régulièrement. Le pH de l'argile a été mesuré immédiatement après une heure à l'aide du pH-mètre.

Les résultats sont résumés dans le tableau III.6

Tableau III. 6: pH des argiles étudiées.

Argile	Adrar	Timimoun	Bouda
pH	7,80	8,48	8.74

Un pH de 7.80 a été obtenu pour AA, indiquant que notre argile est une argile neutre légèrement basique, tandis que les deux autres argiles (AB et AT) sont basiques.

III.3.2 Caractéristiques physiques des Argiles d'Adrar

Les propriétés physiques des trois types d'argiles brutes sont présentées en vue d'évaluer leur potentiel de valorisation dans la construction de centres de stockage des déchets. Les essais réalisés sur les échantillons sont les suivants :

- ❖ Le poids spécifique des grains solides.
- ❖ Analyse granulométrique par tamisage humide et par sédimentométrie ;
- ❖ Les limites d'Atterberg ;
- ❖ Essai au bleu de méthylène.

III.3.2.1 Le poids volumique des grains solides, Norme (NF P94-054)

Le poids volumique des grains solides (γ_s) a été déterminé par l'essai au pycnomètre selon la norme (NF P94-054).

Les essais sur nos échantillons étaient réalisés au laboratoire GC d'université d'Oran ENSET par le Benzène, et les résultats sont indiqués dans le Tableau III. 7

Tableau III. 7: Résultats de l'essai du poids spécifique des grains solides des trois argiles.

Argile	Adrar	Timimoun	Bouda
γ_s (KN/m ³)	28.7	27.8	27.0

Le tableau III.8 présente les valeurs de la densité des grains solides (Gs) de certains minéraux caractéristiques, selon Withman et Lambein (in Costet et Sanglérat, 1983). À la lumière de ces données, les sols étudiés peuvent être rapprochés des familles minéralogiques de la montmorillonite, des illites et des muscovites.

Tableau III. 8: Densité des grains solides de quelques minéraux d'après Withman et Lambein, in Costet et Sanglérat, 1983.

Argile	γ_s (kN/m ³)
<u>Quartz</u>	<u>26,6</u>
K-Feldpath	25,4 à 25,7
<u>Na-Ca- Feldspath</u>	<u>26,2 à 27,6</u>
Calcite	27,2
Dolomite	28,5
Muscovite	27 à 31
<u>Chlorite</u>	<u>26,1 à 29</u>
<u>Kaolinite</u>	<u>26,1 à 26,4</u>
Illite	28,4 à 27,4
Montmorillonite	27,5 à 27,8
Attapulgate	23

III.3.2.2 L'analyse granulométrique (Norme NF P94-056)

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution dimensionnelle en poids des particules constituant un sol. Elle a été réalisée en deux étapes :

- La première a été réalisée par un tamisage humide (ou par tamisage sous eau) pour les particules de taille supérieure à 80 μ m, conformément à la norme NF P94-056.
- La seconde est la sédimentométrie, elle consiste en la distribution dimensionnelle en poids, des particules de taille inférieure à 80 μ m selon la norme (Norme NF P94-057).

La figure III.8 montre que l'argile d'Adrar présente une vitesse de décantation nettement plus lente que celle de l'argile de Timimoun, tandis que l'argile de Bouda décante rapidement. Cela indique que l'argile d'Adrar contient une proportion plus importante de particules fines par rapport aux deux autres.



Figure III. 8: Essai de sédimentométrie, (laboratoire GC, université d'Adrar).

L'analyse granulométrique des trois argiles (figure III.9) révèle qu'il s'agit des sols fins, avec plus de 50 % des particules ayant un diamètre inférieur à 80 μm . Par ailleurs, le pourcentage de fines, également appelées « colloïdes », correspondant aux particules de taille inférieure à 2 μm (0,002 mm), est estimée à 46% pour AA, 3% pour AT et de 0.8% pour

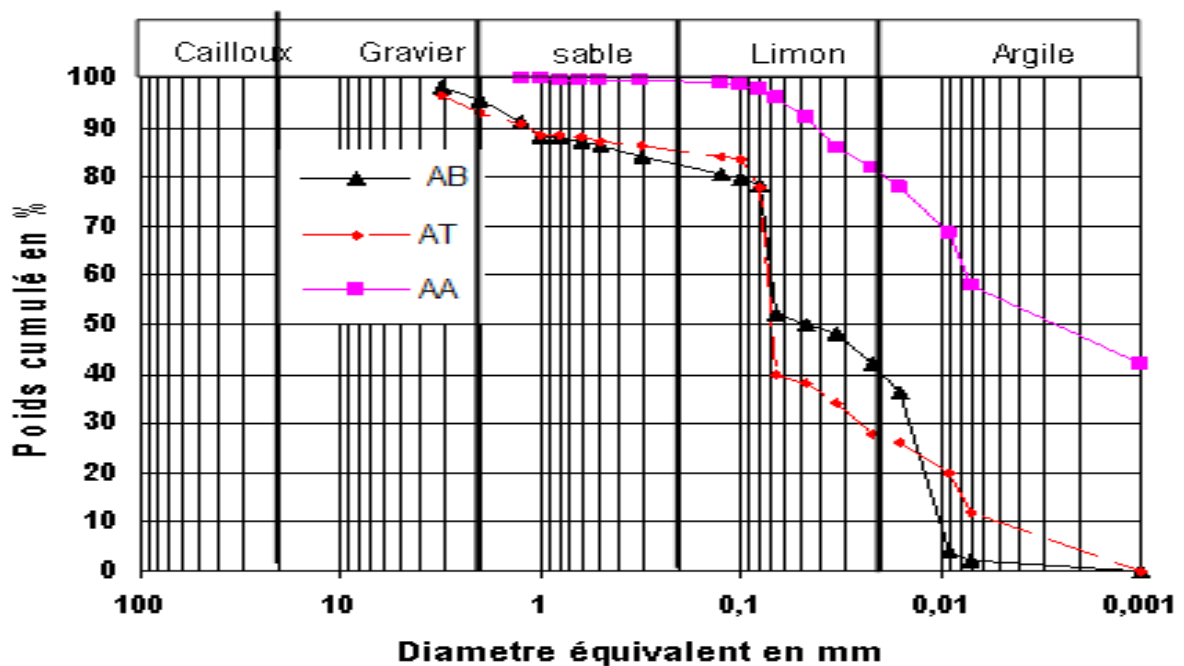


Figure III. 9: Courbes granulométriques des trois sols (Adrar Nord, de Timimoun et de Bouda).

III.3.2.3 Essai des limites d'Atterberg ou limites de consistance (NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg permettent de définir les seuils d'humidité délimitant les trois états de consistance d'un sol : liquide, plastique et solide. L'humidité du sol est exprimée par sa teneur en eau. Cet essai, réalisé sur la fraction du sol passant au tamis de 0,40 mm (400 μm), permet de déterminer la limite de liquidité (W_L) à l'aide de la méthode de Casagrande, et la

limite de plasticité (W_p) à l'aide de la méthode du rouleau. Les essais sont menés conformément à la norme NF P94-051. Les limites utilisées sont schématisées dans le figure III.10 et sont les suivant :

- Limite de liquidité (w_L) : il s'agit de la teneur en eau à laquelle un sol remanié passe d'état liquide à l'état plastique.
- Limite de plasticité (w_p) : c'est la teneur en eau à laquelle un sol remanié passe d'état plastique à l'état solide.
- Indice de plasticité (I_p) : c'est le domaine situé entre les états de liquidité et de plasticité. Il se calcule par la formule : $I_p = W_L - W_p$.

L'indice de consistance I_c est le rapport $(W_L - W) / I_p$, W étant la teneur en eau du sol à l'état naturel.

- Limite de retrait (w_R) : représente la teneur en eau à partir de laquelle le sol passe de l'état solide avec retrait à l'état solide sans retrait.

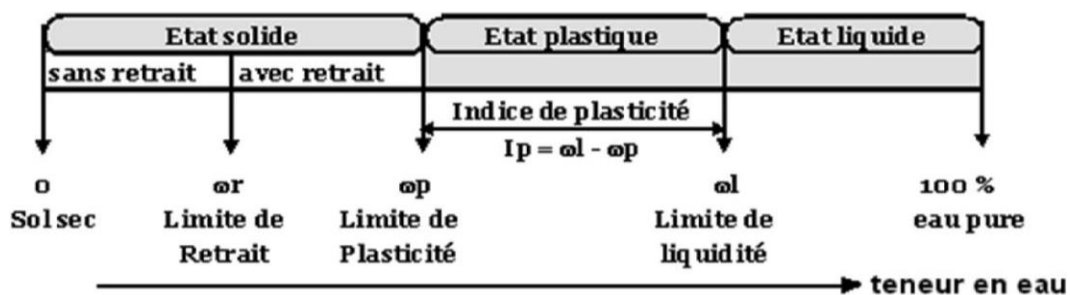


Figure III. 10: Les états de consistance.

Tableau III. 9: Etude du comportement plastique.

Indice de plasticité I_p (%)	Etat du sol
0-5	Non plastique
5-15	Peu plastique
15-40	Plastique
> 40	Très plastique

Les résultats de ces limites pour les trois sols étudiés sont indiquées dans le tableau III.10.

Tableau III. 10: Paramètres tirés des limites d'Atterberg.

Type d'argile	W_L	W_p	I_p	W_r	I_r	Classification
Argile Adrar (AA)	79	37	42	20	59	A/Très plastique
Argile Timimoun (AT)	36	11	25	12	24	A/ plastique
Argile Bouda (AB)	64	27	37	15	49	A/ Plastique

D'après le tableau III.10 et suivant la classification du tableau III.9, on peut connaître l'état de plasticité de nos argiles.

- L'argile AA a une consistance très plastique car $I_p > 40 \%$, ($I_p = 42 \%$).
- Les argiles AT et AB ont une consistance plastique car I_p est entre 15 et 40 %, ($I_p (AT) = 25 \%$ et $I_p (AB) = 37 \%$).

III.3.2.3.1 Abaque de plasticité de Casagrande :

Le degré de plasticité est mesuré par le diagramme de Casagrande établi en 1948. Il représente l'évolution de l'indice de plasticité I_p en fonction de la limite de liquidité W_L .

Il y'a lieu de reporter les résultats des limites d'Atterberg obtenues (tableau III.10 pour chaque argile et situer l'état de plasticité auquel elle est associée (figure III.11).

Nous remarquons d'après la figure III.11, que les sols AA et AB sont des argiles de consistance très plastique, par contre l'argile AT est une argile peu plastique.

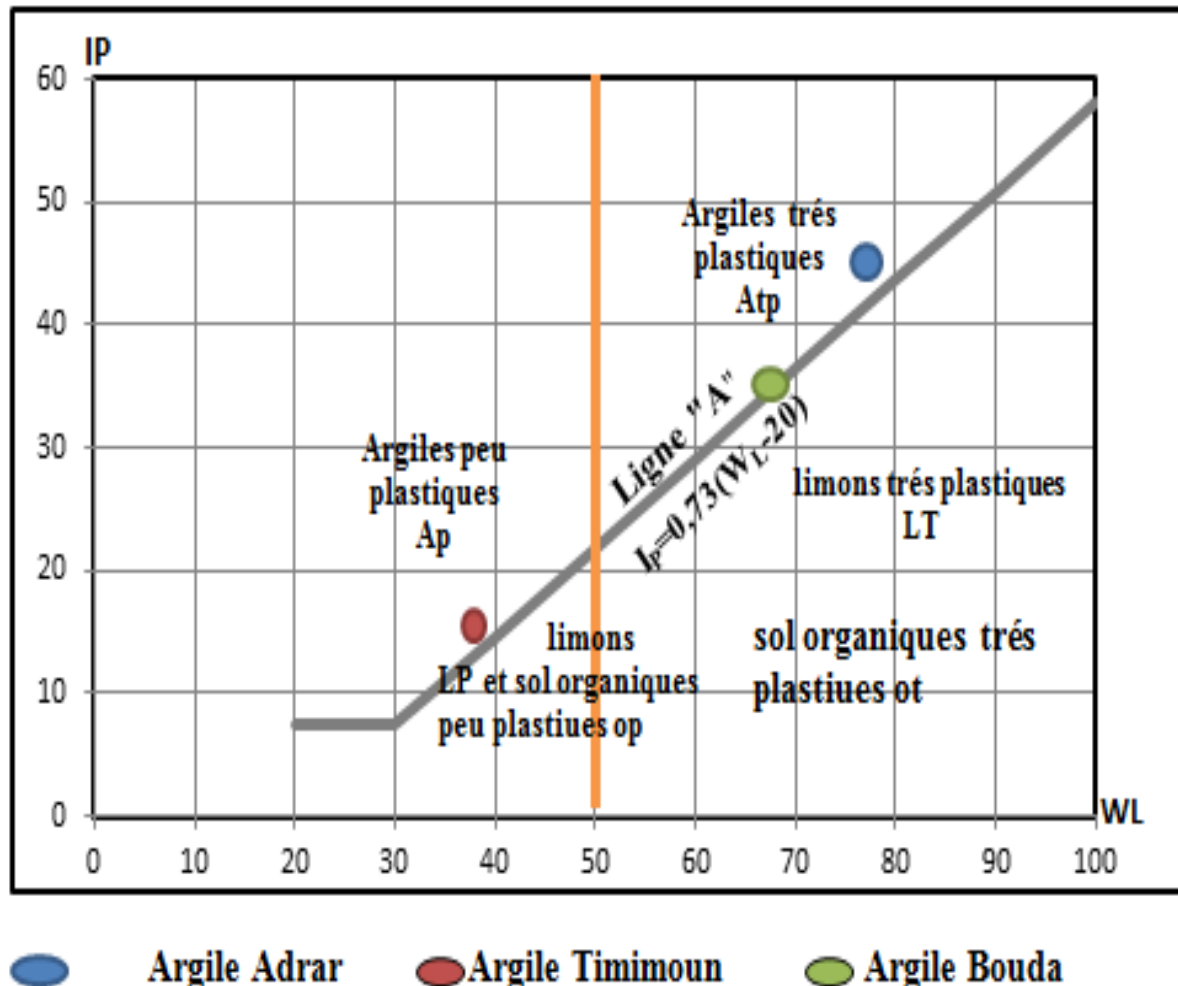


Figure III. 11: Classification des trois sols suivant l'abaque de Casagrande selon la classification L.C.P.C

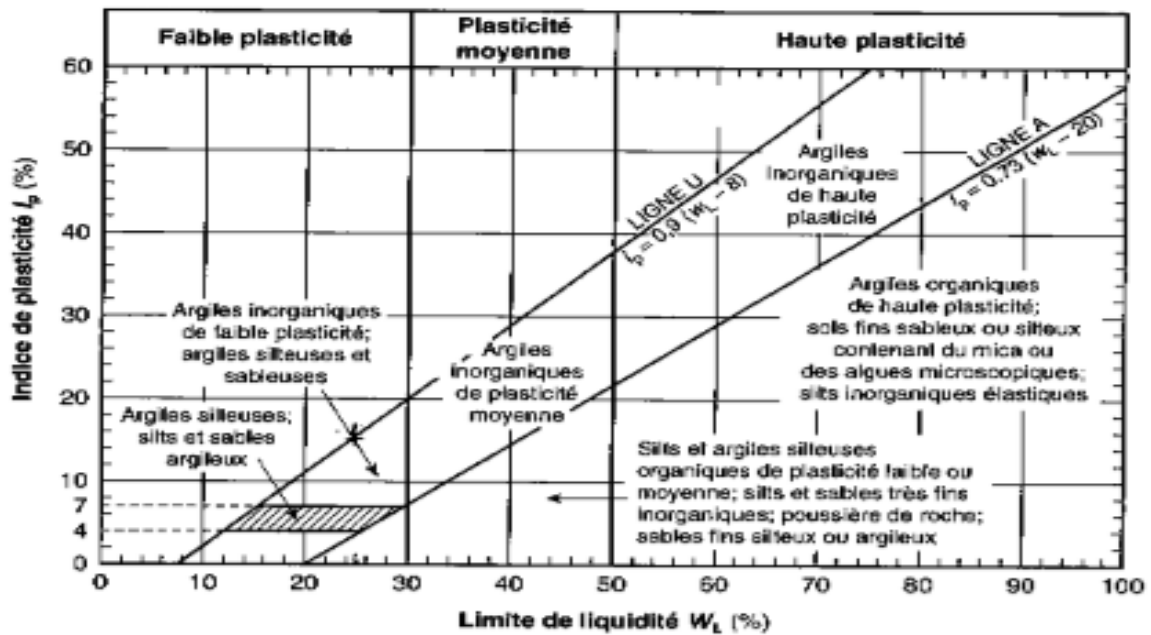


Figure III. 12: Diagramme de plasticité (d'après Casagrande, 1948 Howard, 1977).

L'analyse chimique des argiles donne une valeur de 0.086%, 0.172 et 0.086 pour AA, AT et AB de la matière organique.

Un pourcentage reste faible est conforme avec la classification de nos argiles selon l'essai des limites d'Atterberg figure III.12 qui donne une argile inorganique de haute plasticité (AA), argile inorganique de plasticité moyenne (AB) et argile inorganique de faible plasticité or argile silteuse et sableuse (AT).

III.3.2.3.2 Activités des argiles :

L'activité d'un sol est principalement déterminée par sa composition minéralogique, en particulier le type et la quantité de minéraux argileux, la teneur en argile ainsi que la nature des ions échangeables (El Sohby et al, 1986) in Ramzy, 2016.

Selon Skempton (1953), il est possible d'évaluer cette activité en combinant les limites d'Atterberg avec le pourcentage de fines argileuses, à travers un paramètre appelé « activité des argiles » noté A_c .

Ce dernier est défini comme le rapport entre l'indice de plasticité (I_p) et la teneur en particules argileuses (C_2), c'est-à-dire les particules dont la taille est inférieure à $2 \mu m$. La formule (eq.III.2) s'écrit :

$$A_c = \frac{\text{Indice de plasticité } (I_p)}{\% \text{ des éléments } < 2 \mu} \quad (\text{III. 2})$$

Skempton propose une classification des argiles selon leur activité, comme le montre le Tableau III.11.

Tableau III. 11: Classification des sols selon leurs activités (Skempton, 1953).

Activité (Ac) %	Dénomination
$0 < A_c < 0,5$	Sol inactif
$0,5 < A_c < 0,75$	Peu actif
$0,75 < A_c < 1,25$	Normal
$1,25 < A_c < 2$	Actif
$A_c > 2$	Très actif

Tableau III. 12: Activité des différents des argiles étudiées.

Type d'argile	I_p	% éléments $< 2 \mu m$	Ac %	Dénomination
AT	24,60	3	8,2	A/ très active
A A	42,26	46	0,91	A/ activité normale
A B	37,58	0.8	46.97	A/ très active

En se basant sur le tableau III.12, il est possible de connaître l'activité de nos argiles. L'argile d'Adrar a une activité normale, tandis que l'argile de Bouda et de Timimoun sont très active. On peut également connaître les natures de nos sols en connaissant leurs activités et les comparées à celles de certains minéraux donnés par le tableau III.13.

Tableau III. 13: Activité des différents minéraux (Skempton, 1953 and Mitchell, 1976 ; RD Holtz and WD Kovacs, 1981).

Minéral	Activité
Montmorillonite Na	4 – 7
Montmorillonite Ca	1,5
Illite	0,5 – 1,3
Kaolinite	0,3 – 0,5
Calcite	0,2
Quartz	0

D'après le tableau III.13, nous pouvons nous faire une idée du minéral prédominant dans la matrice argileuse. L'Illite est le minéral prédominant pour l'argile d'Adrar AA, en revanche l'argile de Timimoun et de Bouda sont proche du minéral la Montmorillonite Na (RD Holtz

and WD Kovacs, 1981). Cette approche n'est que significative et qui doit pour plus de précisions tenir compte aussi de quelques paramètres physiques et chimiques.

III.3.2.4 Essai au bleu de méthylène à la tâche (Norme NF P94-068)

L'essai au bleu de méthylène sert à mesurer les surfaces spécifiques des particules argileuses du sol. Cet essai permet donc de mesurer la capacité d'absorption en eau de la surface spécifique des argiles, plus le sol adsorbe du bleu, plus il contient des minéraux argileux actifs ayant des surfaces spécifiques internes (espace interfoliaire) et externes (espace inter-particulaire) importants (SST augmente).

- De cet essai, on doit pouvoir tirer la valeur au bleu qui est donnée par la formule suivante (eq.III.3) :

$$VBS = \frac{\text{Volume en cm}^3 \text{ de solution}}{\text{poids sec de la prise d'essai}} \quad (\text{III. 3})$$

- La surface spécifique totale SST est calculée d'après la formule de (Tran Ngoc Lan ,1977; Lan ,1981) (eq.III.4) :

$$SST = 20,93 \times Vcc \times \frac{1}{P_s} \quad (\text{III. 4})$$

D'où :

- SST : surface spécifique (m²/g) ;
- Vcc : volume de solution utilisé (cm³) ;
- Ps : poids du matériau sec (g) ; avec V_{BS}= V_{CC}/Ps;
- 20,93 est la surface qui correspond à 1 cm³ de bleu de méthylène.
- L'indice de nocivité de la fraction argileuse est définie par (eq.III.5) :

$$N = 100 VB/C_2 \quad (\text{III. 5})$$

N : Indice de nocivité de la fraction argileuse.

C₂ : terme en pourcentage des éléments < 2 µm de la fraction argileuse.

Le tableau III.14 résume les différentes valeurs qui sont impliquées par la valeur au bleu VB.

Tableau III. 14: Paramètres tirés de l'essai au bleu.

Paramètres	Argile Adrar	Argile Timimoun	Argile Bouda
Volume de solution (cm ³)	246	160	185
Valeur au bleu VBS (cm ³ /g)	8.2	5.33	6.16
Surface spécifique totale (m ² /g)	171.62	111.55	128.92
Indice de nocivité	17.82	177.67	770
CEC = (VBx1000) /374(m ² /g)	21.92	14.25	16.47

Les ordres de grandeurs des valeurs au bleu des sols d'après Philipponat sont représentés dans la Figure III.13:

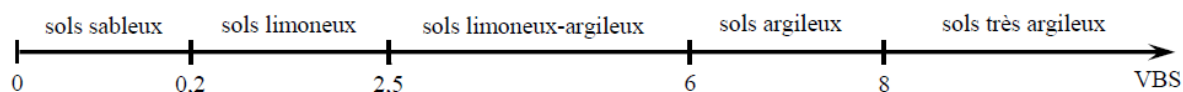


Figure III. 13: Classification des sols en fonction de VBs d'après Philipponat

D'après Philipponat, on confirme que nos sols sont fins et que l'argile Adrar est un sol très argileux, par contre l'argile de Timimoun est un sol limoneux argileux et l'argile de Bouda est un sol argileux.

D'après la classification de (RD Holtz and WD Kovacs, 1981 et Gibbs) représentée dans le tableau III.14, nos argiles peuvent être classées suivant leurs SST. On peut conclure que la surface spécifique est élevée, environ 171.62 m²/g pour AA, 128.92 m²/g pour AB et 111.55 m²/g pour AT, elle présente des minéraux proches de la montmorillonite calcique et d'Illite.

Tableau III. 15: Classification selon SST d'après Holtz and Gibbs.

Argiles	Surface spécifique (m ² /g)
Montmorillonite Ca ⁺⁺ Na ⁺	300 à 800
Illite	40 à 60
Kaolinite	5 à 20
Elément non argileux	1 à 3

C'est ce qui ressort du tableau en (III.14) et d'après (Holtz and Kovacs 1981) et (Lautrin, 1987), l'indice de nocivité. Ce tableau permet de voir que AA appartient au groupe des sols actifs, tandis que les deux autres argiles (AT et AB) sont classées comme très actifs.

Selon la fraction argileuse, la quantité de montmorillonite est très élevée (supérieure à 75 et 90% respectivement pour les sols nocifs ou très actifs). Nos argiles sont considérées comme évolutives, car elles peuvent modifier leur comportement avec des changements chimiques et/ou hydriques du milieu environnant.

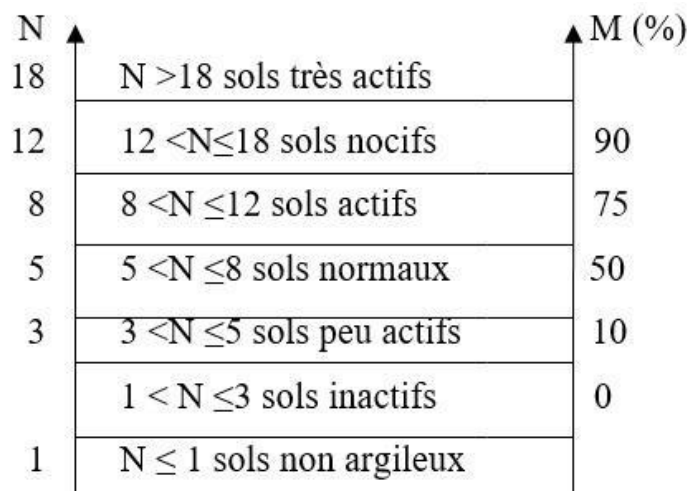


Figure III. 14: Diagramme de nocivité (Lautrin, 1987).

La méthode de VBS nous a conduit de calculer la capacité d'échange cationique des trois argiles après de faire la classification minéralogique, tel que comme Illites selon la classification de (RD Holtz and WD Kovacs, 1981 ; Bultel, 2001 ; Mitchell et Soga, 2005) $10 < \text{CEC} < 40$; nous sommes en présence de kaolinites pour l'argile AB, AT et d'Illites pour l'argile AA, selon (Truche C. 2010).

III.3.2.5 Etude du phénomène de gonflement des argiles :

Il est donné pour acquis que les argiles possèdent un pouvoir de gonflement qui se répercute sur la stabilité des constructions.

Tableau III. 16: Estimation du potentiel de gonflement (SNETHEN et al. 1977).

W_L (%)	I_p (%)	Potentiel de gonflement	Classification
< 50	< 25	< 0.5	Faible
50-60	25-35	0.5-1.5	Moyen
> 60	> 35	> 1.5	Elevé

Tableau III. 17: Estimation du potentiel de gonflement, O'NELL and POORMOAYED (1980).

W_L (%)	I_p (%)	Classification
20-49	15-24	Faible à moyen
50-70	24-46	Elevé
> 70	> 46	Très élevé

Tableau III. 18: Estimation du potentiel de gonflement selon HOLTZ et al. 1973.

I_p (%)	W_R (%)	W_L (%)	Classification
< 18	< 15	20-35	Faible
15-28	10-15	35-50	Moyen
25-41	7-12	50-70	Elevé
> 45	> 11	> 70	Très élevé

On résume dans les tableaux suivants III.19, III.20 et III.21, les valeurs trouvées des paramètres physiques de nos sols afin d'estimer le caractère de gonflement de nos deux argiles.

Tableau III. 19: Synthèse des paramètres de consistance (Argile Adrar).

I_p (%)	W_R (%)	W_L (%)	Classification du gonflement
42.26	12.9	79	Tableau III.16 : Elevé
			Tableau III.17 : Elevé à très élevé
			Tableau III.18 : Elevé à très élevé

Tableau III. 20: Synthèse des paramètres de consistance (Argile Bouda).

I_p (%)	W_R (%)	W_L (%)	Classification du gonflement
37.58	14.9	64	Tableau III. 16 : Elevé
			Tableau III. 17 : Elevé
			Tableau III. 18 : Elevé

Tableau III. 21: Synthèse des paramètres de consistance (Argile Timimoun).

I_p (%)	W_R (%)	W_L (%)	Classification du gonflement
24.6	11.78	36	Tableau III. 16 : Faible
			Tableau III. 17 : Faible à moyen
			Tableau II. 18 : Moyen

Alors, nous avons montré grâce aux tableaux III.19, III.20 et III.21 que les argiles considérées présentent un potentiel de gonflement qu'il convient d'étudier. En somme, pour ce qui est de l'argile d'Adrar, son potentiel de gonflement est élevé à très élevé ; pour l'argile de Bouda c'est élevé ; alors que pour l'argile de Timimoun il est faible à moyen.

Ensemble, il reste à étudier les paramètres de gonflement de ces argiles, à savoir : le gonflement libre, le potentiel de gonflement, la compressibilité, la consolidation, les méthodes de stabilisation et de renforcement de ces argiles.

III.3.3 Caractéristiques mécaniques

III.3.3.1 Essai de compactage Proctor modifié (Norme NF P94-093)

La capacité au compactage des argiles est déterminée grâce à l'essai Proctor modifié selon la norme NF P94-068, qui permettra le cas échéant de reproduire en laboratoire les conditions de compactage observées sur le chantier. Ce principe de cet essai consiste à réaliser le compactage du matériau, avec des teneurs en eau différentes, selon un protocole et une énergie de compactage donnés. Pour chaque teneur en eau considérée, on mesure la masse volumique humide, de laquelle on déduit la masse volumique sèche. Ces mesures permettent de retrouver les teneurs en eau optimales (W_{opt}) qui correspondent à la densité sèche maximale du sol ($\gamma_{d\ max}$). Ces deux paramètres sont essentiels dans le cadre des études de stabilisation in situ. Les résultats obtenus pour l'essai de compactage Proctor modifié pour les trois argiles sont reportés dans le tableau III.22 et présentés sur la Figure III.15.

Tableau III. 22: Résultats des paramètres de l'essai Proctor Modifié.

Type d'argile	Adrar	Timimoun	Bouda
$\gamma_{d\ max}$ (KN/m ³)	17.7	19.9	19.6
W _{opt} (%)	20.68	10.53	12.41

De la figure III.15, il est observé que la densité sèche augmente avec l'ajout d'eau jusqu'à atteindre une valeur maximale, indiquée dans le tableau III.22. Les courbes Proctor ainsi que les résultats du tableau montrent que l'argile de Timimoun présente une densité sèche maximale (γ_{dmax}) plus élevée que celle des autres argiles.

En revanche, l'argile d'Adrar nécessite une teneur en eau plus importante, en raison de sa forte proportion en particules fines (46 % d'éléments inférieurs à 2 μm). La courbe Proctor de l'argile d'Adrar présente une forme relativement aplatie par rapport à celles des argiles de Timimoun et de Bouda, ce qui est favorable à son utilisation dans une barrière passive pour un centre de stockage des déchets (CSD).

En effet, une courbe Proctor peu marquée (plate) indique une plus grande autorisation aux variations de teneur en eau lors de la mise en œuvre du matériau, qu'une courbe « pointue », ce qui constitue une particularité en termes d'ouvrabilité pour ce type d'application.

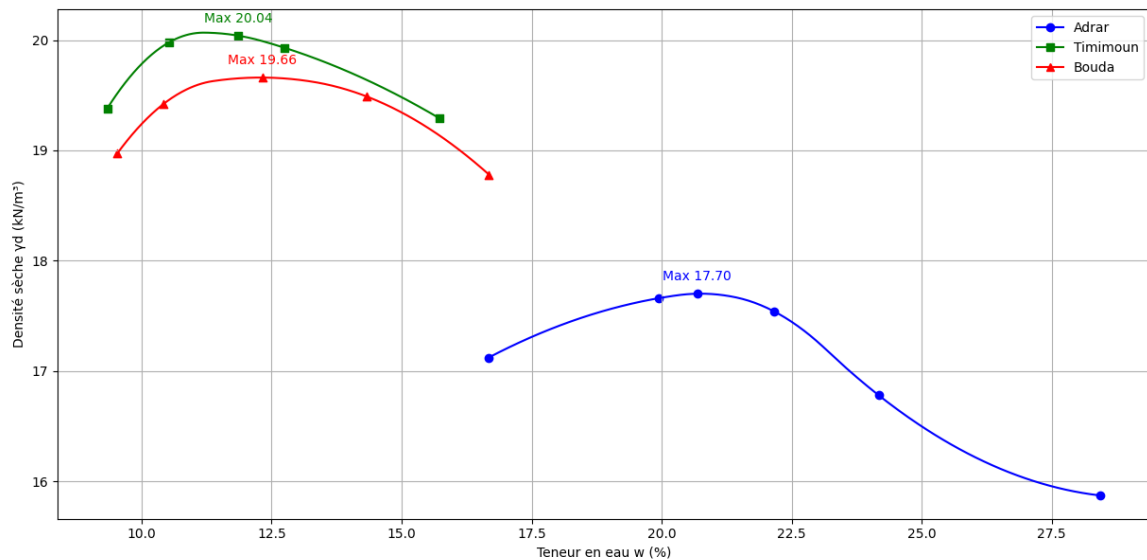


Figure III. 15: Courbe de compactage à l'OPM des trois argiles étudiées

III.3.3.2 Essai œdométrique (Norme XP P94-091)

A) Paramètres de gonflement libre

Ces sols ont été reconstitués par l'essai du compactage statique aux caractéristiques de l'optimum Proctor. Les dimensions des échantillons sont : hauteur $H = 20$ mm, diamètre $D = 50$ mm respectivement (Chen, 2012 ; Serratrice and Soye, 1996). Le compactage statique consiste à soumettre l'échantillon à une pression statique sous une vitesse lente 1mm/min, on comprime le sol dans un moule à l'aide d'une presse.

Les essais de gonflement libre sont effectués selon La NFP P94-091 dans un œdomètre classique. Tout d'abord, l'échantillon sera préparé par (broyage, tamisage et séchage) suivi d'un compactage statique aux optimums de Proctor. Le matériau à tester est placé dans un cylindre entre deux pierres, soigneusement arasé et lissé sur ses faces supérieur et inférieur, et subit une très faible charge correspondant au poids du piston. Après plusieurs jours de maintien dans ces conditions, une saturation complète ainsi qu'une stabilisation du

comportement peuvent être assurées. Le gonflement est défini élastiquement dans les conditions œdométriques, comme le rapport de l'augmentation de la hauteur de l'éprouvette sur sa hauteur initiale, le gonflement est parfois noté G (%), exprimé par la relation suivante :

$$G\% = (\Delta H/H_0 \text{ en}\%) ; \quad G : \text{variation de la hauteur de l'échantillon}$$

Avec : $\Delta H = H_f - H_0$; H_0 : hauteur initiale ; H_f : hauteur finale après stabilisation.

Les courbes présentées dans la figure III.16 illustrent la variation relative de la hauteur de gonflement libre en fonction du logarithme du temps ($\Delta H/H = f(\log(t))$) pour les différentes argiles. L'évolution du gonflement suit une tendance similaire pour l'ensemble des argiles étudiés.

Deux phases distinctes peuvent être observées : une phase de gonflement primaire, qui se manifeste rapidement après le début de l'essai et dont la fin est signalée par un point d'inflexion modifiant la pente de la courbe, suivie d'une phase de gonflement secondaire, se traduisant par une portion linéaire de la courbe (Holtz and Kovacs, 1981).

La première phase du gonflement, relativement rapide, correspond à la migration ou diffusion de l'eau dans les pores de l'échantillon (Serratrice and Soyez, 1996). Elle est liée à la dissipation de la succion dans les macropores du sol et est influencée par le gradient hydraulique, la perméabilité, la nature du matériau, son état de saturation, l'état de contrainte, ainsi que la procédure d'imbibition (unilatérale ou bilatérale). Sa durée varie de quelques heures à quelques jours. Dans notre cas pour AA jusqu'à 9 jours qu'on atteindra la stabilisation du gonflement.

La figure III.17 montre le gonflement libre du sol à l'état naturel. Une augmentation du gonflement égale à 7 mm de hauteur est enregistrée, ce qui confirme la valeur au tableau III.23 de potentiel de gonflement libre (ΔH) 7.81 mm et c'est hauteur remarquable pour le sol lui-même et en comparant aux autres sols (AB et AT).

Plusieurs méthodes existent pour évaluer la pression de gonflement dans un odomètre. Le test le plus courant est la méthode du gonflement à volume constant (ASTM, D 4546-90) que l'on peut résumer de la manière suivante : l'échantillon présentant une tendance au gonflement est maintenu sous une charge croissante dès que le déplacement du comparateur atteint 1/100 mm et la valeur de la charge à laquelle l'échantillon est stabilisé donne la pression de gonflement (Chen, 1988)

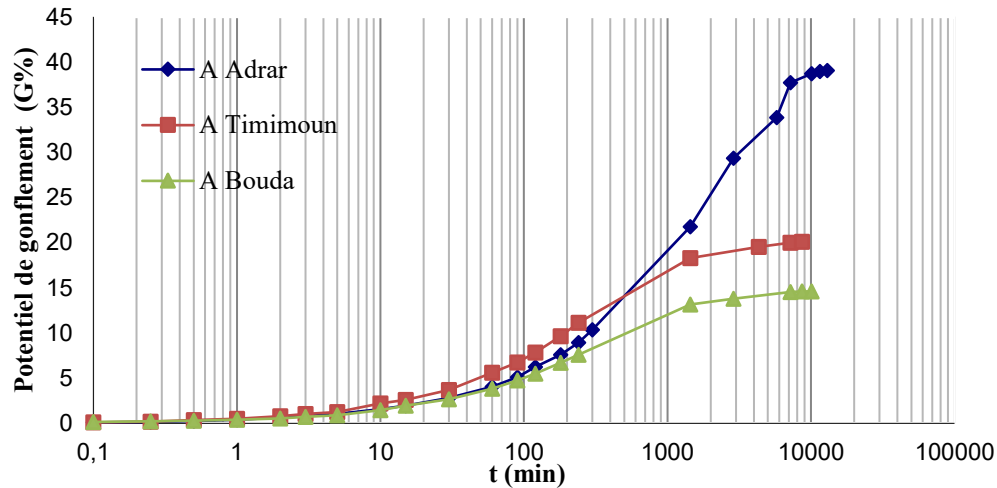


Figure III. 16: Évolution du potentiel de gonflement en fonction du temps des échantillons des trois argiles.

La pression de gonflement sera égale à la pression qui aurait remis l'échantillon à sa hauteur initiale. Pour AA présente une pression de gonflement de 127.4 kPa qui est une valeur énorme pour cette argile, et sont aussi supérieures en comparant aux autres argiles de AB et AT 7.64 kPa et 2.42 kPa.



Figure III. 17: Résultat de l'essai du potentiel de gonflement d'argile AA

Les essais de consolidation et de compressibilité sont utilisés pour analyser la déformation verticale des sols, ainsi que pour estimer les phénomènes de tassement et de gonflement au fil du temps.

Ces essais sont réalisés conformément à la norme NF P94-090-1, et consistent à étudier la réponse du matériau sous l'effet de charges mécaniques et hydriques variables. Deux courbes essentielles sont déduites de cet essai :

La courbe de consolidation, qui retrace l'évolution du tassement au cours du temps.

La courbe de compressibilité, qui traduit la variation de l'indice des vides en fonction de la contrainte effective appliquée.

À partir de la courbe de compressibilité, il est possible d'extraire les principaux paramètres caractéristiques de compressibilité du sol, notamment la contrainte effective de préconsolidation (σ'_{pc}), l'indice de compressibilité (C_c), ainsi que le coefficient de gonflement (C_s). Les valeurs de C_g et C_c sont déterminées à l'aide des équations (eq.III.6) et (eq.III.7) :

$$C_c = - \frac{\Delta e}{\Delta(\log \log \sigma)} \quad (\text{III. 6})$$

$$C_s = \frac{\Delta e}{\Delta(\log \log \sigma \sigma')} \quad (\text{III. 7})$$

À partir de la courbe de consolidation, on peut établir, pour une contrainte de chargement donnée, la relation entre le tassement (Δh) et le temps (t). Cette évolution peut être représentée graphiquement sous la forme $\Delta h = f(\log t)$ ou $\Delta h = f(\sqrt{t})$, conformément à l'équation (Éq. III.9).

$$t = \frac{T_v \times h_b^2}{C_v} \quad (\text{III. 8})$$

Avec :

t : temps de tassement (en secondes),

h_D : hauteur de drainage de la couche de sol (en mètres),

T_v : facteur temps, grandeur sans dimension.

Dans le cas d'une consolidation à 50 % selon la méthode de Casagrande, la valeur du facteur temps est $T_v = 0,197$. Le coefficient de consolidation (C_v) peut alors être déterminé à l'aide de l'équation (Éq. III.9) :

$$C_v = \frac{0,197 \times h_b^2}{4 t_{50}} \quad (\text{III. 9})$$

Pour une consolidation atteignant 90 %, conformément à la méthode de Taylor, le facteur temps prend la valeur de $T_v = 0,848$. Le coefficient de consolidation (C_v) correspondant est calculé à l'aide de l'équation (Éq. III.10) :

$$C_v = \frac{0,848 h_b^2}{t_{90}} \quad (\text{III. 10})$$

A) Paramètres de compressibilité

Les courbes de compressibilité de nos argiles sont représentées par la figure (III.18) et les résultats sont résumés dans le tableau (III.22), en présentant les paramètres de gonflement libre, les coefficients de compressibilité issues de la phase de densification et les coefficients de gonflement déterminés lors de la phase de déchargement ; ainsi les pressions de préconsolidation, les coefficients de consolidation et les indice des vides initial.

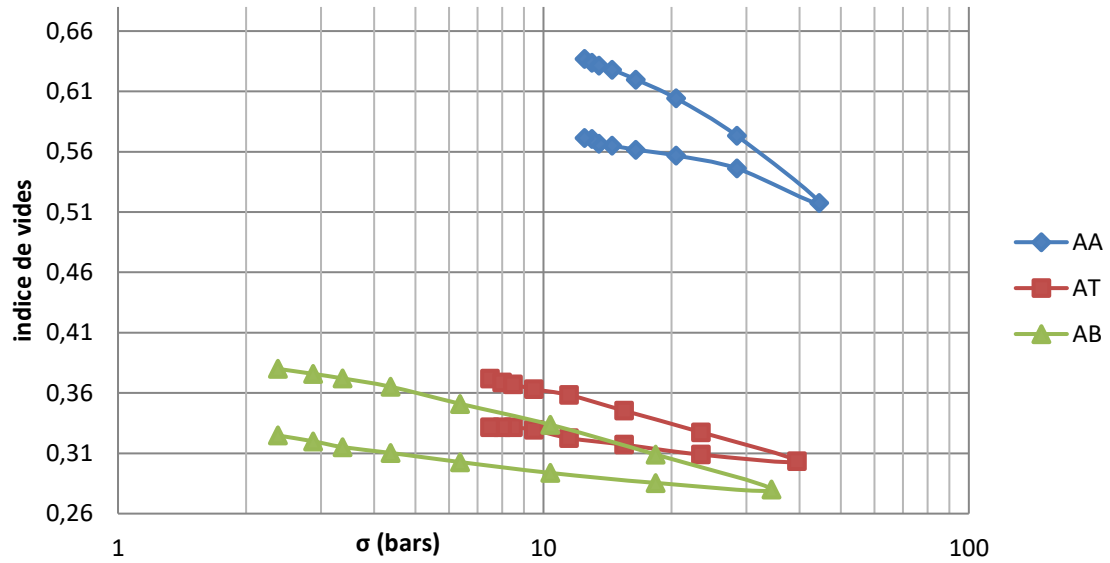


Figure III. 18: Courbes de compressibilité des trois argiles

Chaque point figurant sur les courbes correspond à la déformation verticale relative mesurée après 24 heures sous une charge appliquée (contrainte effective finale).

Les travaux de (Williams and Donaldson,1980) confirment que l'argile d'Adrar présente un très fort potentiel de gonflement, contrairement à celle de Bouda et de Timimoun, qui montre un potentiel de gonflement modéré. Selon la classification des sols fondée sur l'indice de compressibilité (C_c) et l'indice des vides (e_0) obtenus à partir des essais œdométriques (Philipponnat, 1978), l'argile d'Adrar est particulièrement sujette à la déformation.

Tableau III. 23: Paramètres de l'essai œdométrique des trois argiles

Type d'argile	Adrar	Timimoun	Bouda
ΔH (mm)	7,81	2,92	4,02
G_L (%)	39,05	14,6	20,10
P_g (Kpa)	127,4	24,2	76,4
Δh (mm)	7,81	2,92	4,02
e_0	0,637	0,380	0,372
$C_c = - \Delta e / \Delta(\log \sigma'_v)$	0,289	0,106	0,107
$C_g = \Delta e / \Delta(\log \sigma'_v)$	0,149	0,031	0,035
$E' \text{ (bars)} = - \Delta \sigma / \Delta h / h$	418,848	672,260	842,105
$C_c / 1 + e_0$	0,176	0,076	0,077

Selon (G Philipponnat, 1978), qui classer l'état de gonflement en fonction de C_g (tableau III.24), l'argile d'Adrar AA est de risque certain de gonflement, en revanche que les sol AB et AT ont un grand risque de gonflement.

Tableau III. 24: Risque de gonflement (G. Philipponnat, 1978).

Coefficient de gonflement C_g	Risque de gonflement
>0.05	Certain
$0.05- 0.04$	Très grand
$0.04- 0.03$	Grand
$0.03- 0.02$	Possible
<0.02	Peu probable

Le comportement des sols vis-à-vis de la compressibilité peut être évalué à partir du rapport $C_c / (1 + e_0)$, conformément à la classification définie dans le tableau correspondant, III.25 (Philipponnat and Hubert, 1997). Les trois sols sont sol moyennement incompressible sauf que le sol AA est proche des sols très incompressible.

Tableau III. 25: Classification selon le rapport $C_c/(1+ e_0)$ (Philipponnat & Hubert 1997).

$C_c/(1+e_0) < 0.015$	Sol incompressible
$0.015 < C_c/(1+e_0) < 0.05$	Sol peu incompressible
$0.05 < C_c/(1+e_0) < 0.2$	Sol moyennement incompressible
$C_c/(1+e_0) > 0.2$	Sol très incompressible

B) Paramètres de consolidation (C_v)

Le coefficient de consolidation verticale (C_v) est un paramètre essentiel pour évaluer la vitesse de tassement d'un sol soumis à une charge dans le temps.

Pour le calcul de C_v (coefficient de consolidation), on trace la courbe de Taylor ($C_v = f(\sqrt{t})$) (Éq. III.10) et de Casagrande ($C_v = \log(t)$) (Éq. III.9), sont présentées dans les figures III.19, III.20, Le tableau III.26 nous montre les valeurs de C_v pour les différents sols.

La figure III.19 montre les courbes de consolidation selon la méthode de Taylor, représentant le tassement de l'échantillon en fonction du temps ($\sqrt{t}$) sous une contrainte constante (cas de charge de 32 bars).

La figure III.20 présente les courbes issues de la méthode de Casagrande, exprimant le tassement de l'échantillon en fonction du temps ($\log(t)$) pour une contrainte identique 32 bars). Des deux figures (méthodes), l'argile AA présente une forme uniforme que AB et AT.

Les variations du coefficient de consolidation C_v en fonction de la nature des différents types de sols, sont données dans le tableau III.26

Tableau III. 26 Classement des valeurs de coefficient de consolidation C_v en fonction de la nature des sols

Sols	Kaolinite	Illite	Montmorillonite	Argile sableuses
$C_v(\text{cm}^2/\text{s})$	4.10^{-3} à 2.10^{-3}	2.10^{-3} à 1.10^{-3}	10^{-3} à $0,2.10^{-3}$	Ordre de 10^{-3}

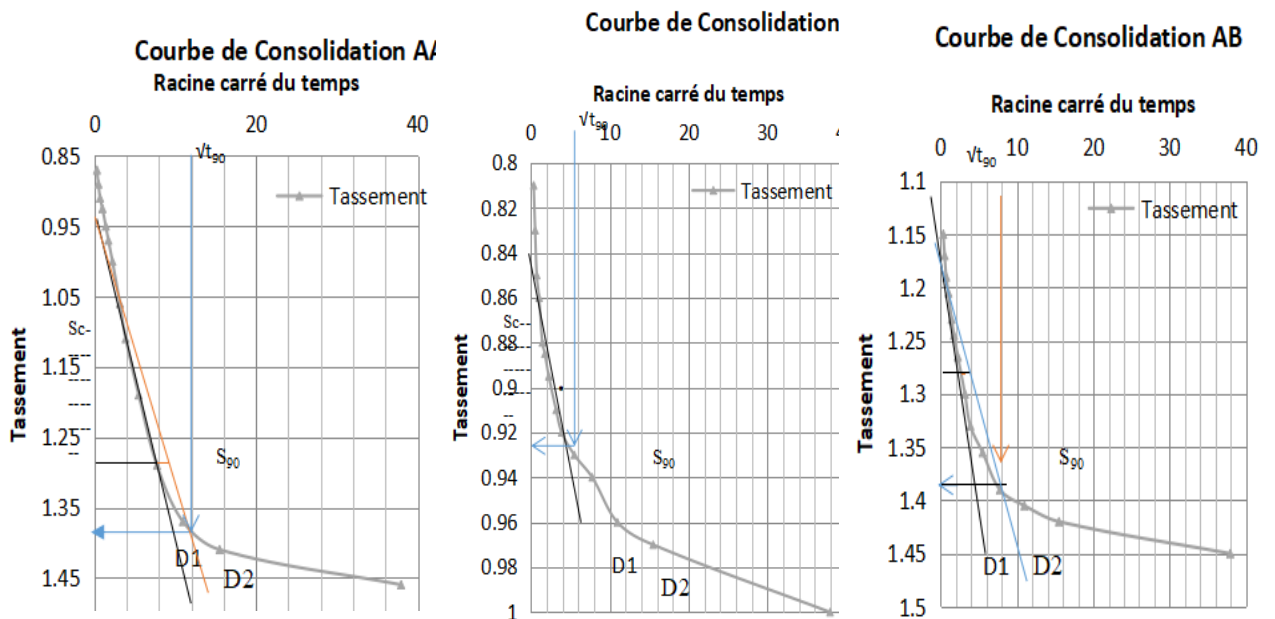


Figure III. 19: Courbe de consolidation des trois argiles par la méthode de Taylor

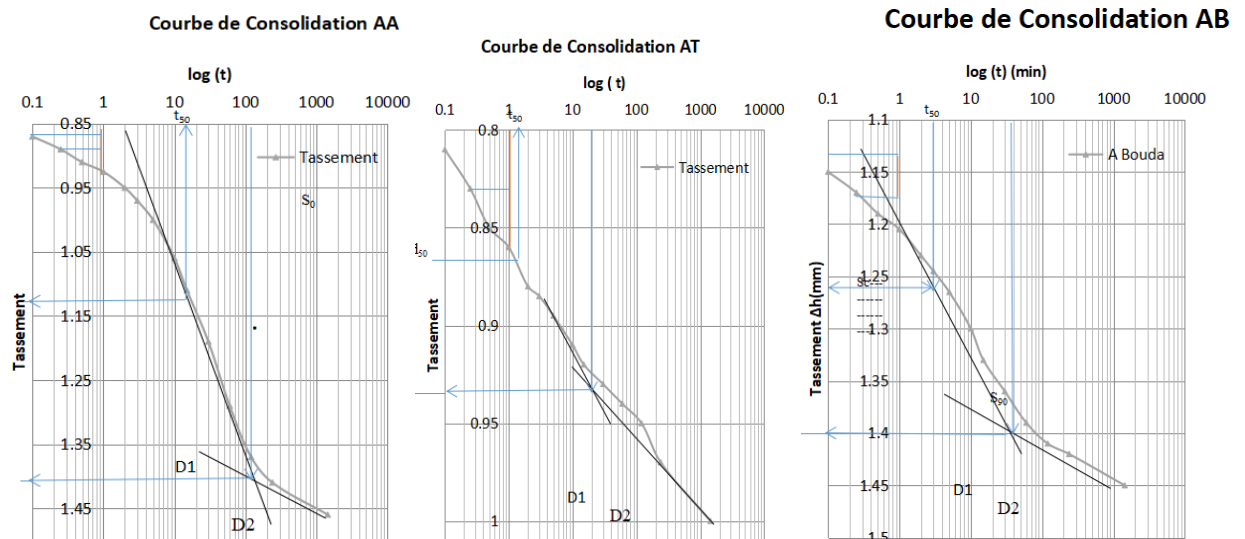


Figure III. 20: Courbes de consolidation des trois argiles par la méthode de Casagrande.

Les valeurs de coefficients de consolidation sont résumées dans les tableau III.27

Tableau III. 27 : Paramètres de l'essai de consolidation des trois argiles

Type d'argile	Adrar	Timimoun	Bouda
Cv (Casagrande cm ² /s)	0,171.10 ⁻³	5,01.10 ⁻³	0,720.10 ⁻³
Cv (Taylor cm ² /s)	0,085.10 ⁻³	0,444.10 ⁻³	0,250.10 ⁻³

Suivant les valeurs de nos argiles (tableau III.27), on peut conclure que AA et AB sont proche de montmorillonite vers les Illites, tandis qu'AT est classée comme kaolinite.

III.3.3.3 Essai de cisaillement (NF P94-071-1)

L'essai de cisaillement a pour objectif de déterminer la résistance au cisaillement d'un sol, à travers la cohésion (C) et l'angle de frottement interne (ϕ). Ces paramètres sont essentiels pour la conception des pentes dans les Centres de Stockage de Déchets (CSD), notamment pour garantir la stabilité des flancs de casiers. D'après plusieurs auteurs, l'essai de cisaillement non consolidé non drainé permet d'évaluer la résistance à court terme d'un sol. Les résultats obtenus sont jugés satisfaisants pour la conception de flancs de casier à pente 1/3, à condition de connaître précisément les paramètres de cohésion (C) et d'angle de frottement interne (ϕ).

L'essai réalisé est de type cisaillement direct non consolidé non drainé (UU), effectué à la teneur en eau optimale de compactage (OPM), conformément à la norme NF P94-071-1. Les contraintes normales appliquées sont 100, 200 et 300 kPa, avec une vitesse de cisaillement de 0,5 mm/min.

Les paramètres C_{uu} (cohésion apparente) et ϕ_{uu} (angle de frottement apparent) sont déterminés à partir de la droite intrinsèque de Mohr-Coulomb, tracée sur la base de la contrainte de cisaillement maximale (τ_{max}). Ceci est résumé dans l'équa. III.11 de la résistance au cisaillement en contraintes totales :

$$\tau = C_{um} + \sigma_v \tan(\phi_{uu}) \quad (\text{III. 11})$$

Les résultats des paramètres de cisaillement des trois argiles sont résumés dans le tableau III.28.

Tableau III.28: Classement des valeurs de coefficient de consolidation Cv en fonction de la nature des sols

Paramètre	Adrar	Timimoun	Bouda
Cohésion C_{uu} (kPa)	262	108	147
Angle de frottement ϕ_{uu} (°)	27	35	32

Selon la classification AFNOR (NF EN ISO 14688-2) présentée dans le tableau III.29, l'argile AA présente une résistance très élevée au cisaillement non drainé, tandis que l'argile At et AB présente une résistance élevée à moyenne au cisaillement non drainé.

Tableau III. 29: Classification des sols fins en fonction de la résistance au cisaillement non drainé

Résistance au cisaillement non drainé C_u (kPa)	Classification
10	Extrêmement faible
10 – 20	Très faible
20 – 40	Faible
40 – 75	Moyenne
75 – 150	Élevée
150-300	Très élevée

La figure III.21 présente la variation des contraintes de cisaillement en fonction de déplacement, de cette figure on peut conclure que :

Argile AA du côté Comportement, on observe une montée progressive des contraintes tangentielles avec la déformation, atteignant un pic élevé, surtout pour $\sigma = 300$ kPa. Ce qui implique une très bonne résistance au cisaillement, notamment à court terme, Courbe typique d'un sol plastique à cohésion marquée, indiquant un bon comportement en pente. Présence d'un pic suivi d'un léger palier, signe de stabilité post-rupture acceptable. Il est Adapté aux flancs de casiers dans les CSD avec pente raide (1/3).

Pour argile AB Résistance intermédiaire, avec un pic moins prononcé et une stabilisation rapide des contraintes. Sol moins cohésif que l'argile AA, avec une réduction de la résistance après le pic pour certaines contraintes (comportement pseudo-fragile). Il peut être utilisé pour des pentes modérées ou comme matériau de couverture secondaire.

Les Courbes de l'argile AT sont plus aplaties avec des contraintes plus faibles, ce comportement est typique d'un sol moins cohésif, voire sableux finement limoneux. Faible résistance au cisaillement, peu de variation après le pic → comportement fragile. Ce type d'argile est moins recommandé pour les structures en pente, possible en fond de casier ou en zone plane.

Le tableau III.30 présente une synthèse des argiles pour l'essai de cisaillement.

Tableau III. 30 : Synthèse comparative des trois argiles pour l'essai de cisaillement

Type d'argile	Cohésion apparente C_{uu}	Angle de frottement ϕ_{uu}	Résistance au cisaillement
AA	Très élevée	Modéré à bon	Très bonne
AB	Elevée à Moyenne	Moyenne	Bonne
AT	Moyenne	Faible à moyenne	Modeste

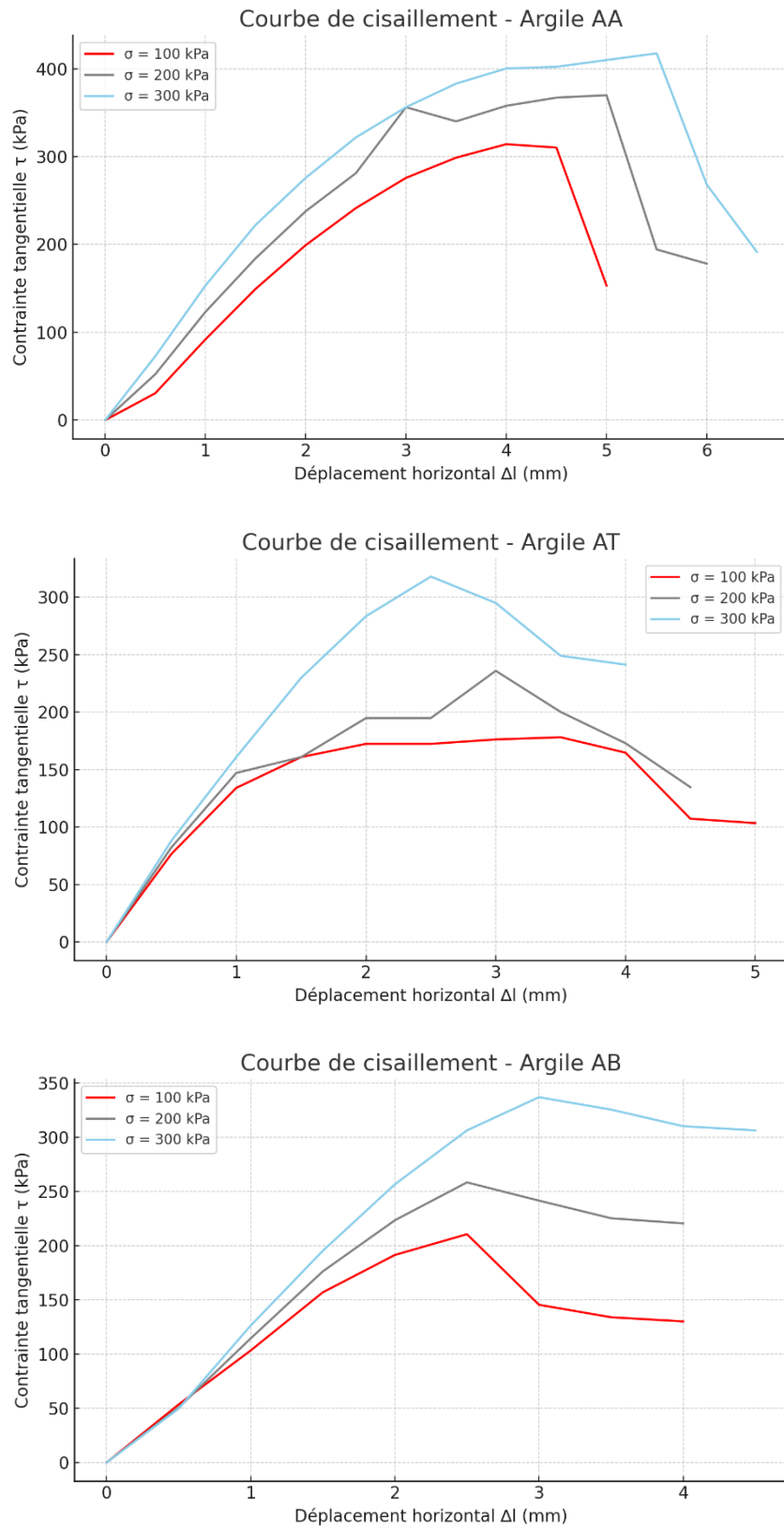


Figure III. 21: Courbe de contrainte de cisaillement en fonction de la déformation (déplacement) des trois argiles

La figure III.22 présente la variation contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale pour caractériser les paramètres de cisaillement, l'angle de frottement ϕ_{uu} et la cohésion apparente C_{uu} .

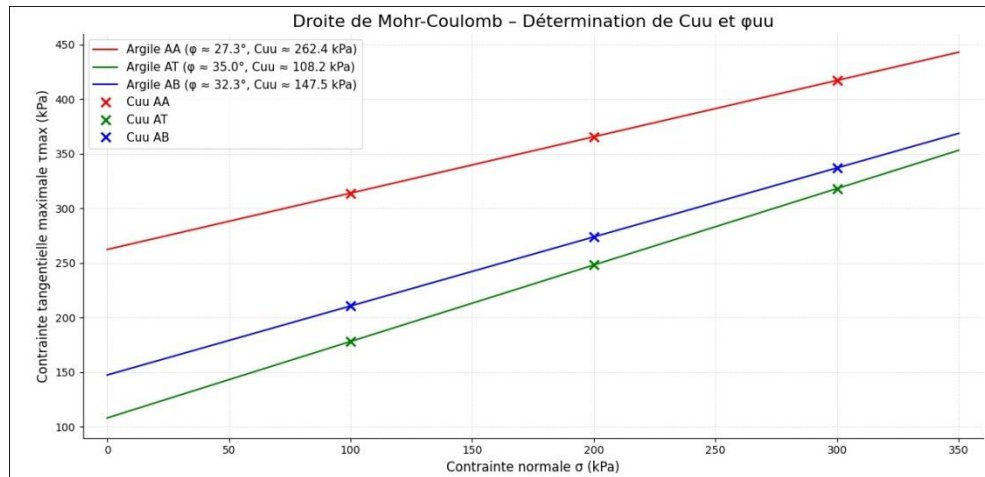


Figure III. 22: Les paramètres de l'essai de cisaillement

III.4 Récapitulation des résultats

Dénomination	AA	AB	AT
$\rho_s(\text{g/cm}^3)$ NF P 94-054	28.7	27	27.8
Limite de liquidité, W_L (%) NF P 94-051	79	64.5	36
Limite de plasticité, W_P (%) NF P 94-051	36.74	26.92	11.4
Indice de plasticité (%) ($PI = LL - PL$)	42.26	37.58	24.6
Limite de retrait (%) XP P 94-060	12.9	14.9	11.8
Indice de retrait (%) ($IR = LL - LR$) XP P 94-060	66.1	49.6	24.2
% < F2 à 2 μm (%) NF P 94-057	46	0.8	3
Activité (IP/F2)	0.92	64	8.2
MO (%) NF P 94-055 PH (ASTM D 4972)	0.086 7.8	0.086 8.48	0.172 8.74
Teneur en carbonate de calcium (%) ASTM D4373	3.59	12.08	8.65
Valeur du bleu de méthylène (%) (NF P94-068)	8.2	6.16	5.33
CEC= (VBSx1000) /374 (m^2/g)	21,92	16,47	14.25
SST = 21VBS (cm^2/g) (Tran 1977)	172.2	129.36	111.55
Masse volumique sèche à (g/cm^3) NF P 94-093	17,7	19,6	19.9
Teneur en eau optimale (%) NF P 94-093	20.68	12.41	10.53
Potentiel de gonflement G_L (%)	39.05	14.6	20.1
Pression de gonflement (kPa)	127,4	24.2	76.4
Indice des vides e_0 NF P94-090-1	0.637	0.380	0.372
$C_c / 1+ e$	0.176	0.076	0.077
Indice de compressibilité C_c NF P94-090-1	0.289	0.107	0.106
Indice de Gonflement NF P94-090-1	0.149	0.035	0.031
C_v (cm^2/s) NF P94-090-1	$0.085 \cdot 10^{-3}$	$0.250 \cdot 10^{-3}$	$0.444 \cdot 10^{-3}$
Angle de frottement ϕ_{uu} (°) NF P94-071-1	27	32	35
Cohésion C_{uu} (kPa) NF P94-071-1	262	147	108

III.5 Conclusion

Les analyses minéralogiques (DRX, MEB) révèlent :

AA : riche en muscovite/illite, kaolinite, et fer,

AB : contient du quartz, de la phengite, de la sapphirine et de la magnétite,

AT : constitué de quartz, dolomite, calcium et magnésium.

Les trois sols sont inorganiques ($MO \leq 3 \%$) avec un pH neutre à basique.

L'analyse granulométrique montre une dominance de fines particules, notamment

Pour AA ($97 \% < 80 \mu\text{m}$, $46 \% < 2 \mu\text{m}$), alors qu'AB et AT contiennent moins de particules argileuses.

D'après les limites d'Atterberg, AA est très plastique ($I_p = 42,26 \%$), tandis qu'AB et AT sont plastiques à peu plastiques.

La courbe Proctor aplatie de l'argile AA traduit une meilleure ouvrabilité, ce qui est favorable à son intégration dans les CSD.

Les résultats de potentiel de gonflement confirment le caractère fortement gonflant de l'argile AA ($\Delta h = 7 \text{ mm}$, $P_g = 127,4 \text{ kPa}$), contrairement à AB et AT, beaucoup moins gonflants. Selon la classification de Casagrande, les trois sols sont classés de très à moyennement gonflants.

Les essais de compressibilité indiquent que tous les sols sont moyennement

Incompressibles, AA se rapprochant de la classe des très incompressibles.

➤ Enfin, l'essai de cisaillement (UU) montre une bonne résistance pour l'argile AA (Cohésion marquée), tandis que AB et AT présentent une résistance moyenne à faible.

En conclusion, la valorisation de ces argiles locales est prometteuse sur le plan économique et technique, mais nécessite une amélioration de leurs propriétés, notamment pour limiter le gonflement. Le chapitre suivant sera consacré à leur stabilisation par ajout de chaux

Chapitre IV :

Caractéristiques des nouveaux Matériaux

Chapitre IV: Caractéristiques des nouveaux Matériaux

IV.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que les argiles (Argile Adrar, Timimoun et Bouda) présentent une quantité non négligeable des fines, une plasticité et une compressibilité importante. Des lors, leurs utilisations dans le Centre de Stockage des Déchets dangereux n'est pas envisageable.

Pour une la valorisation d'une argile dans la construction d'une barrière passive dans un Centre de Stockage des Déchets dangereux (CSD), il est nécessaire de les améliorer.

Dans ce chapitre on s'intéressera aux améliorations apportées à la chaux pour les trois argiles à différents pourcentages sur les caractéristiques physico-chimiques, mécaniques (tel que le bleu de méthylène, les limites de consistance et les paramètres de Proctor modifie).

Les essais ont été effectués sur des échantillons traités à différents dosages (2, 4 et 6 %) de chaux dans le but d'obtenir un mélange optimal, qui réponde aux critères réglementaires.

IV.2 L'amélioration des sols par la chaux

IV.2.1 Définitions et principes

La chaux est un produit naturel et biologique, qui est particulier à l'environnement. Il est sous forme de poudre de couleur blanche, issu de la décomposition thermique du calcaire.

Selon la fabrication de la chaux, il se présente sous trois formes :

- 1- la chaux vive : constituée de plus de 90% d'oxyde de calcium CaO ,
- 2- la chaux éteinte (ou hydratée) : obtenu par ajout de l'eau à d'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2
- 3- le lait de chaux : mélange de chaux avec de l'eau en pourcentage élevé (calculé par la concentration de CaO par litre d'eau).

La chaux est un additif historique pour l'amélioration des sols fins, en particulier les argiles. Elle est utilisée depuis l'Antiquité, comme le montre la construction pour la chaussée de la Via Appia par les Romains dès 312 av. J.-C, (cité par Nguyen, 2015).

La réaction de la chaux sur les argiles conduit à la formation de nouveaux minéraux aux propriétés liantes.

Son action se distingue en deux effets :

À court terme : amélioration de la plasticité et de la maniabilité.

À long terme : stabilisation durable du sol via des réactions chimiques.

Le traitement à la chaux repose sur des processus physico-chimiques qui modifient le comportement mécanique du sol :

Réduction de la plasticité.

Formation de liants minéraux (par réactions pouzzolaniques).

Réduction des variations volumétriques (retrait/gonflement).

Amélioration de la résistance mécanique et du comportement au gel.

La chaux, lorsqu'elle est ajoutée à un sol argileux, conduit à plusieurs réactions physico-chimiques (O'Flaherty and Highway, 2002), notamment :

IV.2.1.1 L'échange cationique

Qui permet un rapprochement des particules argileuses et modifie la structure du sol (Figure IV.1). Il est possible de dresser une liste des différents cations par ordre approchant de leur capacité de remplacement, mais l'ordre exact dépend en partie du type d'argile, de la nature des ions à remplacer et des concentrations des différents ions présents dans l'eau. En ordre de capacité de remplacement progressif, les ions sont classés :

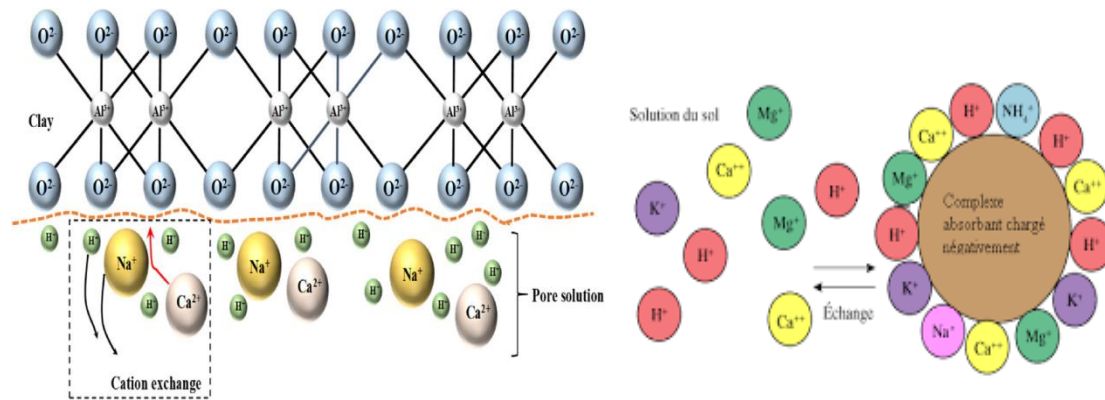


Figure IV. 1: Mécanisme de l'échange cationique (Shon et al, 2010).

IV.2.1.2 La floculation/agglomération,

C'est une réaction plus rapide, qui transforme les sols plastiques en matériaux plus granulaires ; donc améliorant la plasticité et la résistance (Prunsinski and Bhattacharja 1999). (Figure IV.2).

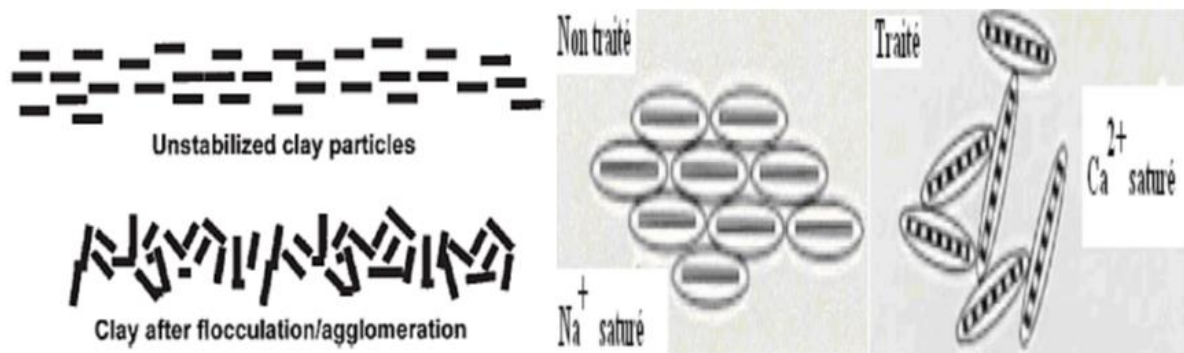


Figure IV. 2: La floculation/agglomération (Prunsinski et Bhattacharja 1999).

IV.2.1.3 Les réactions pouzzolaniques

Conduit à une augmentation du PH peut atteindre une valeur recommandée lorsque la quantité ajoutée est suffisante (Eades et al, 1963 ; Eades and Grim 1966 ; Locat et al, 1996 ; Bell, 1996 ; Khattab and Adrees, 2002 ; Cabane, 2004), qui correspond à 12.4 dosages en chaux minimal nommé « lime fixation point ». Le seuil de pH correspondant à la saturation de solution en chaux devant être au moins égale au pH d'une solution saturée en portlandite soit 12.4, Pour déclencher les réactions pouzzolaniques. Selon ces auteurs, à partir de ce taux de dosage, la chaux devient disponible pour ces réactions.

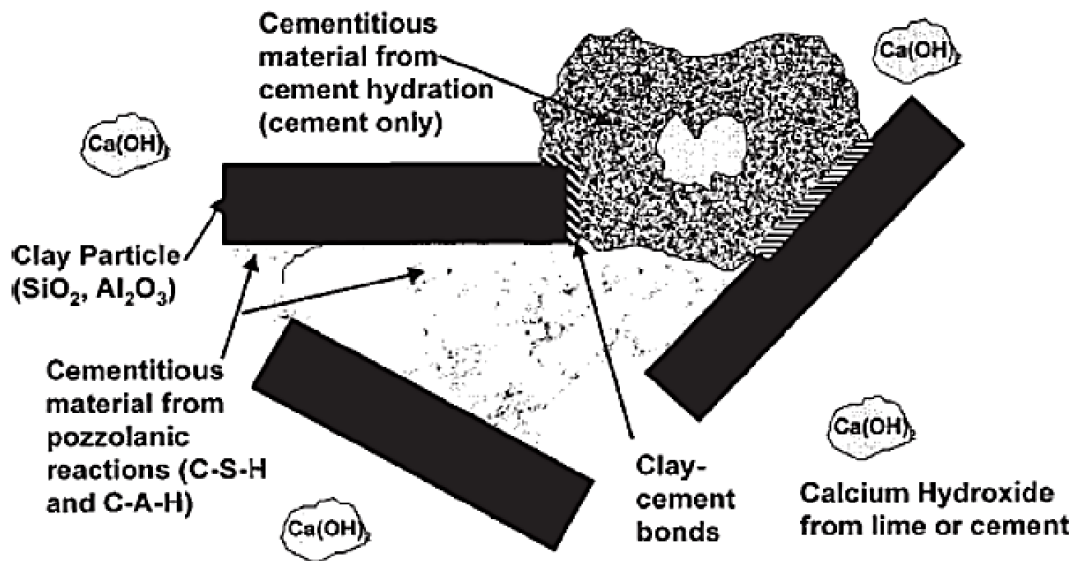
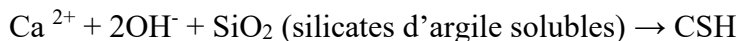
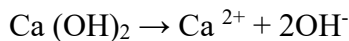


Figure IV. 3: Réaction pouzzolanique (Prunsinski & Bhattacharja 1999)

Ce fort pH facilite la dissolution de la silice (SiO_2) et de l'alumine (Al_2O_3), dont les principaux constituants sont l'argile, la chaux et l'eau. Ces éléments dissous peuvent subir des réactions avec les cations Ca^{2+} substitués (figure IV.3), donnant des constituants cimentaires tels que le silicate d'aluminate de calcium hydraté (C-A-S-H), des aluminates de calcium hydratés (C-A-H) et des silicates de calcium hydratés (C-S-H) ; en conférant au sol une meilleure résistance mécanique et une stabilité accrue dans le temps. Plusieurs chercheurs ont mis en évidence cette formation de composés d'hydratation par le traitement à la chaux (Eades and Grim 1962 ; Diamond and Kinter, 1965 ; Locat et al, 1996 ; Wild et al, 1987 ; Khat and Adrees, 2002 ; Le Runigo, 2008).



Ces réactions sont influencées par plusieurs facteurs :

- La température du milieu influe sur la rapidité de la prise : plus elle est élevée, plus la prise est rapide. Toutefois, au-delà de 45 °C, la qualité des produits formés peut

se détériorer et dégrader. La prise est ralentie, voire stoppée et arrêtée, lorsqu'elle est inférieure à 4 °C. (Bell, 1996), et ne reprendre qu'avec la remontée des températures.

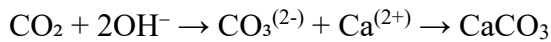
La nature de la fraction argileuse est également une donnée essentielle. La chaux réagit avec les phyllosilicates d'aluminium, et plus on a de silicates disponibles, plus on "réagit" rapidement. Par exemple, la montmorillonite (à trois couches) réagit plus rapidement que la kaolinite (deux couches), ce qui peut décaler le développement des réactions pouzzolaniques.

L'état hydrique du sol conditionne la mobilité ionique. Une humidité suffisante favorise la solubilisation de la chaux et les réactions pouzzolaniques (Cabane 2005) , en permettant une formation homogène de nouveaux minéraux cimentants en regard de la terre (Locat et al, 1990 ; Bell, 1996).

Cette partie sera détaillée dans le paragraphe IV.3.1.

IV.2.1.4 La Carbonatation,

La carbonatation est une réaction chimique entre le dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique et la chaux contenue dans les sols traités. Le CO₂ dissous réagit avec les ions OH⁻ pour produire des ions CO₃²⁻, lesquels forment du carbonate de calcium (CaCO₃) en associant avec les ions Ca²⁺ :



Les cristaux de calcite ainsi formés agissent comme un liant faible, n'offrant qu'un renforcement temporaire. Cette réaction consomme une partie de la chaux, réduisant ainsi sa disponibilité pour les réactions pouzzolaniques, et donc la résistance mécanique finale du sol.

En outre, la carbonatation abaisse le pH, ce qui retarde le développement des réactions pouzzolaniques. Ce phénomène est favorisé dans des environnements humides et chauds riches en CO₂, tandis qu'un air sec peut le ralentir. Cette réaction peut être évitée par des méthodes de mise en œuvre adéquates qui minimisent l'exposition de la chaux à l'air (Chou, 1987).

IV.2.2 Identification de la chaux ajoutée

La chaux utilisée pour la stabilisation des trois argiles est une chaux vive CaO, On extrait le calcaire dans des carrières et des mines à travers le monde. Dans notre cas la chaux utilisée extraite de l'usine de la wilaya de Gardaia située dans le centre de l'Algérie

Les caractéristiques essentielles de cette chaux sont résumées comme suit. Sa composition chimique indique une teneur en CaO aussi élevée que la composition chimique des argiles citée dans le chapitre précédant, il présente aussi une faible concentration en éléments oxydes

comme les silicates SiO_2 et les aluminates Al_2O_3 (tableau IV.1). La masse volumique apparente de la chaux traitée selon l'essai normalisé NF P18-554-555, a pour valeur de

$$\gamma_{\text{app}} = 1,7\text{g/cm}^3 \text{ et absolue } \gamma_{\text{abs}} = 2,34\text{g/cm}^3.$$

Tableau IV. 1: Analyse chimique de l'argile AA et de la chaux avec et sans traitement (laboratoire de Lafarge, de Mascara) (Khedidja.B et al, 2024)

Dénomination (%)	AA (%)	Chaux(C)	AA+2%L	AA+4%L	AA+6%L
SiO_2	51.23	10,56	40.59	30.50	21.60
Al_2O_3	16.89	0,49	14.63	11.06	7.99
TiO_2	1.40	0,07	0.80	0.77	0.70
Fe_2O_3	17.45	0,26	8.06	6.80	5.60
CaO	0.06	52,88	11.86	23.42	34.73
MgO	0.82	15,70	4.83	7.90	10.36
Na_2O	0.24	0,24	0.23	0.24	0.23
K_2O	4.10	0,12	3.20	2.36	1.40
P_2O_5	0.03	0,02	0.03	0.02	0.02
SO_3	0.04	0,25	0.09	0.20	0.22
PH (25°)	7.80		12.35	12.62	12.82

La figure IV.4 présente le DRX de la chaux en déterminant les minéraux constituant ce dernier, cette figure montre que la chaux donne un mélange de chaux, portlandite et de calcite.

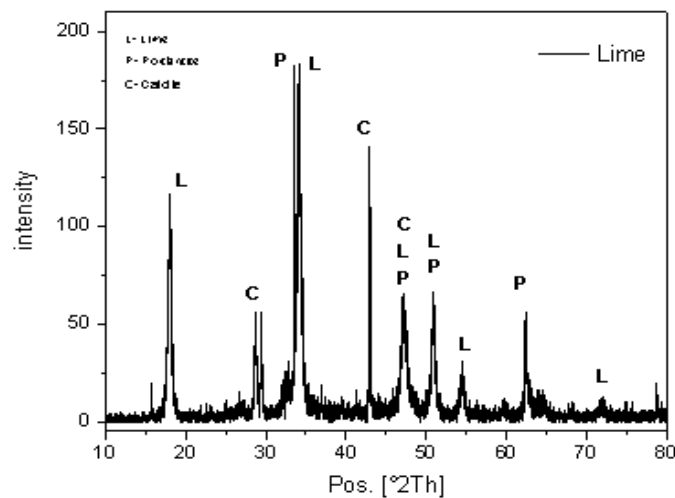


Figure IV. 4 : Diffractogramme X de l'essai de la chaux

IV.3 Amélioration des trois argiles par la chaux, essais et résultats

IV.3.1 Détermination du pourcentage de chaux (essai de pH) pour A

La concentration initiale en chaux détermine la quantité minimale de chaux à ajouter pour assurer l'échange cationique ou l'affinité du sol (Bell, 1996). Ceci entraîne donc un changement significatif des caractéristiques du sol traité à court terme.

La littérature propose plusieurs méthodes pour calculer cette quantité de chaux, comme le pH, la pression de gonflement, l'augmentation de la plasticité, la composition minéralogique et la teneur en chaux libre à court terme. Dans l'étude présentée ici, nous avons utilisé le pH. Les résultats de la variation du pH avec les différents pourcentages d'ajouts de chaux sont montrés sur (la figure IV.5).

Dans la première méthode suggérée par (Eades and Grim 1966), un PH minimum de 12,4 est nécessaire pour activer la réaction pouzzolanique entre la chaux et le sol. L'alcalinité du sol augmente avec l'ajout de chaux.

La réaction pouzzolanique augmente avec la valeur du pH et contribue à obtenir une meilleure floculation. L'argile expansive subit des transformations importantes dans sa structure lorsqu'elle est mélangée à la chaux. L'essai de mesure du pH de l'argile non traitée et traitée à différents pourcentages d'ajouts a été effectué selon la norme ASTM D 4972.

Le traitement des échantillons d'argile d'Adrar à la chaux, fait augmenter le pH du mélange, ces résultats sont en accord avec ceux de plusieurs chercheurs (Eades and Grim, 1966 ; Rogers et al., 1997 ; Rogers and Glendinning, 2000; Cabane, 2004; Khattab et al., 2007; Lasledj, 2009; Tran, 2009; Kalkan, 2011; Portelinha et al., 2012; Tran, 2013; Nguyen, 2015; Al-Taie et al., 2016; Djelloul, 2016; Emarah and Seleem, 2018; Baldovino et al., 2018; Bakaiyang et al., 2021; Dharmendra and Sujit, 2022).

Le pH passe d'une valeur de 7.8 pour l'argile naturelle à une valeur de 12.35 après l'addition de 2% de chaux, et se stabilise de 12.62 à 12.82 pour 4 et 6%. Selon cette méthode, un minimum de 3 % de chaux est nécessaire pour atteindre un pH de 12,4 correspondants au Point de Fixation de Chaux (PFC) (Rogers and Glendinning, 2000 ; Khattab et al., 2007 ; Lasledj, 2009 ; Nguyen, 2015 ; Bakaiyang et al., 2021).

L'augmentation des valeurs du pH est attribuée à la diminution de la teneur de minéraux argileux relatifs dans l'échantillon traité (tableau IV.1), 2 %, 4 % et 6 %, due à la réaction de la chaux avec l'argile, permettant ainsi la consommation et la dissolution des minéraux argileux et éventuellement la formation de nouveaux minéraux aux propriétés liantes (Cabane, 2004; Tran, 2009; Metelková et al., 2011; Bourabah, 2012; Portelinha et al., 2012; Ghobadi et al., 2014; Djelloul, 2016; Bakaiyang et al., 2021).

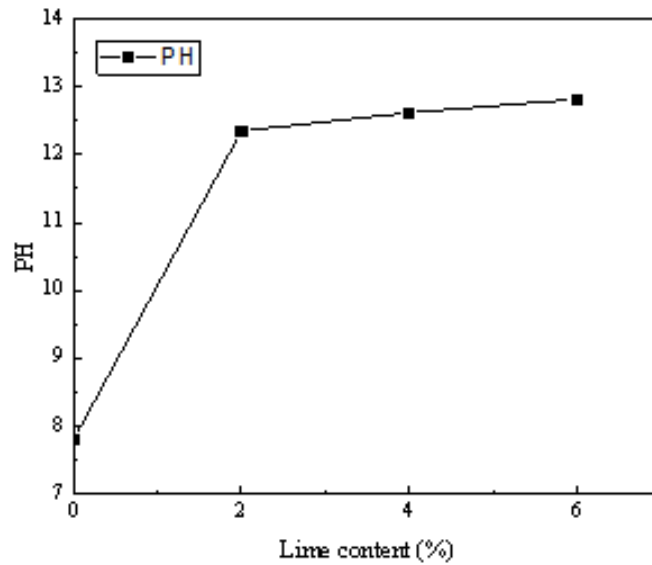


Figure IV. 5 : Effet de la chaux sur le pH

La deuxième méthode suggérée par (Hilt and Davidson, 1960), est appelée pourcentage minimum de chaux ou "fixation de la chaux" ou méthode du "point de fixation de la chaux" Lime Fixation point L_m , qui est le pourcentage de chaux vive nécessaire pour produire une solution saturée de chaux dans une suspension d'argile dans l'eau et ainsi satisfaire pleinement à l'échange d'ions.

L'ajout de chaux vive au-delà de ce point est considéré comme nécessaire pour provoquer les réactions de stabilisation (Rogers and Glendinning, 2000 ; Bakaiyang et al, 2021 ; Dharmendra and Sujit, 2022).

$$L_m = [\text{teneur en argile } (< 2 \mu\text{m}) / 35] + 1,25 ; L_m = 2,56$$

Compte tenu de la grande efficacité de la chaux vive, un ajout de 3 à 4% a été choisi. Compte tenu des méthodes susmentionnées, il a été décidé d'utiliser 4 % de chaux pour traiter le sol.

IV.3.1.1 Préparation des échantillons

Afin d'obtenir la combinaison des sols requises, plusieurs mélanges d'argile AA, de AB et d'AT à la chaux C ont été considérés dans cette étude : 2% C + 98% Argile ; 4% C + 96% Argile et 6% C + 94% Argile.

Des essais de consistance, de Bleu méthylène et de compactage ont été réalisés (figure IV.6). L'argile naturelle recueillie a été broyée en particules fines (le diamètre selon chaque essai), après avoir séchée à l'étuve les échantillons à une température à 105°C. Les quantités de chaux et d'eau ont été calculées en pourcentage du poids.

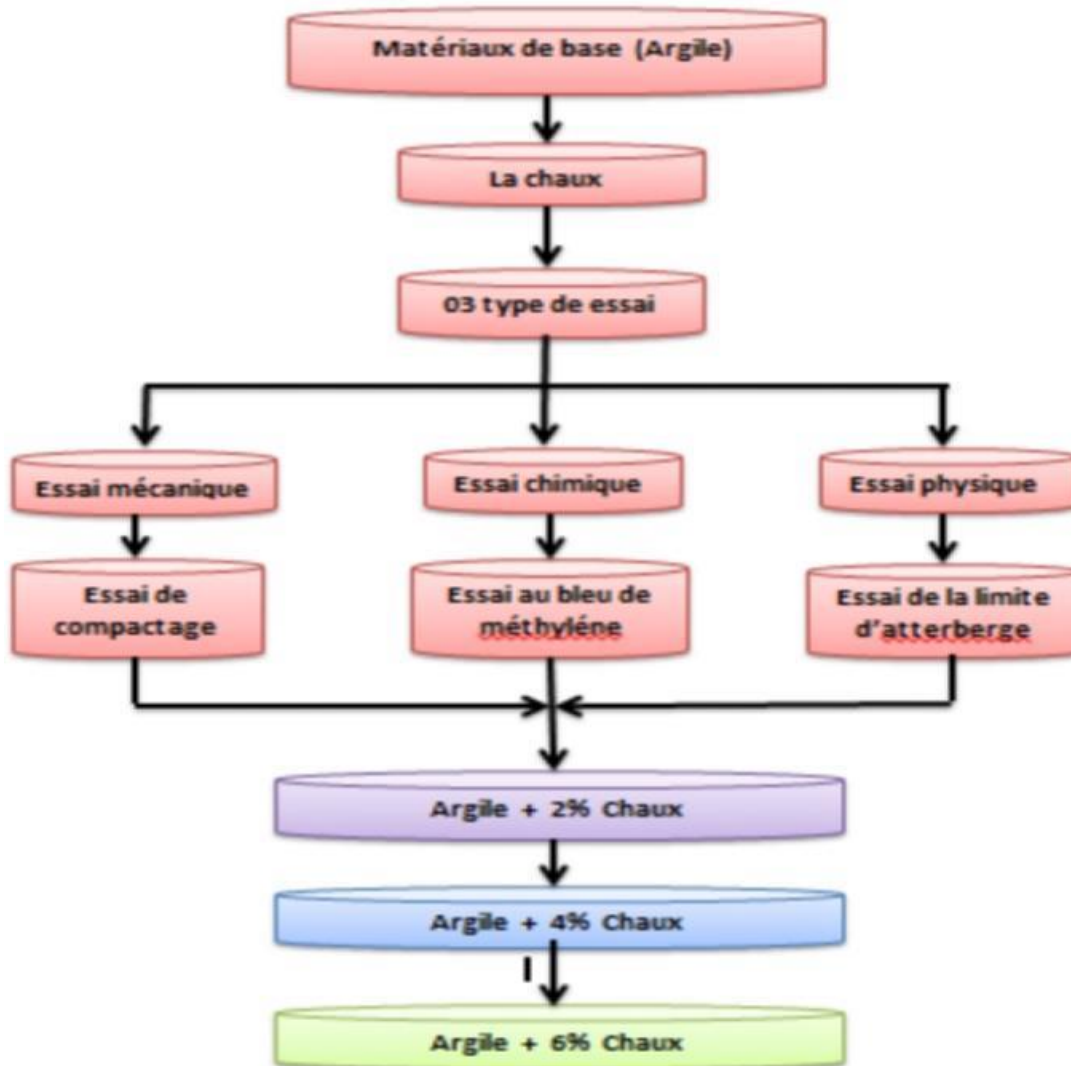


Figure IV.6: Organigramme de l'amélioration des trois argiles par la chaux

IV.3.2 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg ou limites de consistance (NF P 94-051)

L'effet de la teneur en chaux sur les limites d'Atterberg est montré sur la (Figure IV.7). On remarque que l'ajout de chaux présente une modification des limites d'Atterberg des trois argiles, en effet

La figure IV.7 illustre l'évolution des limites d'Atterberg pour les trois argiles étudiées (AA, AB et AT), en fonction du taux de chaux ajouté.

Pour l'argile AA, la limite de liquidité diminue sensiblement, passant de 79 % à 68 % avec l'ajout de 4 % de chaux, avant qu'elle augmente légèrement à 75 % à 6 %.

Pour l'argile AB, on observe une réduction marquée de 65,5 % à 30 % pour 4 %, puis une augmentation modérée jusqu'à 41 % à 6 %.

En revanche, pour l'argile AT, la limite de liquidité évolue à la hausse, passant de 36 % à 46 % entre 0 % et 6 % de chaux.

Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature (Ola, 1977 ; Bell, 1996 ; Kinuthia et al., 1999 ; Rao & Shivanandha, 2005 ; Vitale et al., 2017).

Selon Nalbantoglu (2006), la tendance de la limite de liquidité à augmenter ou diminuer dépend essentiellement de la nature minéralogique de l'argile :

- Dans les sols kaoliniques, elle augmente avec l'ajout de chaux.
- Dans les sols montmorilloniques, elle a tendance à diminuer.

En ce sens, une diminution de l'indice de plasticité vient marquer une amélioration dans la maniabilité du sol, il s'avère que les trois sols fins connaissent une chute immédiate de l'indice de plasticité dès que l'on procède à l'addition de chaux dans diverses proportions.

Il convient donc de conclure que l'addition de 6 % en chaux s'avère suffisante pour augmenter la maniabilité du sol par la réduction de l'indice de plasticité, passant de 42,26 % à 8,34 % pour AA, de 24,6 % à 9,78 % pour AT et de 37,58 à 4,1 pour AB avec un pourcentage de réduction égal à 80,05 % (AA), de 60,24 % (AT) et de 89,08 % (AB) ; la même tendance était remarquée par plusieurs chercheurs (Nalbantoglu, 2006; Khattab et al., 2007; Sakr et al., 2009; Harichane et al., 2011; Al-Swaidani et al., 2012; Bourokba et al., 2015; Garzón et al., 2016; Vitale et al., 2017; Driss et al., 2018).

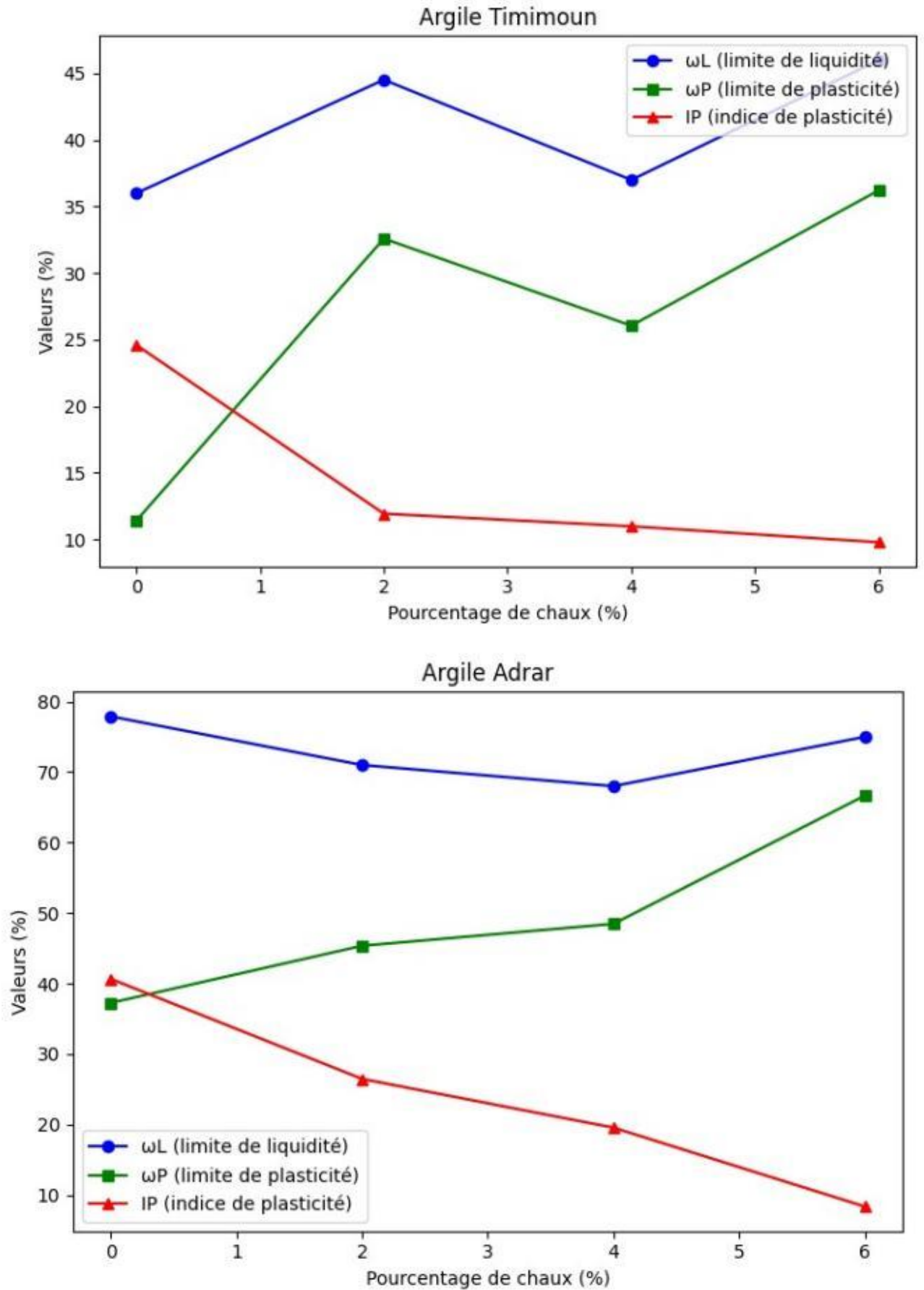
Ce comportement peut être expliqué par des réactions chimiques entre la chaux et le sol, notamment les réactions d'échange d'ions et de floculation. Les résultats de nombreux chercheurs vont dans le sens de ce comportement (Stoltz et al., 2012 ; Al-Mukhtar et al., 2012 ; Sharma et al., 2018).

L'ajout de chaux a permis d'augmenter la limite de plasticité, qui est passée de 36,75 % à 66,66 % pour une quantité de chaux de 6 % pour AA, de 11,4 % à 36,22 % pour AT, puis de 26,92 % à 36,9 % pour AB.

Ce résultat est similaire à ceux observés par (Osula, 1991 ; Kinuthia et al., 1999 ; Afès and Didier, 2000 ; Yong and Ouhadi, 2007), l'augmentation pour AT a été remarquable, autour de 217,7 % en comparaison avec les autres argiles AA et AB, de 81,4 % et 37,08 % respectivement.

Cette augmentation a également été observée et confirmée par de nombreux chercheurs (Guney, 2007 ; Attima et al., 2014 ; Asgari et al., 2015 ; Bourokba et al., 2015 ; Driss et al., 2018). Ce comportement marqué de la limite de plasticité est essentiellement dû au séchage des particules de sol causé par la chaux.

Cela entraîne une réduction des propriétés plastiques du sol, due à la rupture de la couche hydrique entourant les minéraux argileux.



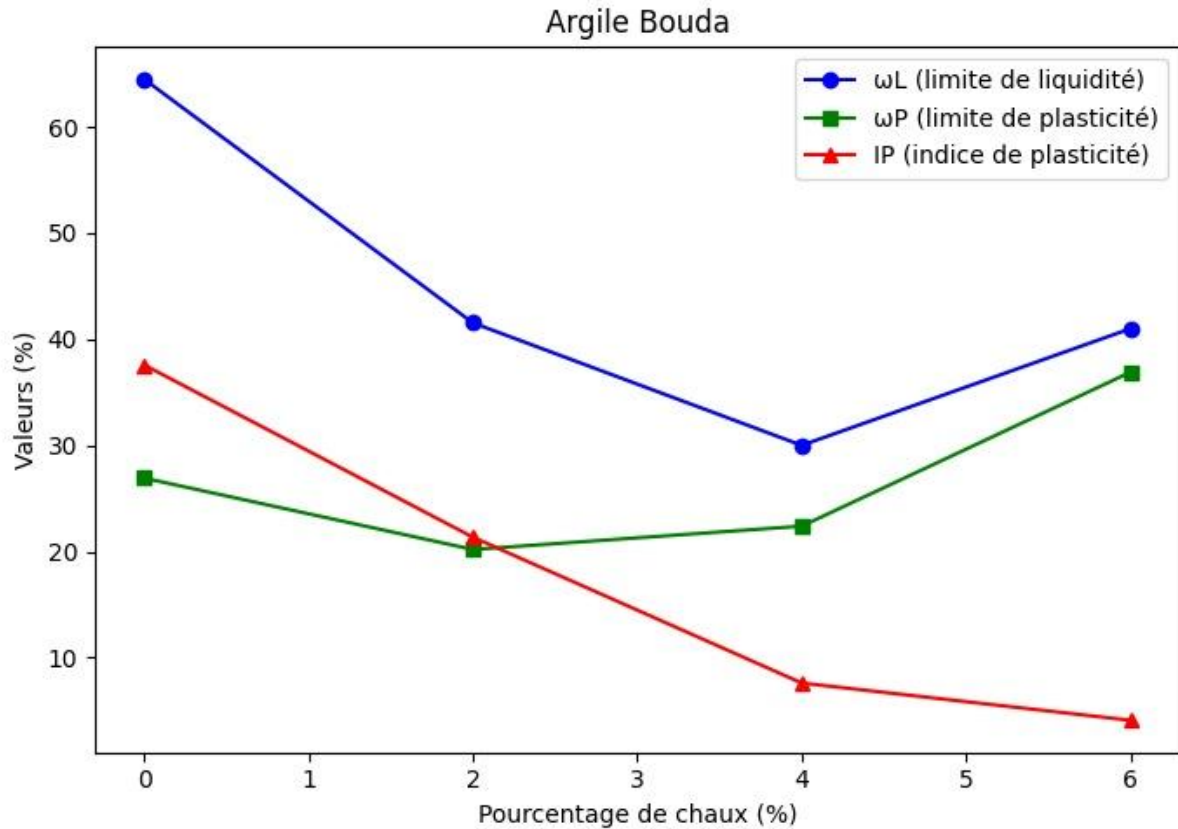


Figure IV. 7 : Les états de consistance traités à la chaux pour chaque argile

IV.3.2.1 Abaque de plasticité de Casagrande :

Enfin, les résultats des essais de limite de cohésion ont été reportés sur l'abaque de plasticité de Casagrande afin de classer les sols selon le système unifié de classification des sols (USCS)

. La figure IV.8 montre clairement la comparaison des argiles sans et avec traitements à la chaux, il est observé que l'argile AA initialement classé comme argile très plastique (argile à plasticité élevée) passe à (argile inorganique très plastique) après le traitement à 6%, ce qu'on peut conclure que la nature de sol a changé mais la plasticité a resté la même (très plastique).

L'argile de Bouda était classée dans la classe (des argiles plastiques), et après le mélange avec la chaux a donné (une argile peu plastique) pour un dosage de 2% tend vers (un limon plastique) pour 4% et 6% de chaux.

Enfin l'argile de Timimoun était (une argile plastique) suivie par (des limon plastique) après l'ajout de la chaux pour les trois pourcentages. Ce changement est attribué à la floculation causée par la stabilisation à la chaux.

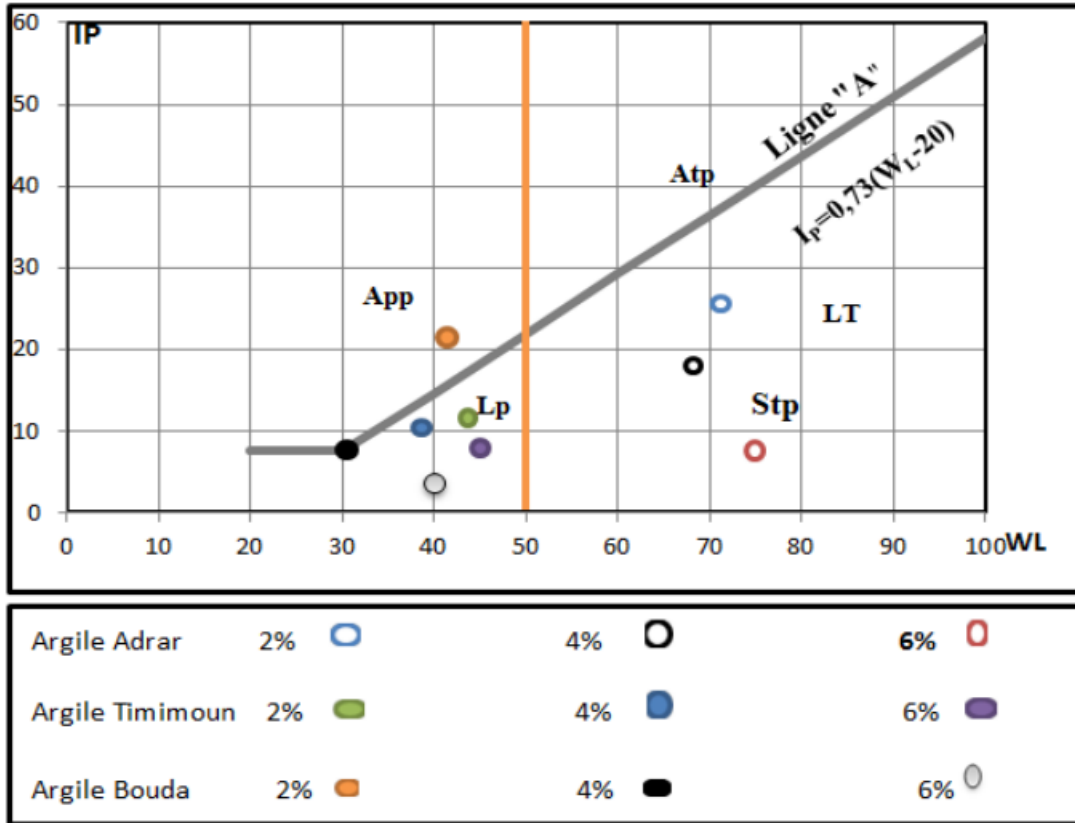


Figure IV. 8 : Classification des trois sols traités à la chaux (2, 4 et 6%) suivant l'abaque de Casagrande de la classification L.C.P.C

IV.3.3 Effet de la chaux sur l'essai au bleu de méthylène à la tâche (Norme NF P94-068)

Une Valeur au bleu élevée signifie une forte présence des particules fines actives, capables d'influencer la stabilité et le comportement mécanique du sol. (La figure IV.9) présente l'essai des trois argiles traitées à la chaux (2,4 et 6%).

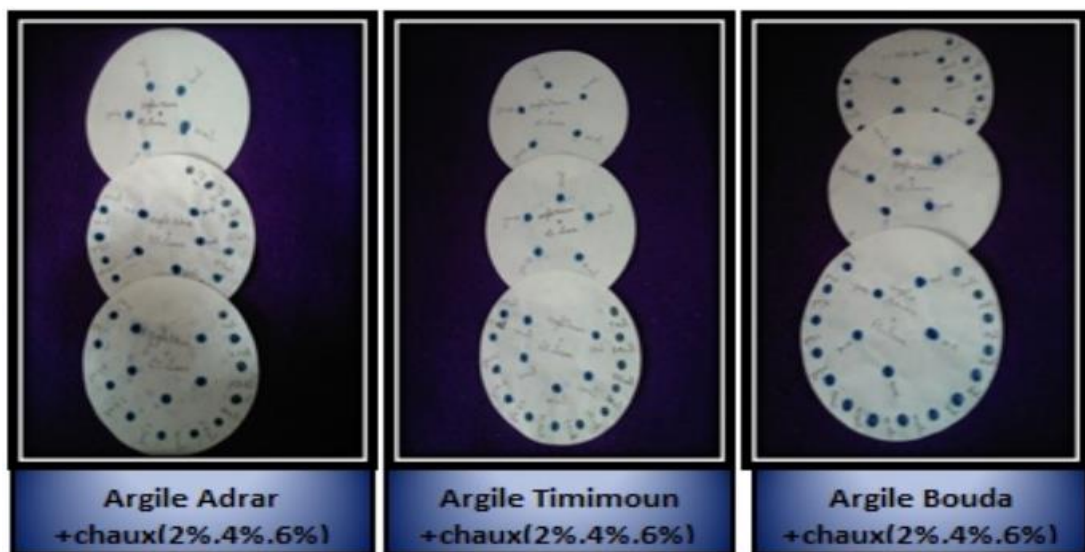


Figure IV. 9 : l'essai de bleu de méthylène pour des dosages de 2%,4% et 6% de chaux avec AA et AT et AB

Pour chaque teneur en chaux, nous avons effectué des mesures de la valeur au bleu de méthylène et en déterminant la SST de chaque mélange. Les résultats des mélanges sont récapitulés dans le tableau IV.2, il résume les résultats de l'essai au bleu de méthylène exécuté sur les trois types d'argiles (AA, AT et AB) traitées avec différents dosages de chaux (0 %, 2 %, 4 % et 6 %). Les paramètres évalués sont la SST (Surface Spécifique Totale), la VB (Valeur de Bleu), ainsi que la classification du sol selon ces valeurs.

Du tableau, il est remarqué qu'à 0 % de chaux, les trois argiles ont des VB élevées (8,2 pour AA, 5,33 pour AT et 6,16 pour AB), indiquant des sols argileux ou très argileux ; Avec l'augmentation du pourcentage de chaux (2 %, 4 %, 6 %), la VB diminue de manière significative (par exemple, la VB de l'argile AA passe de 8,2 à 7, puis celle des argiles AT et AB de 5,33 vers 4 et de 6,16 à 4 respectivement), ce qui indique une diminution de la teneur en argiles fines actives ou une modification de leur structure par stabilisation. La surface spécifique totale (SST) diminue également avec l'ajout de chaux, ce qui indique une réduction de la surface d'adsorption due à la diminution des particules fines ou à leur agglomération, mêmes résultats que (Bell, 1996 ; Cambi et al, 2012 ; Attima et al, 2014).

Tableau IV. 2: Résultats de l'essai au bleu des trois argiles traitées à la chaux

	AA			AT			AB		
	SST	VB	Classification	SST	VB	Classification	SST	VB	Classification
0%	172.2	8.2	Très argileux	111.55	5.33	Argileux	129.36	6.16	Argileux
2%	157.5	7.5	Argileux	84	4.1	Sol limoneux de plasticité moyenne	84	4	Sol limoneux de plasticité moyenne
4%	157.5	7.5	Argileux	84	4		84	4	
6%	147	7	Argileux	84	4		84	4	

Sous l'effet de la chaux, cette diminution de la VB et SST correspond à une modification de la classification des sols, qui changent d'appellation et passent de sols argileux ou très argileux à sols limoneux de plasticité moyenne, moins sensibles à l'eau et donc plus résistants mécaniquement. Selon la classification l'argile AA été très argileux a changer à sol argileux après traitement ; tandis que l'argile AT et AB passent des sols argileux à sols limoneux de plasticité moyenne à partir de 2% de chaux, induisant à une amélioration significative de la qualité géotechnique du sol.

IV.3.4 Effet de la chaux sur les paramètres de compactage Proctor modifié des trois argiles

La capacité au compactage des argiles a été effectué à l'aide de l'essai Proctor modifié en accord avec la norme NF P94-068, afin de déterminer l'effet de la chaux sur les paramètres de compactage à savoir la teneur en eau optimale (W_{opt}) qui correspond à la densité sèche maximale du sol ($\gamma_{d\ max}$) pour les trois types d'argiles (AA, AB et AT)

Les résultats obtenus pour l'essai de compactage Proctor modifié pour les trois argiles améliorées à la chaux sont reportés dans les figures ci-dessous.

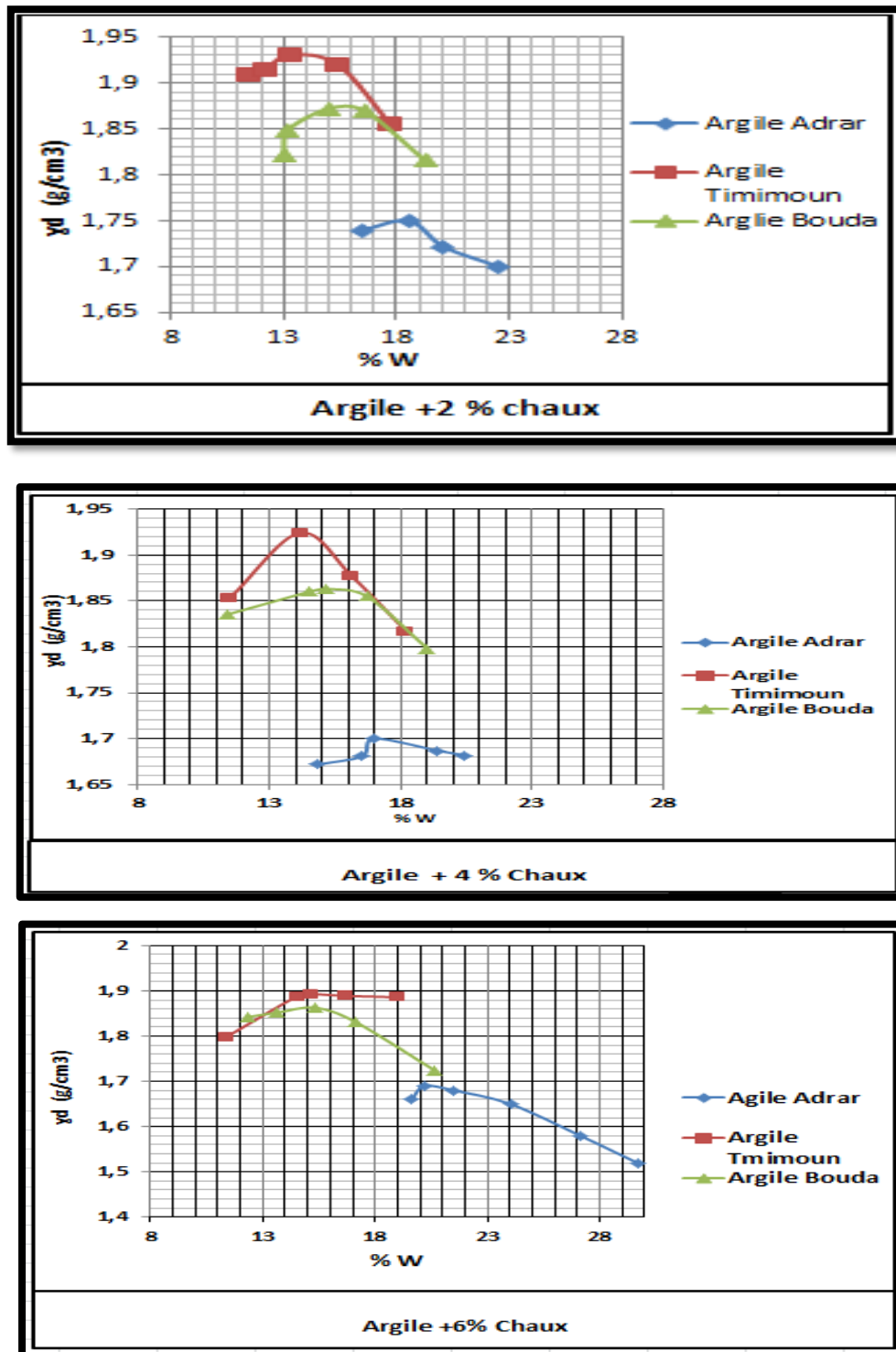


Figure IV. 10 : Courbes de compactage à OPM de l'argile des mélanges (2%,4% et 6%) de chaux pour les trois argiles

L'ajout de chaux, conduit à une modification des caractéristiques de compactage des argiles traitées. En effet, le sol traité présente une densité sèche maximale plus faible que celle

de l'argile naturelle et leur teneur en eau optimale est décalée vers des teneurs en eau plus forte.

Les trois Argiles présentent une diminution progressive avec l'augmentation du pourcentage de chaux pour la densité sèche maximale (γ_{dmax}), passant de 17,7 kN/m³ à 0% chaux à 17 kN/m³ à 6% chaux pour Argile d'Adrar, de 19,9 kN/m³ à 0% chaux vers 18,9 kN/m³ à 6% chaux pour Argile de Timimoun et enfin de 19,6 kN/m³ à 0% chaux à 18,6 kN/m³ à 6% chaux pour Argile Bouda (figure IV.11).

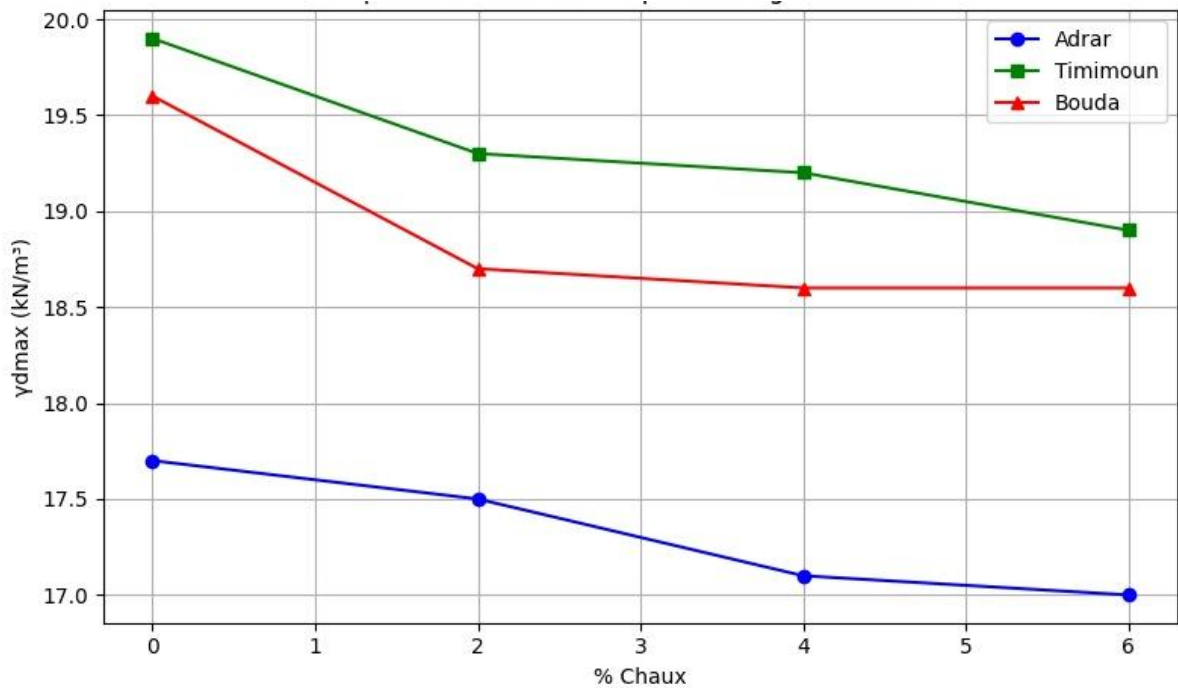


Figure IV. 11: Variation de la densité sèche maximale en fonction de % de chaux des trois argiles

Cette diminution de la densité sèche maximale avec l'augmentation de la chaux est en parfaite cohérence avec les observations générales et les travaux antérieurs (Afès, Didier et al., 2000; Attima et al., 2014; Bourokba et al., 2015; Driss et al., 2018; Moretti et al., 2020; Barman and Dash, 2022; Dharmendra and Sujit, 2022; Shahzaib Sharif et al., 2024), cela s'explique par le fait que la chaux provoque une floculation et une agglomération des particules argileuses, ce qui diminue la compacité maximale obtenue par compactage.

Tandis que la teneur en eau optimale (W_{opt}) augmente avec l'augmentation de la chaux cette remarquée est observée pour les trois argiles, variant de 20,68% à 22,20% pour AA, de 10,53% a augmenté à 15,87% pour AT et de 12,41% à 15,32% pour AB (figure IV.12).

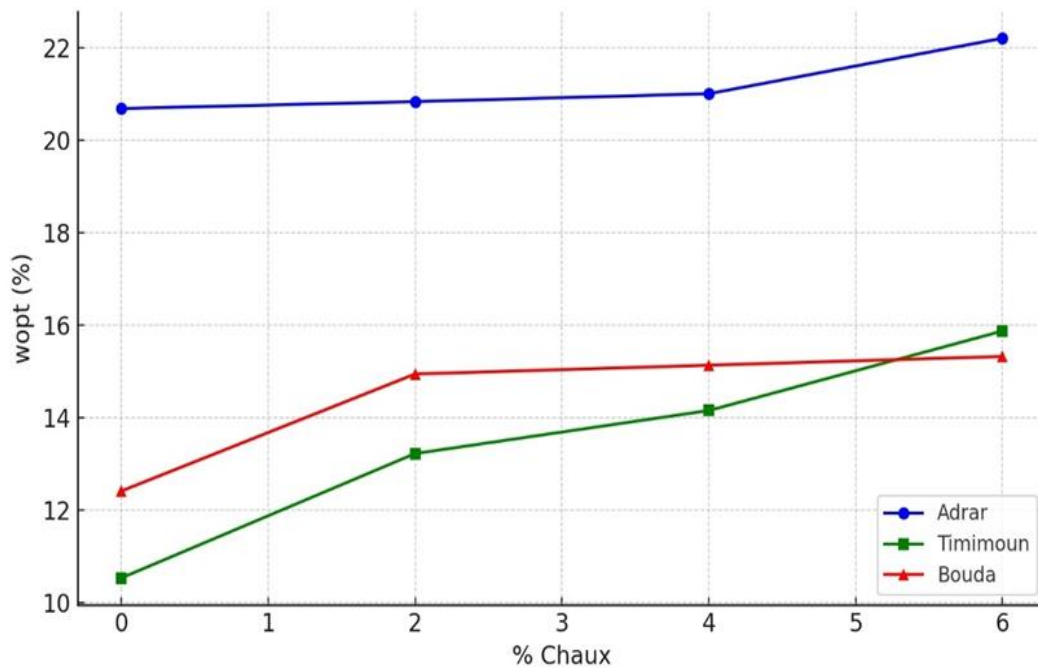


Figure IV. 12: Variation de la teneur en eau optimale en fonction de % de chaux des trois argiles.

L'augmentation de la teneur en eau optimale résulte de l'effet exothermique et de l'hydratation provoqués par l'ajout de chaux, qui assèchent au départ le sol, nécessitant ainsi un apport d'eau supplémentaire pour garantir une compaction optimale. En conséquence, la modification de la microstructure du sol, résultant de la floculation des particules, augmente sa capacité à retenir l'eau, permettant ainsi un compactage plus efficace.

De plus, les réactions immédiates représentées par le phénomène de floculation et l'agglomération due à la réorganisation des particules argileuses du sol en agglomérats. Cette tendance permet d'augmenter la valeur de la teneur en eau et diminuer les valeurs de la densité sèche maximale (Kiki 2016).

La figure IV.13 présente la variation de la densité sèche maximale et de l'argile AA, AT, AB en fonction du dosage en chaux, Comme cela a déjà été observé avant, la densité sèche maximale baisse et la teneur en eau optimale augmente avec l'ajout de chaux (figure IV.14) des trois argiles.

Cette variation dépend de la quantité de chaux ajoutée : plus celle-ci est élevée, plus la teneur en eau est portée vers les fortes teneurs et plus la densité est faible (Rao and Shivananda 2005 ; Nalbantoglu 2006). La réaction pouzzolanique entre l'argile et la chaux est l'autre cause de l'augmentation de la teneur en eau (Rao et Shivananda, 2005 ; Nalbantoglu, 2006 ; Attima et al, 2014).

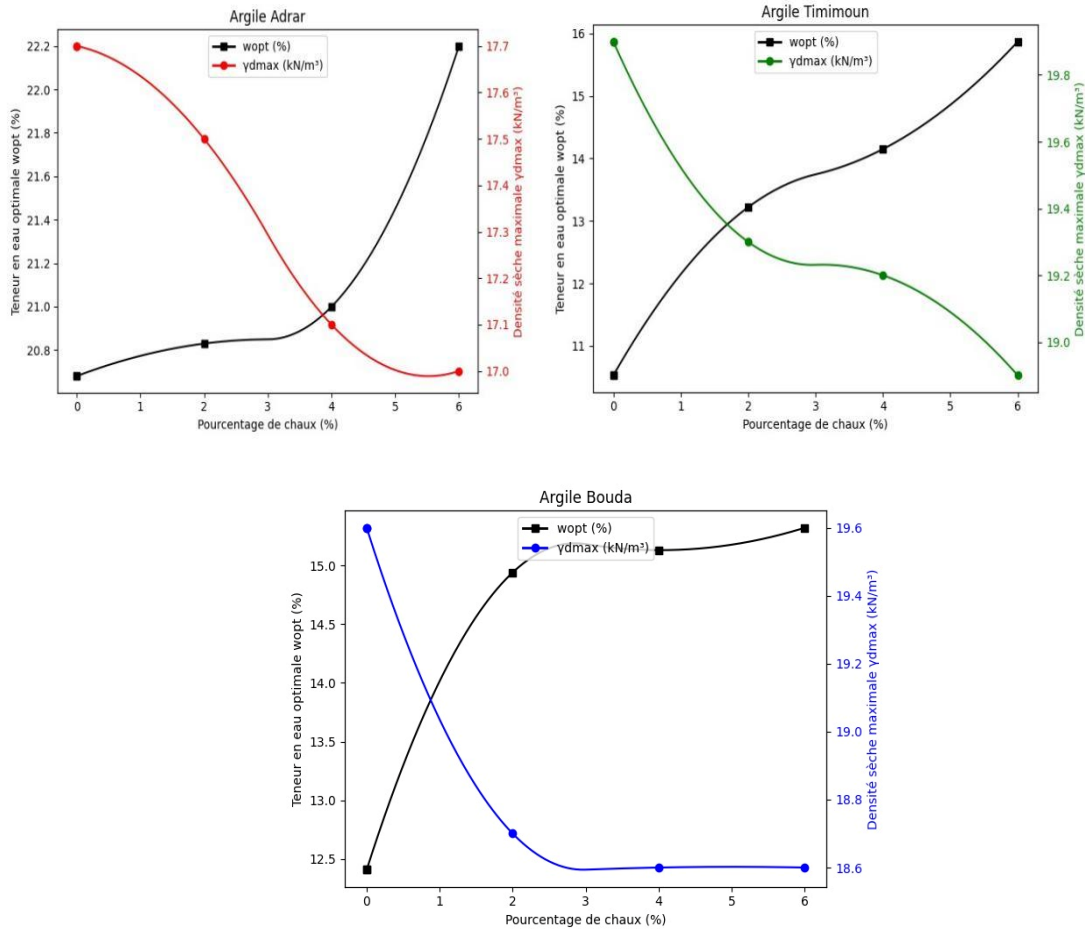


Figure IV. 13: L'évolution de la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale pour chaque type d'argile AA, AT et AB en fonction du dosage en chaux

Plusieurs chercheurs ont observé le même comportement. Ils ont effectué des essais Proctor sur des sols stabilisés à la chaux (Bell, 1996 ; Afès and Didier et al., 2000 ; Khattab et al., 2007 ; Bourokba et al., 2015 ; Djelloul, 2016 ; Olini and Olinic, 2016 ; Driss et al., 2018 ; Zhu Li et al., 2018 ; Moretti et al., 2020 ; GhavamShirazi and Bilsel, 2021 ; Dharmendra and Sujit, 2022 ; Shahzaib Sharif et al., 2024).

Les courbes Proctor (Figure IV.14) montrent que l'argile de Timimoun présente une densité sèche maximale (γ_{dmx}) plus élevée que celle des autres argiles. En revanche, l'argile d'Adrar nécessite une teneur en eau plus importante, en raison de sa forte proportion en particules fines (46 % d'éléments inférieurs à 2 μ m). Les courbes Proctor de l'argile d'Adrar avec la chaux présente une forme relativement aplatie (très observé pour 6%) par rapport à celles des argiles de Timimoun et de Bouda, ce qui est favorable à son utilisation dans une barrière passive pour un centre de stockage des déchets (CSD). En effet, une courbe Proctor peu marquée (plate) indique une plus grande autorisation aux variations de teneur en eau lors de la mise en œuvre du matériau, qu'une courbe « pointue », ce qui constitue une particularité en termes d'ouvrabilité pour ce type d'application.

IV.4 Conclusion

En conclusion, la valorisation de ces argiles locales est prometteuse sur le plan économique et technique, mais nécessite une amélioration de leurs propriétés, pour notre cas un traitement à la chaux, a conduit aux conclusions suivantes :

L'ajout de la chaux aux sols argileux entraîne une amélioration immédiate de l'ouvrabilité, qui se traduit par une réduction de la plasticité marquée par un abaissement de l'indice de plasticité (I_p), par voie de conséquence une forte augmentation de la limite de plasticité (w_p), une plus faible augmentation de la limite de liquidité (w_L) ont été enregistrées.

Le traitement à la chaux a pour effet de réduire la proportion de fines argileuses très réactives, ce qui se manifeste par une diminution de la valeur au bleu de méthylène. Cette réduction traduit une baisse de l'activité argileuse, rendant le sol moins plastique et plus stable. Ce changement justifie une reclassification du sol, donc mécaniquement plus performants et mieux adaptés à la construction. Par ailleurs, ces sols deviennent moins sensibles aux variations d'humidité, ce qui réduit les risques d'instabilité hydrique (gonflement, retrait) et de ruptures structurelles liées aux argiles gonflantes.

Avec l'augmentation du pourcentage de la chaux de 2 à 6%, la densité sèche maximale diminue, par contre, la teneur en eau optimale augmente. La réduction de la densité sèche maximale qui est due à la réorganisation des particules argileuses est causée par le phénomène de floculation et l'agglomération, sont des réactions physico-chimiques induites par la chaux qui modifient la structure des argiles, réduisent leur plasticité et modifient leur comportement au compactage. Ces effets sont généralement bénéfiques pour la stabilisation des sols, car la chaux améliore la portance et la stabilité, même si la densité sèche maximale diminue légèrement.

Chapitre V :

Mesure de la perméabilité

Chapitre V: Mesure de la perméabilité

V.1 Introduction

On sait que la perméabilité est le paramètre fondamental à prendre en compte dans la conception des barrières argileuses destinées aux CSD, elle doit être inférieure ou égale à $5\text{m}\times 10^{-9}$ m/s pour le stockage des déchets dangereux (suivant les règlements Algériennes chapitre II.2.3.3.2), autour de la valeur basée sur l'optimum Proctor modifié (OPM).

L'objectif de ce chapitre est d'observer le comportement hydraulique mécanique de l'argile naturel et traités à la chaux à des pourcentages de 2, 4 et 6 %.

Dans une première partie, ils se trouvent les résultats expérimentaux au moyen de l'essai de l'œdomètre pour mesurer indirectement la perméabilité des trois argiles. Dans cette technique, deux types de calculs seront utilisés, l'un de Taylor et l'autre de Casagrande, par la suite, on a choisi l'argile le plus imperméable pour la continuité de ce chapitre. En second, les essais mécaniques étaient réalisés sur l'argile choisie (AA) naturels et traitée à la chaux 2,4 et 6% ; tel que le gonflement libre, la pression de gonflement, la compressibilité, la consolidation, le cisaillement et la perméabilité indirect par Taylor et Casagrande. Dans la troisième partie, la mesure de la perméabilité de l'argile naturel et traité sera effectuée par la méthode directe, on utilisera l'appareil triaxial de GDS, avec la charge de déchets 250 kPa (Billard, 2001). En dernier, on passera à la comparaison des valeurs de la perméabilité par les deux méthodes, l'une directe et l'autre indirecte, et la perméabilité de notre étude par rapport aux travaux antérieurs.

V.2 Mesure indirecte de la perméabilité des trois types d'argiles

V.2.1 Définition de l'essai

Les méthodes indirectes d'évaluation de la perméabilité k (m/s) sont basées sur les résultats de l'essai odométrique des échantillons remaniés, à partir des courbes de compressibilité et de la consolidation à l'optimum du Proctor modifié (l'OPM est choisi car il reflète bien l'effet du mode de compactage sur la perméabilité (Daoud, 1996). De la figure V.1, on peut constater que le mode de compactage agit bien sur la perméabilité, à cause de sa microstructure différente obtenue. En effet, la perméabilité du compactage au Proctor modifié est plus faible que celle du compactage au Proctor normal Figure V.1.

La perméabilité k est obtenue à partir du coefficient de consolidation C_v (m^2/s) évalué par l'approche de Taylor et/ou Casagrande, et le coefficient de compressibilité volumique m_v (m^2/kN). Dans cette méthode, les coefficients C_v et m_v sont déduits respectivement des courbes de compressibilité et de consolidation. Les méthodes de Taylor et de Casagrande permettent de déterminer la valeur de la perméabilité (k) en fonction de ces paramètres selon la formule suivante :

$$k = C_v \cdot \gamma_w / E' ;$$

C_v : coefficient de consolidation ; E' : module œdométrique ; γ_w : poids volumique de l'eau.

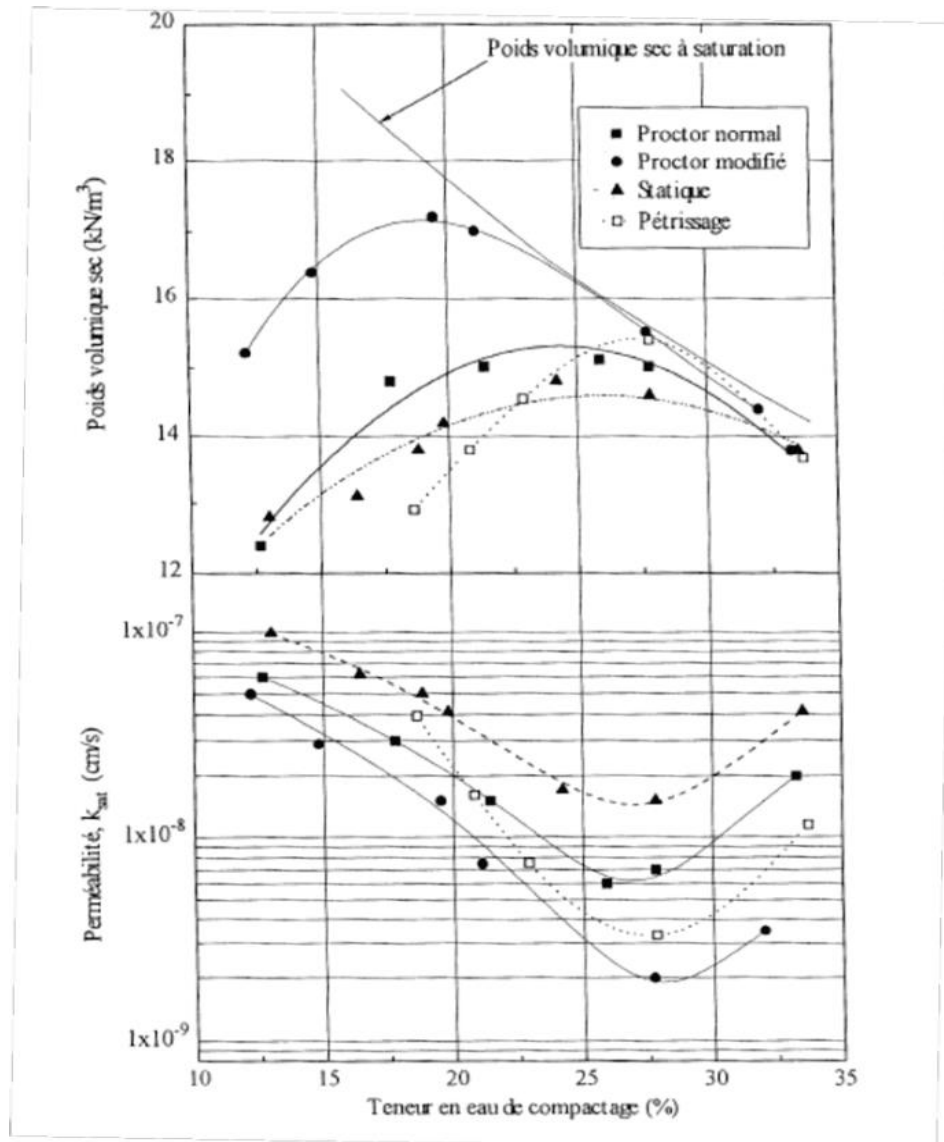


Figure V. 1: L'effet de la teneur en eau de l'énergie de compactage sur la perméabilité (d'après Daoud,1996)

V.2.2 Perméabilité saturée à l'eau des trois types d'argiles

Le tableau V.1 présente les résultats de la perméabilité calculée par l'essai œdométrique par un palier de 32 bars, on peut conclure que l'argile AA est **très imperméable** par rapport à l'argile AB et AT.

De ce fait, l'argile maintenue dans la suite de notre étude est AA.

Tableau V. 1: Résultats des coefficients de consolidation et de perméabilité sur les trois types d'argiles

Type d'argile		Argile Adrar	Argile Timimoun	Argile Bouda
Méthode de Taylor	Coefficient de consolidation $C_v(\text{cm}^2/\text{s})$	$0,085.10^{-3}$	$0,444.10^{-3}$	$0,250.10^{-3}$
	Perméabilité $k(\text{m/s})$	$2,03.10^{-10}$	$5,27.10^{-10}$	$3,73.10^{-10}$
Méthode de Casagrande	Coefficient de consolidation $C_v(\text{cm}^2/\text{s})$	$0,171.10^{-3}$	$5,01.10^{-3}$	$0,720.10^{-3}$
	Perméabilité $k(\text{m/s})$	$4,10.10^{-10}$	$5,94.10^{-9}$	$1,07.10^{-9}$

V.2.3 Effets de la chaux sur les propriétés du mélange choisi argile Adrar-chaux

Afin d'obtenir la combinaison des sols requises des mélanges d'argile Adrar AA et de chaux C ont été considérés dans cette étude : 2% C + 98% AA ; 4% C + 96% AA et 6% C + 94% AA. La détermination de la proportion minimale d'argile par rapport à la chaux doit permettre d'obtenir une perméabilité appropriée (de 10^{-8} à 10^{-10} m/s) ou moins (Chapuis 1990). Des essais de gonflement libre, la compressibilité, le cisaillement ainsi que la perméabilité ont été réalisés à la teneur en eau optimale de l'essai Proctor modifié (Chapuis 1990 ; Daniel and Wu 1993 ; Bounouara et al. 2020 ;) suivant la norme NFP 94-093. Les échantillons ont été compactés jusqu'à la densité sèche maximale des courbes de compactage. Tous les mélanges étaient préparés manuellement et soigneusement afin d'obtenir une homogénéité remarquable et ont passés au compactage statique.

V.2.3.1 Effet de la chaux sur les paramètres de potentiel de gonflement et la pression de gonflement

Les essais ont été réalisés au niveau du laboratoire de l'université d'Oran ENSET (ENPO). L'essai du potentiel de gonflement est réalisé sur des échantillons naturels et traités.

. D'après les résultats, le gonflement se stabilise entre 6 et 9 jours. Les gonflements se propagent rapidement au début pour atteindre 78 % du maximum au bout de 24 h (Muntohar, 2003) dans certains cas, puis ralentissent rapidement par la suite, la stabilisation débutant à partir du 4ème jour. Ces résultats corroborent ceux de (Hachichi et al, 2003 ; Bourokba et al, 2003 ; Bourokba et al, 2015 ; Smaida et al, 2021).

Les argiles qui échangent des cations de groupe des alcalins tel que Na^+ , K^+ , etc. avec des cations Ca^{+2} apportés par la chaux développeront en théorie des forces électriques capables de provoquer l'agglomération des fines particules d'argile, à motif diverses, les particules plus grossières et cassantes. La présence de la chaux permettrait d'imprégner les charges électriques autour des particules d'argile, pour permettre une modification des champs électriques de celles-ci, créant une attraction entre elles qui les fait flocculer (Cokca et al, 2009).

Les courbes de la figure V.2 montrent l'évolution de la hauteur du gonflement libre en fonction du logarithme du temps [$\Delta H/H = f(\log(t))$] pour les mélanges argile/chaux. Le tableau V.2 résume les résultats de gonflement libre (G_L) et de la pression de gonflement (P_g). L'allure de la courbe d'évolution du gonflement libre dans le temps est identique pour tous les mélanges, on distingue deux phases de gonflement, un gonflement primaire qui prend place très tôt, sa fin est caractérisée par un point d'inflexion permettant la modification de l'allure de la courbe et qui précède à un gonflement secondaire qui est identifié par la portion linéaire de la courbe (Holtz and Kovacs, 1981).

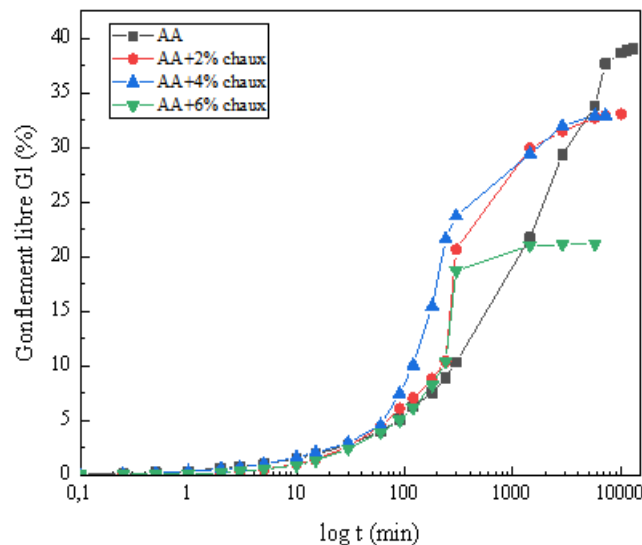


Figure V. 2: Évolution du potentiel de gonflement des échantillons non traités et traités en fonction du temps (Khedidja. B et al, 2024)

Tableau V. 2 : Variation des paramètres de gonflement des échantillons traités et non traités

Pourcentage de chaux (%)	0%	2%	4%	6%
Potentiel de Gonflement G_L (%)	39.05	33.3	32.95	21.35
Pression de gonflement P_g (kPa)	127,4	122,2	112,0	101,9

La figure V.3 illustre l'effet des différentes quantités de chaux sur le potentiel de gonflement des échantillons traités.

On observe que le sol expansif possède un potentiel de gonflement élevé de 39,05% non traité. Les résultats montrent que l'ajout de 2, 4 et 6% de chaux a réduit le potentiel de gonflement à 33,3 ; 32,95 et 21,35 % respectivement. Ceci montre que l'augmentation de la chaux réduit significativement la capacité de gonflement du sol expansif (Afès and Didier, 2000 ; Bourokba et al, 2015 ; Djelloul, 2016 ; GhavamShirazi and Bilsel, 2021 ; Rosone et al, 2019 ; Moretti et al, 2020 ; Smaida et al, 2021), à l'issue de l'échange cationique qui est

d'autant plus marqué que le pourcentage de chaux est important, mais aussi par le développement d'une matrice cimentaire capable de résister à l'expansion (Basma and Tuncer, 1991; Belabbaci, 2014).

Ce comportement peut être expliqué par la réaction pouzzolanique entre la chaux (Ca^{2+}) et la silice (SiO_2) qui a lieu après la séparation de la silice des minéraux argileux. Dans l'ensemble, sur la base des résultats de l'essai de gonflement, on peut conclure que la stabilisation de l'argile expansive avec la chaux améliore significativement les caractéristiques de gonflement. Ces résultats sont en bon accord avec les observations des micrographies du MEB qui seront décrites dans les sections suivantes (figure V.10.c.)

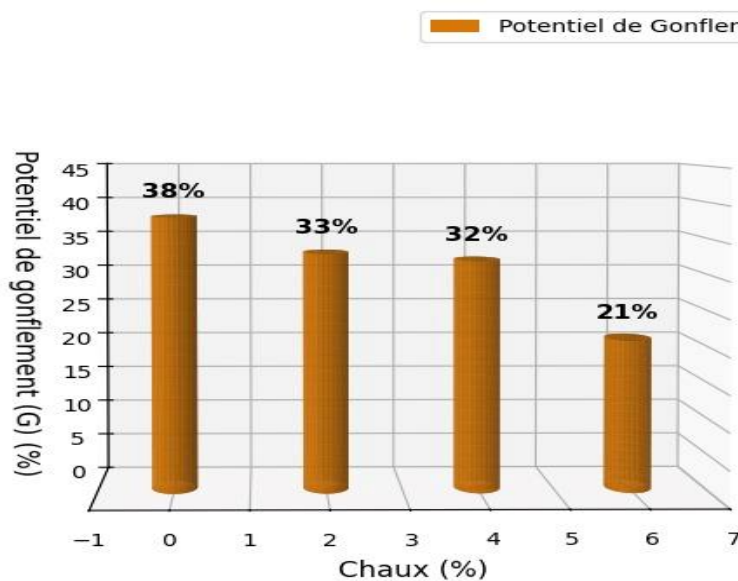


Figure V. 3: Évolution de potentiel de gonflement de l'argile par rapport aux % chaux

V.2.3.2 Effet de la chaux sur les paramètres de compressibilité à partir des essais œdométriques :

L'effet du traitement de l'argile AA sur la compressibilité est étudié à travers l'indice de compression C_c et l'indice de gonflement C_s . Graphiquement, dans le plan (e - $\log r'$), C_c et C_s représentent les pentes de chargement et de déchargement. Les essais de consolidation ont été réalisés sur des échantillons identiques (non traités et traités à la chaux) à l'aide d'un anneau de diamètre $U = 50$ mm et de hauteur $H = 20$ mm conformément à la norme NF P94-090-1.

Les échantillons choisis sont (2%, 4% et 6% de chaux). Après compactage statique des échantillons identiques à la densité sèche maximale et à la teneur en eau optimale et sous la pression de gonflement, la saturation est effectuée en fonction du dosage de la concentration. La période de chargement ne commencera qu'après la stabilisation de la pression de gonflement. La figure V.4 montre les courbes de chargement et de déchargement pour les différents % de chaux. Le tableau V.4 résume les différentes valeurs de C_c et C_s pour les différents mélanges étudiés.

En comparant globalement ces courbes, nous constatons une différence dans les indices des vides. A partir des courbes de consolidation montrées sur la figure V.4, nous pouvons déterminer l'indice de compressibilité C_c et l'indice de gonflement C_s .

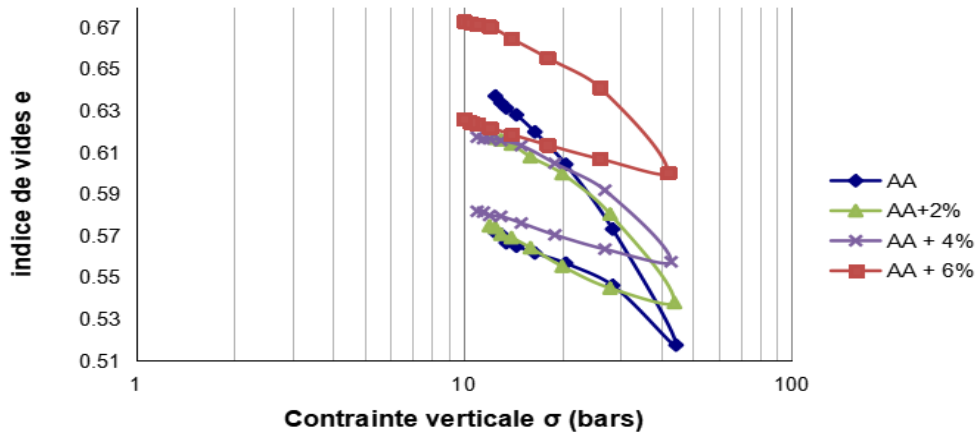


Figure V. 4: Courbes de compressibilité en fonction du % de chaux

La variation des indices de compressibilité et de gonflement en fonction du pourcentage de la chaux ajouté sont présentés dans le tableau V.3. L'amélioration des caractéristiques mécaniques de l'argile traitée se traduit par une faible compressibilité, équivalant à plus de résistance et moins de tassement et de déformation suite à un chargement.

De même pour l'indice de gonflement, il a subi à son tour une diminution significative, cela est lié essentiellement à la réaction d'échange cationique. En effet, le calcium libre issu de la chaux s'échange avec les cations adsorbés présents à la surface du minéral argileux permettant aux particules d'argile de se rapprocher et converger les unes des autres, entraînant une floculation/agglomération des particules d'argile qui transforment l'argile en un matériau plus granulaire (Basma and Tuncer, 1991 ; Nalbantoglu and Tuncer, 2001 ; Khattab and Adrees, 2002 ; Djelloul, 2016).

Tableau V. 3 : Paramètres de compressibilité des échantillons traités et non traités

Désignation	AA	AA+2% C	AA+4% C	AA+6% C
Indice de compressibilité C_c	0,289	0,213	0,168	0,196
Indice de Gonflement C_s	0,149	0,0356	0,0296	0,0288
$C_c/(1+e_0)$	0,176	0,132	0,104	0,117

On peut conclure aussi selon la classification de (Costet, Sanglerat et al, 1969), que le sol AA est une argile moyenne, d'où les mélanges peuvent être décrits comme des argiles raides ($0,10 < C_c < 0,25$).

Les effets des stabilisants sur la compressibilité ne sont pas suffisants. Selon la classification de Philipponnat et Hubert 1997 de Tableau III. 26, en ce qui concerne la compressibilité, nos mélanges peuvent être classés parmi les sols moyennement incompressibles $0,05 < C_c/(1+e_0) < 0,2$. Tandis que la légère diminution de l'indice de

compression est accompagnée d'une diminution significative de l'indice de gonflement qui varie entre 0,149 et 0,0288. Selon la classification du risque de gonflement en fonction de (Cs) (G.Philippinot 1978, Tableau III. 27), l'argile d'Adrar AA était classée de risque certain de gonflement, en revanche que le mélange AA+2% est a grand risque de gonflement, d'où les deux autres mélanges (4% et 6% de chaux) ont un gonflement probable.

Ces résultats confirment la réduction des paramètres de gonflement.

V.2.3.3 Variation du coefficient de consolidation C_v de l'argile non traitée et traitée à la Chaux

Les essais de consolidation réalisés ont permis d'évaluer le coefficient de consolidation (C_v), un paramètre essentiel pour l'estimation indirecte de la perméabilité. La figure V.5 illustre l'influence de différents taux de chaux sur C_v , pour l'argile naturelle et traitée, en se basant sur les méthodes de Taylor et la méthode de Casagrande, avec un incrément de pression de 32 bars, correspondant à la contrainte verticale maximale appliquée.

Les résultats obtenus montrent que le C_v de l'argile d'Adrar se situe autour de $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, ce qui est cohérent avec les valeurs typiques des sols fins (10^{-2} à $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, selon Magnan, 2000). On observe une légère augmentation du coefficient de consolidation avec l'ajout de chaux jusqu'à 4 %, ce qui confirme les tendances rapportées dans la littérature (Nguyen, 2015 ; Djelloul, 2016). Cette amélioration est liée aux réactions physico-chimiques :

- Échange cationique
- Floculation et agglomération des particules fines (Mécanismes décrits par Herzog & Mitchell, 1963 ; Nalbantoglu & Tuncer, 2001 ; Lasledj, 2009)

En parallèle, la granularité accrue du sol favorise une perméabilité plus élevée (Basma & Tuncer, 1991). Cependant, au-delà de 4 % de chaux, une légère diminution de C_v est constatée, probablement en lien avec un excès de produits de réaction réduisant l'efficacité de la dissipation des pressions interstitielles.

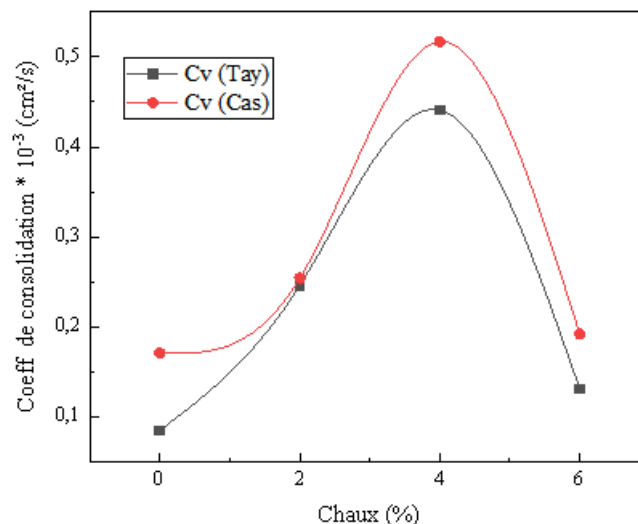


Figure V. 5: Coefficient de consolidation C_v en fonction de la chaux par la méthode de Taylor et Casagrande (Khedidja. B et al, 2024)

V.2.3.4 Effet de la chaux sur les paramètres de cisaillement

L'objectif de cette partie expérimentale est de d'évaluer les paramètres de résistance au cisaillement non drainé non consolidé pour l'argile traitée en présentant l'effet de la chaux sur notre échantillon qui a de meilleures performances en ce qui concerne le gonflement libre et la pression de gonflement. L'essai de cisaillement direct a été utilisé. L'état d'essai réalisé dans cette étude est l'état non saturé (teneur en eau constante).

Les mélanges ont été découpés à l'aide d'un moule de forme carrée, de 60 mm x 60 mm et hauteur de 20 mm, identique à la cellule de la boîte de cisaillement. Après compactage statique (sec) à la densité sèche et au taux d'eau optimaux, les surfaces supérieure et inférieure sont nivelées et lissées de façon à être en contact correct l'une sur l'autre selon la norme NF P 94-071-1. L'échantillon est ensuite placé dans la boîte de cisaillement et sera directement cisailé jusqu'à la rupture avec une vitesse de cisaillement constante (1 mm/min).

La figure V.6 montre la variation de la cohésion et de l'angle de frottement pour les différents mélanges à la chaux (2 %, 4 %, 6 %). Les pressions normales utilisées pour réaliser ces essais sont : $\sigma_1 = 100$ kPa ; $\sigma_2 = 200$ kPa et $\sigma_3 = 300$ kPa. Chaque courbe représente la relation entre la contrainte normale (σ) et la contrainte tangente maximale ($\tau_{\max}$). Les paramètres Mohr-Coulomb (angle de frottement interne ϕ et cohésion non drainée C_{uu}) sont indiqués dans la légende de la figure V.6.

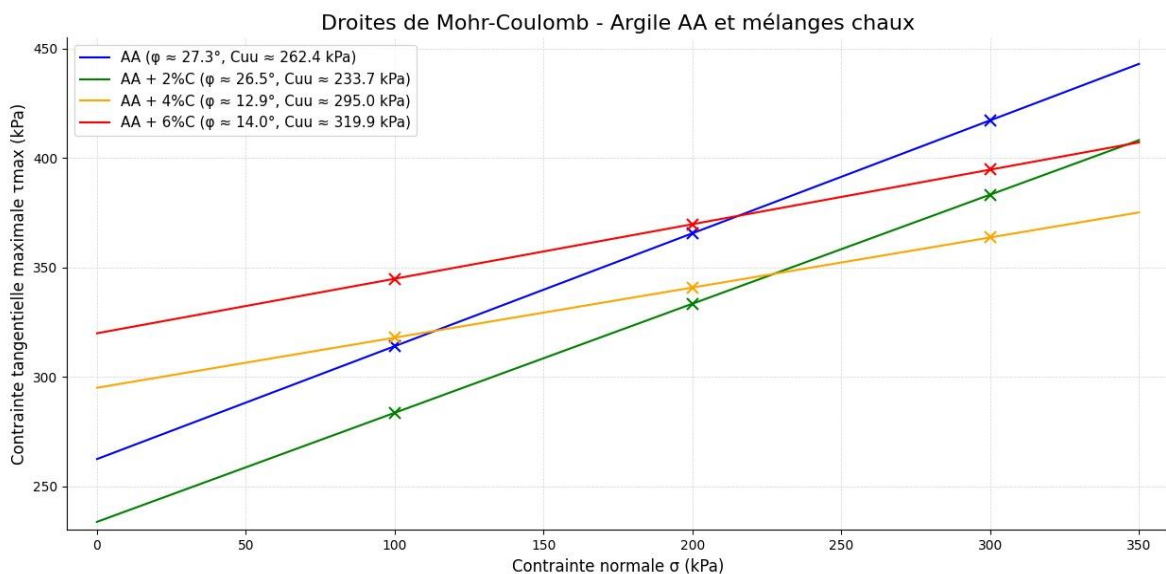


Figure V. 6: Courbes des paramètres de l'essai de cisaillement sans et avec traitement à la chaux

Le tableau V.4 présente l'évolution de la résistance au cisaillement maximale ($\tau_{\max}$) du sol argileux en fonction du taux de chaux ajouté. Dans un premier temps, l'ajout de chaux jusqu'à 4 % entraîne une diminution notable de la résistance au cisaillement.

Cela peut s'expliquer par une désorganisation initiale de la structure du sol due à la floculation rapide des particules fines, qui affaiblit temporairement la cohésion. Au-delà de 4 %, la résistance commence à augmenter légèrement, et cette tendance se confirme jusqu'à 6 %, indiquant une reconstruction progressive de la microstructure du sol. Cette évolution traduit un comportement mécanique transitoire typique des sols stabilisés :

Phase 1 ($\leq 4\%$) : affaiblissement temporaire dû à la dispersion et à la restructuration initiale.

Phase 2 ($> 4\%$) : amélioration progressive liée à la formation de produits cimentaires (C-A-S-H), qui renforcent la matrice solide. Ainsi, un seuil optimal de 6 % de chaux permet d'obtenir un équilibre mécanique favorable, avec une structure plus stable et résistante à long terme.

La figure V.7 présente la variation des paramètres au cisaillement (la cohésion et l'angle de frottement) en fonction des pourcentages de chaux. La cohésion augmente avec le pourcentage de chaux, passe de 262 pour l'argiles non traités vers 319,9 kPa pour 6% chaux de traitement ; tandis que l'angle de frottement a subi une baisse remarquable avec l'augmentation de chaux de $27,34^\circ$ sans traitement à $13,98^\circ$ pour 6% de traitement.

Le stabilisateur adopté dans cette étude montre une augmentation de la résistance au cisaillement en raison de l'augmentation de la cohésion entre les particules. Ceci est en accord avec les études de (Smaida et al, 2021 ; Shahzaib S et al 2024).

L'incorporation de liant hydraulique tel que la chaux, améliore la résistance au cisaillement, réduit la sensibilité à l'eau, augmente la cohésion non drainée, la rigidité, la capacité portante, l'assèchement du sol humide, améliore la friabilité et réduit le gonflement et le retrait (Nally, 1998). L'effet de l'ajout de chaux sur les paramètres mécaniques est important.

Tableau V. 4 : Résistance au cisaillement pour les mélanges sol argileux-chaux à différentes proportions

Paramètres de cisaillement	0% C	2% C	4% C	6% C
Résistance de cisaillement pic $\sigma_3=300$ kPa	417,5	383,0	363,9	394,5

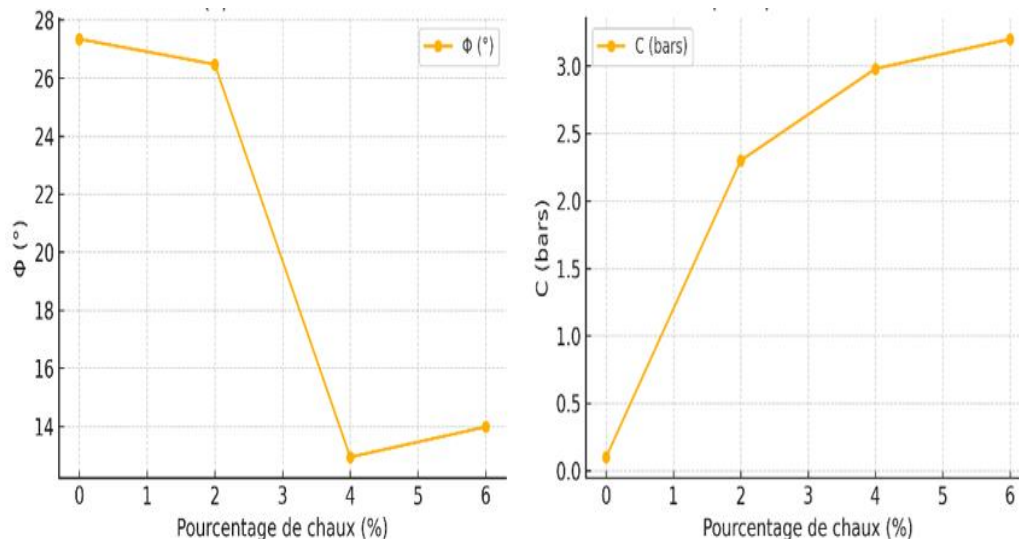


Figure V. 7: Les paramètres de l'essai de cisaillement pour les mélanges AA+%C

V.2.3.5 Perméabilité saturée à l'eau des mélanges (argile choisie et la chaux)

V.3 Mesure directe de la perméabilité de l'argile d'Adrar

V.3.1 Définition de l'essai

Les essais ont été réalisés dans le laboratoire EOLE de l'Université de Tlemcen (Figure V.8), sur un appareillage de type « porte d'eau » permettant de tester des éprouvettes de forme cylindrique (70 mm x 35 mm) dans un environnement soumis à une contrainte de confinement isotrope jusqu'à 1,7 MPa, à l'aide des contrôleurs de pression/volume de type « GDS ». Cependant, nous avons adopté pour ce travail une contrainte de 250 kPa (vue que l'appareil n'est toujours pas disponible à tous les doctorants en même temps, on a éliminé l'essai pour 125kPa), la valeur de 250 kPa correspond à une hauteur de déchets de 30 mètres (Rahmani, 2014). L'écoulement se fait verticalement du bas vers le haut. L'essai est réalisé sur tous les mélanges (0, 2, 4 et 6% de chaux).

V.3.2 Méthodologie et calcul

L'éprouvette est préparée par compactage statique aux conditions du Proctor modifié optimale. La technique de compactage statique est choisie car elle permet une meilleure homogénéité des éprouvettes. Une première contrainte de confinement de $\sigma'_3=100$ kPa est appliquée dans un premier temps, Par la suite une faible contre pression à la base de l'échantillon ($u_e = 20$ kPa) est appliquée (u_e : base pressure), afin d'éliminer les bulles d'air et assurer la saturation entre la membrane et l'échantillon. On augmente progressivement la contrainte de confinement et de la contre pression (toujours à la base) pour permettre le dégagement des bulles d'air existant dans les tubes de connexion ($u_e = 30, 40$ kPa) tout en maintenant la contrainte effective moyenne constante et en maintenant le robinet de sortie ouvert ($u_s = 0$ kPa), (u_s : back pressure), la pression interstitielle au sommet de l'échantillon. La déformation verticale des échantillons en fonction du temps a été enregistrée et les échantillons ont été considérés comme saturés lorsque le déplacement du piston est devenu constant (moins de 10 %), (moins de 0,01 mm en 24 h) (Souli et al. 2008). Après avoir atteint la saturation, on applique la contrainte de confinement souhaitée et qui est toujours supérieure à la contre pression appliquée à la base de l'échantillon $\sigma'_3=250$ kPa (cell pressure). A la sortie de l'échantillon, une contre pression est appliquée et qui égale à celle de la base ($u_e = u_s = 100$ kPa). En maintenant u_s constants, on augmente u_e , dans notre cas $u_e = 200$ kPa. La perméabilité a été calculée en utilisant la loi de Darcy, qui décrit la relation entre la quantité d'eau qui s'écoule à travers une section transversale pendant un certain temps. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$v = Q/A = k i$$

Ou v : flux de Darcy (m/s) ; Q : débit d'écoulement(m³/s) ; A : section de l'échantillon ;

i : le gradient hydraulique calculée par l'expression suivante :

$$i = \Delta u / \gamma_w H$$

Où Δu est la différence de pression entre l'entrée et la sortie de l'échantillon ($u_e - u_s$) [kPa]

H : Hauteur de l'échantillon [m]

γ_w : le poids volumique de l'eau [kN/m³]

Pour la détermination de la perméabilité en saturé, et en satisfaisant la loi de Darcy, on suit les étapes suivantes :

- On fixe un intervalle de temps compris entre t_1 et t_2 ($\Delta t = t_1 - t_2$), t [s].
 - On détermine la variation de volume dans cet intervalle de temps ($\Delta V = V_e - V_s$), V [mm³]
 - On détermine le débit de l'écoulement ($Q = \Delta V / \Delta t$), Q [mm³/s]
 - On détermine la vitesse de l'écoulement ($v = Q/A$), avec A : la section droite de l'échantillon,
 - On détermine la valeur de k à partir de loi de Darcy :
- $v = k i$ avec i : gradient hydraulique.

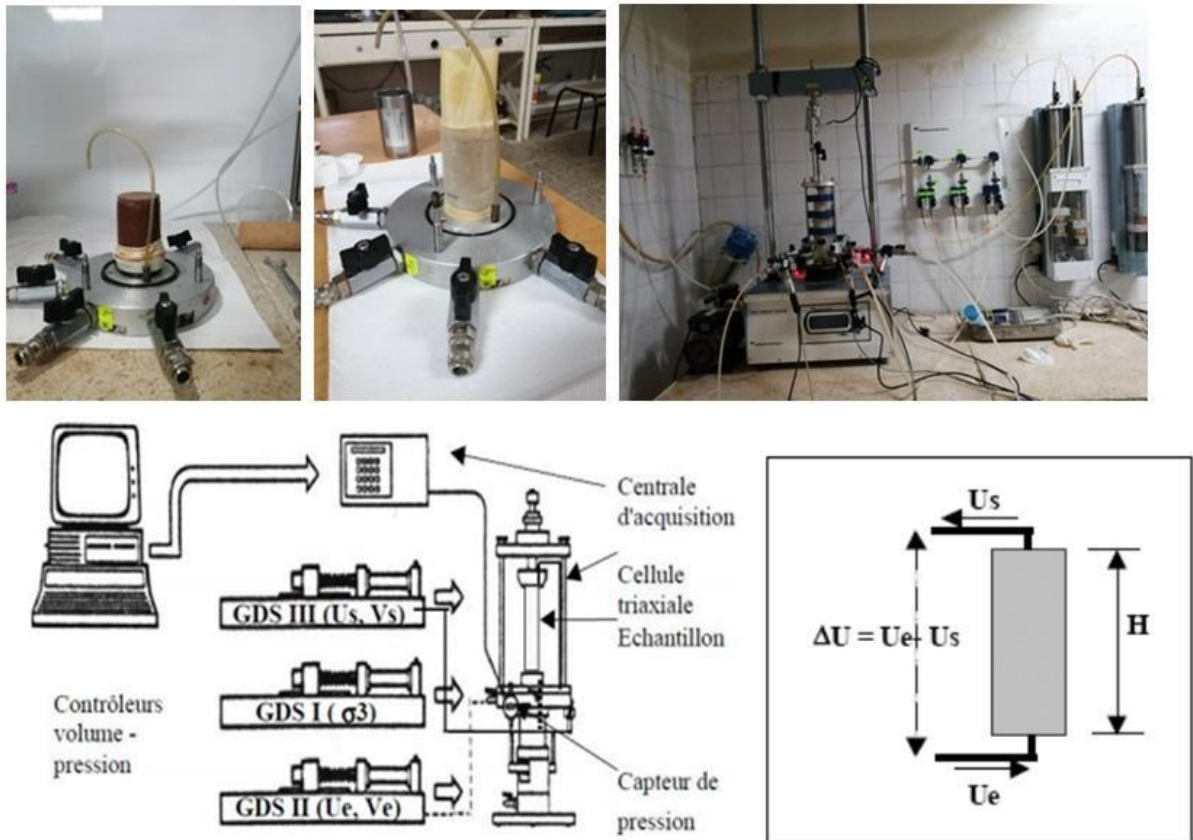


Figure V. 8: Cellule triaxiale et son système de contrôle pression-volume (GDS) et d'acquisition HP Agilent 34970A

V.3.3 Effet de la chaux sur la perméabilité des mélanges

La variation de la perméabilité des mélanges de l'argile avant et après traitement à différents pourcentages de chaux mesurés directement est illustrée sur la figure V.9.

Les résultats montrent qu'après l'ajout de chaux au sol expansif, la perméabilité augmente légèrement, mais après 4% de chaux on a une chute brutale de ce paramètre hydrique soit en % ($1,6 \cdot 10^{-9}$ vers $1,1 \cdot 10^{-12}$ m/s) dans le cas d'un ajout de chaux de 0 à 6% respectivement. Quant à l'effet de la quantité de chaux ajouté, selon (Brandl, 1981 ; McCallister, 1990 ; McCallister and Petry 1992 ; Locat, Trembaly et al. 1996 ; Nalbantoglu and Tuncer, 2001;), la perméabilité des sols traités à la chaux augmente initialement jusqu'à l'ajout d'une valeur seuil de chaux appelée Point de Fixation de la Chaux (PFC) qui représente la quantité minimale nécessaire pour initier les réactions pouzzolaniques à long terme (Hilt and Davidson 1960 ; Eades and Grim 1966), au-delà de cette valeur, la perméabilité des sols traités stagne, voire diminue. Des explications sont avancées par ces auteurs (Locat et al, 1996 ; Brandl, 1981 ; McCallister, 1990 ; ; McCallister and Petry, 1992 ; Nalbantoglu and Tuncer, 2001) pour expliquer ces variations.

Ainsi, ils supposent que lorsque le pourcentage de chaux est inférieur au PFC, l'augmentation de la perméabilité observée est liée à la moins bonne aptitude du sol à être compacté entraînent une diminution progressive de sa densité sèche. Tandis que lorsque le dosage en chaux est supérieur au PFC, ils supposent que les baisses de densité sont compensées par la formation en grande quantité de produits cimentaires qui colmatent les pores, limitant ainsi la circulation de l'eau et réduisant la perméabilité (Le Runigo, 2009).

D'après les auteurs (McCallister ,1990 ; McCallister and Petry, 1992) la phase de diminution de la perméabilité repose sur la formation croissante des produits cimentaires (C-A-S-H) au cours du temps de percolation, venant boucher les pores. Les auteurs suivant sont conclus qu'avec le temps de durcissement dépassant 7 jours, la perméabilité du sol stabilisé diminue avec le temps de durcissement (Tsai and Vesilind, 1998 ; Al-Kiki et al, 2008 ; Metelková, et al. 2011).

V.3.4 Comparaison de la perméabilité des mélanges par les deux méthodes, directe et indirecte

La figure V.9 illustre aussi la comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes (Taylor, Casagrande et triaxial) et la méthode triaxiale. Les résultats de la perméabilité obtenus par les essais œdométriques sont plus grands que ceux obtenus par la cellule triaxiale, pour le mélange 6% de chaux, la perméabilité est largement significative par la méthode triaxial ($1,1 \times 10^{-12}$ m/s) que celle de la méthode de Taylor ($2,45 \times 10^{-10}$ m/s).

Les valeurs cibles relatives à la perméabilité pour les contaminants doivent être comprises entre 10^{-8} m/s et 10^{-10} m/s, elles peuvent être atteintes à une teneur en chaux de 6 %. Une valeur de la perméabilité inférieure à $1,1 \times 10^{-12}$ m/s sous une pression verticale appliquée supérieure à 250 kPa est un résultat important qui mérite d'être signalé.

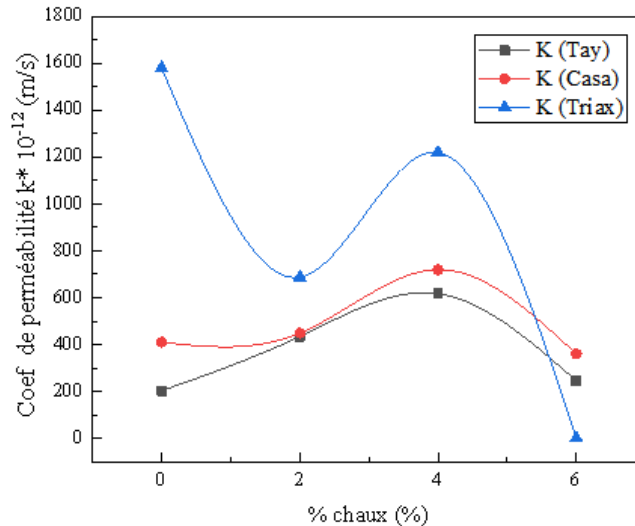


Figure V. 9: Perméabilité du mélange argile+chaux (par les méthodes de Taylor, Casagrande et triaxiale), (Khedidja.B et al, 2024)

V.3.5 Résultats de MEB et DRX sur le mélange choisie (AA+6%)

Dans le but d'obtenir un résultat précis et afin d'évaluer plus précisément les interactions entre l'additif et les particules d'argile du mélange à 6%, des tests de microscopie électronique à balayage MEB ont été réalisés sur les échantillons non traités à l'état brute figure V.10.a, broyé, figure V.10.b et traités broyé (à 6%) figure V.10.c et le DRX dans la figure V.11. D'après les images MEB de la figure V.10 et le DRX de la figure V.11, le sol devient plus granulaire avec l'augmentation du pourcentage de la chaux (Basma and Tuncer 1991).

La formation d'hydrate-alumino-silicate calcique de (C-A-S-H) (Eades and Grim 1966; Bell, 1996; Locat, 1996 ; Cabane, 2004) qui est mentionnée par un cercle dans la figure 10.c et de nouveaux pics dans l'intervalle de 20 à 40 pour figure 11, même résultats que (Moretti, 2020; Soltaninejad, 2023), cette formation est produite en raison de la réaction pouzzolanique, ce qui a contribué à l'amélioration des propriétés mécaniques (Locat et al, 1996; Millogo et al, 2012; Zhu et al, 2018; GhavamShirazi and Bilsel, 2021; Ural, 2021; Dharmendra and Sujit, 2022).

L'EDS de (la figure V.10.d.e) présente la comparaison entre les spectres de l'argile brute et traité à 6%, on remarque une réduction des pics attribuables à la fraction argileuse (Al, Si, K). La variation en pourcentage des éléments chimiques obtenue par les résultats de la microanalyse est remarquée par une réduction de ces éléments et une augmentation du pourcentage de Calcium, identique à (Soltaninejad, 2023). On note le passage de l'augmentation qui était de 0,8% pour l'argile brute à 12,6% pour le mélange à 6% de chaux, même remarque pour des pourcentages de 0, 3 et 5% de chaux vive (Raheem 2020).

Dans la littérature (Basma and Tuncer, 1991), ont conclu que les agents de floculation Ca^{2+} et Mg^{2+} augmentent avec ceux de la chaux, tandis que les agents de défloculation Na^+ et K^+ diminuent avec l'augmentation de la chaux.

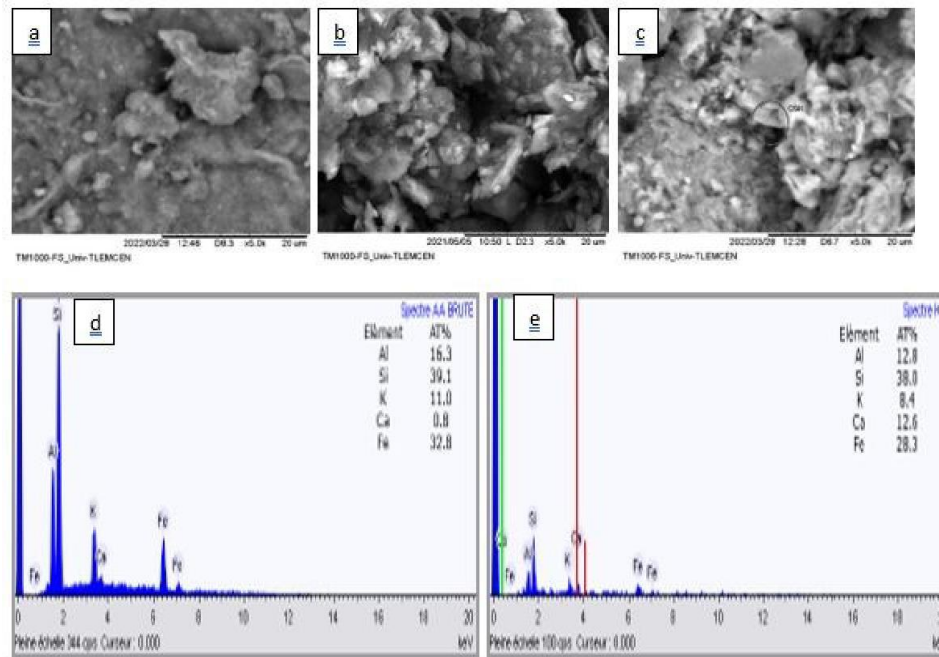


Figure V. 10: MEB et test EDS. argile non traitée non broyée (brute), b broyée, c argile traitée avec 6 % de chaux, d EDS de l'argile brute, e EDS de l'argile traitée avec 6 % de chaux.

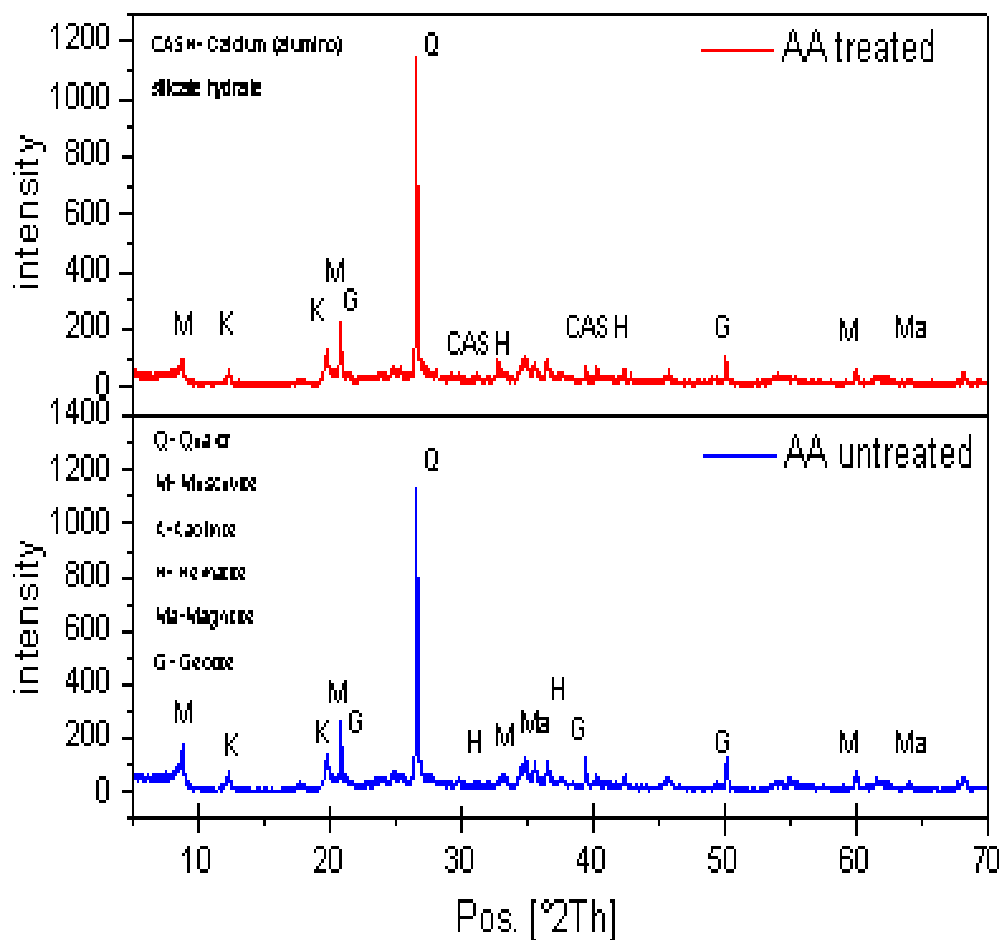


Figure V. 11 : Test XRD pour l'argile non traitée et traitée avec 6 % de chaux

V.3.6 Comparaison de la perméabilité du mélange choisie aux travaux antérieurs

Pour montrer l'importance des résultats trouvés dans cette recherche, le tableau V.5 montre à titre de comparaison les valeurs de la perméabilité à saturation pour plusieurs travaux et recherches antérieurs. Le tableau comporte cinq colonnes, la première et la deuxième indiquent l'auteur et l'année de publication des résultats. La colonne suivante donne le site et le pays, par contre la colonne 4 représente le mélange optimal retenu. La dernière colonne indique la valeur numérique du paramètre étudié. Selon ces résultats le mélange l'argile d'Adrar 6% de chaux a donné des bons résultats et une valeur importante de la perméabilité ($1,1 \times 10^{-12} \text{ m/s}$) à comparer par la Valeur minimale des travaux antérieurs et qui vaut $k = 1,16 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ pour (Heidarzadeh and Parhizi, 2019) un mélange de (30% sodium-bentonite + 70% Sable).

Tableau V. 5 : Comparaison de la perméabilité des CSDD des travaux antérieurs

Auteur (s)	Année	Ville pays	Mélange optimal	Valeur de k en m/s
(Gitipour, Hosseinpour et al, 2015)	2015	Tahran Iran	Bentonite + sel d'ammonium quaternaire d'hexadécyl-triméthyl ammonium (HDTMA) Bentonite ordinaire	$k = 5.2 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ au pétrole brut $k = 9.56 \times 10^{-11} \text{ cm/s}$ à l'eau
(Heidarzadeh and Parhizi, 2019)	2020	Kashan province, Iran	30% sodium-bentonite+ 70% Sable	$k = 1,16 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ au solution de phénol
(Gueddouda et al, 2016)	2016	Maghnia (B) South Algeria (S)	15% bentonite+ 85% Sable	$k = 4,58 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ à l'eau
(Tuncan, 2016)	2016	S : Eskisehir, Turkey Z : Balikesir, Turkey.	Mélange 30% sépiolithe en poids de zéolithe (S/Z = 0,3)	$k = 1.17 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ au mélange de cuivre (Cu) et de chrome (Cr)
(Shakir and Ali, 2019)	2019	Al- Nahrawan, Iraq.	Sol + 6% Bentonite sodique	$k = 6.83 \times 10^{-11} \text{ cm/s}$ à l'eau $k = 7.8 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ au pétrole brut
(Williams and Donaldson, 1980)	1981		Ranger Shale Fire clay Kosse Kaoline	$k = 38 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ à l'eau $k = 13.5 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ à l'eau $k = 220 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ à l'eau
(Dąbska, 2019)	2019	Poland	Boues d'adoucissement de la chaux compactées	$k = 4.0 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ à l'eau $k = 6.8 \times 10^{-11} \text{ cm/s}$ aux lixiviats municipaux
Notre étude	2024	Adrar Sud Algérie	94% argile + 6% chaux	$k = 1.1 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ à l'eau

V.4 Conclusion

L'intérêt de ce chapitre réside dans la présentation d'une méthodologie basée sur la valorisation des matériaux locaux de la région d'Adrar en vue de leurs utilisations dans les centres de stockage des déchets dangereux. Des essais ont été réalisés sur pour étudier l'influence de l'ajout de la chaux à une argile gonflante en fonction de plusieurs paramètres, tels que le potentiel de gonflement, la compressibilité ainsi que la perméabilité ce dernier étant un facteur déterminant dans la réalisation des CSD. Il en résulte ce qui suit dans cette recherche

Le potentiel de gonflement diminue avec l'augmentation du pourcentage de la chaux. Ceci est dû à la réduction de l'adsorption de l'eau à l'issue de l'échange cationique (les cations de sodium (Na^+) sont remplacés progressivement par les cations de calcium (Ca^{2+}) apportés par la chaux, qui ont une faible énergie d'hydratation, dans l'espace inter-foliaire).

Le coefficient de consolidation C_v augmente légèrement jusqu'à 4 % de chaux, grâce aux processus de l'échange cationique et à la floculation/agglomération. Au-delà de cette valeur, une diminution est observée. Entre les deux méthodes utilisées, la méthode de Taylor donne des valeurs de coefficient de consolidation inférieures à celles de Casagrande.

Une légère augmentation est indiquée de la perméabilité jusqu'à 4 % de chaux, suivie d'une chute brutale après cette valeur. Ce comportement est lié au Point de Fixation de la Chaux (PFC), qui donne la quantité minimale de chaux apte à déclencher des réactions pouzzolaniques efficaces à long terme. Au-delà de ce seuil (PFC), des produits cimentaires sont formés qui bloquent les pores, diminuent la perméabilité.

Les résultats des analyses minéralogiques par diffraction des rayons X (DRX) et microscopie électronique (MEB) indiquent une transformation successive de la matrice argileuse en matériau granulaire avec l'augmentation de la chaux. La formation de C-A-S-H est nettement visible dans le mélange AA + 6 % chaux. Les analyses EDS illustrent une augmentation du calcium (jusqu'à 12,6 %) pour le mélange de 6% et une diminution des éléments des autres constituants tel que le Potassium.

En se basant sur ces résultats, on peut valider le pourcentage de 6% de chaux pour assurer l'imperméabilisation avec un comportement mécanique adéquat des couches étanches des centres de stockage des déchets dangereux. Nous recommandons ce matériau économique et localement disponible associant l'argile et la chaux. Ce mélange peut être utilisé efficacement dans les systèmes de revêtement de fond pour les déchets dangereux, industriels et municipaux.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

L'originalité de cette étude repose sur la mise en œuvre d'une méthodologie faisant appel à la valorisation de matériaux locaux de la région d'Adrar pour leurs utilisations dans les centres de stockage des déchets dangereux. Des essais ont été menés pour étudier l'influence de l'ajout de chaux à un sol argileux gonflant en fonction de plusieurs paramètres, à savoir la technique de compactage utilisées, les aspects de compressibilité et de gonflement, le cisaillement et la perméabilité. L'analyse et l'interprétation résultats en confrontation avec la théorie et les travaux antérieurs, nous a permis de faire les conclusions suivantes :

-Une diminution de l'indice de plasticité qui traduit une amélioration dans la maniabilité du sol. Cette diminution est d'autant marquée pour l'argile d'Adrar et l'argile de Bouda, et moins marquée pour l'argile de Timimoun, en vue de sa nature non plastique selon la classification USCS. Pour la limite de liquidité, on enregistre encore une autre fois pour l'argile d'Adrar et l'argile de Bouda le même comportement soit une diminution jusqu'à la valeur critique de 4 % de chaux, qui induit une augmentation non négligeable. Ce pendant pour l'argile de Timimoun, on note une dispersion de l'ajout de la chaux. Finalement, pour la limite de plasticité la même dispersion a été enregistré pour l'argile de Timimoun. Par contre l'argile d'Adrar et l'argile de Bouda restent relativement dans la même sens de variation.

- Lorsque le pourcentage de la chaux passe de 2 à 6%, la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau optimale augmente. La diminution de la densité sèche due à la réorganisation des particules d'argile est la conséquence de la floculation et de l'agglomération, quand l'augmentation de la teneur en eau optimale s'explique par la nécessité de l'eau pour l'hydratation et la réaction pouzzolanique.

- Le potentiel de gonflement diminue avec l'augmentation du pourcentage de la chaux. Ceci est dû à la réduction de l'adsorption. Ce changement progressif de potentiel de gonflement est dû à l'effet pouzzolanique entre la chaux (Ca^{2+}) et la silice (SiO_2) et l'alumine (Al_2O_3) qui a lieu après la séparation de la silice et l'aluminium des minéraux argileux, ce qui nécessite un temps plus long pour que les composés pouzzolaniques se développent et lient les particules entre elles et la formation de silicate de calcium hydraté (C-A-S-H).

- L'effet du pourcentage de la chaux ajoutée sur le coefficient de consolidation C_v déduit par la méthode de Taylor et Casagrande augmente légèrement. Cette augmentation est liée aux processus d'échange cationique et de floculation/agglomération, qui résulte suite à la réaction entre la chaux et l'argile. Au-delà de 4% de chaux, le coefficient de consolidation a subi une réduction. Par la comparaison des deux méthodes, la méthode de Taylor a donné des valeurs du coefficient de consolidation inférieur à celle de la méthode de Casagrande.

- La variation de la perméabilité des mélanges de l'argile AA à différents pourcentages de chaux par la méthode directe (triaxial GDS) et indirecte (Taylor et Casagrande), présente une légère augmentation de la perméabilité avec l'augmentation de la chaux et après les 4% de chaux, on a une chute brutale de la perméabilité. Ce comportement s'explique par la perméabilité des sols traités à la chaux qui augmente jusqu'à l'ajout d'une certaine quantité de chaux, correspondant au Point de Fixation de la Chaux (PFC), qui est la quantité minimale de

chaux nécessaire pour favoriser les réactions pouzzolaniques à long terme. Au-delà du PFC, la perméabilité des sols traités diminue. Cette réduction s'explique par les baisses de densité qui sont neutralisées par la rapidité importante des produits cimentaires réduisant la circulation de l'eau dans le sol et donc diminuant la perméabilité.

D'après les images du MEB et le DRX tests, une augmentation du pourcentage de chaux dans le sol devient plus granulaire, la formation de l'aluminosilicate de calcium hydraté de (C-A-S-H) est mentionnée pour le mélange choisi (AA+6%chaux), elle s'est produite en raison de la réaction pouzzolanique, ce qui a contribué à l'amélioration des propriétés mécaniques. L'EDS illustre l'augmentation du pourcentage de Calcium pour le mélange de 6% de chaux et une diminution des pourcentages des autres constituants tel que le Potassium. En conclusion, les agents de floculation Ca^{2+} et Mg^{2+} augmentent avec l'augmentation de la chaux, tandis que les agents de défloculation Na^+ et K^+ diminuent avec l'augmentation de la chaux.

En se basant aux résultats obtenus, le taux de 6 % de chaux permettant d'assurer l'imperméabilisation ($k = 1.1 \times 10^{-12}$ m/s) avec des performances mécaniques correctes des couches de confinement dans les centres de stockage de déchets dangereux a pu être validé. Ce mélange, économique et localement disponible associant argile et chaux est donc recommandé. Il peut être efficacement utilisé dans les systèmes de revêtement de fond de CSD des déchets dangereux, industriels ou municipaux. C'est l'objet visé au début de la thèse.

Perspectives

Les résultats de cette étude représentent un important point de départ pour la conception d'un meilleur revêtement de décharge. Toutefois, il est conseillé de : Faire d'autres tests et essais sur le terrain, qui sont nécessaires avant que cette technologie puisse être prouvée et mise en œuvre.

- Nécessaires pour le stockage des déchets nucléaires, car les régions de Reggan et Adrar) posent un grand problème de ce point de vue.
- De proposer d'autres mélanges pour la barrière de sécurité passive (argile + déchets) de la cimenterie de la Daïra d'Aoulef ou de la briqueterie de la wilaya d'Adrar, ainsi que les déchets de céramiques de cette région.
- Étudier les effets d'autre ajout immédiatement ainsi que la cinétique de cure (pouzzolane, les fibres ou leurs combinaisons).
- Etude de la perméabilité à l'état non saturé, alors que les études ont été réalisées à l'état saturé suivant les règlements, alors qu'en réalité la barrière ouvragée se trouve toujours dans un état non saturé.
- Réaliser les études sur la barrière de couverture des casiers des centres de déchets dangereux.

Références bibliographiques

ADEME (l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) (1999c). Procédés de confinement appliqués aux sites pollués. Connaître pour agir. ADEME éditions, 184 pages.

Afès, M., & Didier, G. (2000). Stabilisation des sols gonflants: cas d'une argile en provenance de Mila (Algérie). *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 59(1).

Ahmad, S. A., Ahmed, H. U., Rafiq, S. K., Mahmood, K. O. F., Rostam, K. J., & Jafer, F. S. (2024). A comprehensive exploration on the effect of waste glass powder as a partial replacement of cement in mortar: a review, analysis, and modeling investigation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(4), 5721-5748.

Ait Saadi, L. (2003), "Méthodologie de contrôle de l'homogénéité et de la perméabilité des barrières argileuses". Thèse de doctorat. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Ghavam-Nasiri, A., & El-Zein, A. (2016). Effects of defects in geomembranes on reducing desiccation potential of geosynthetic clay liners. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(70), 2418-2422.

Al-Mukhtar, M., Khattab, S., & Alcover, J. F. (2012). Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering geology*, 139, 17-27.

Al-Swaidani, A., Hammoud, I., & Meziab, A. (2016). Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 714-725.

Al-Taie, A., Disfani, M. M., Evans, R., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (2016). Swell-shrink cycles of lime stabilized expansive subgrade. *Procedia engineering*, 143, 615-622.

Amadi, A. A., & Eberemu, A. O. (2013). Potential application of lateritic soil stabilized with cement kiln dust (CKD) as liner in waste containment structures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31, 1221-1230.

AND (2020). Agence National des déchets." Rapport sur l'état de la gestion des déchets en Algérie

Anufriev, I. S. (2021). Review of water/steam addition in liquid-fuel combustion systems for NO_x reduction: Waste-to-energy trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110665.

Asgari, M. R., Baghebanzadeh Dezfouli, A., & Bayat, M. (2015). Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 1439-1452.

Attima, Z., Dekayir, A., Bennani, M., & Elhammouti, H. (2014). Stabilisation des sols argileux par la chaux. la GIZ—un partenaire innovant pour répondre aux défis mondiaux de l'avenir, 87.

Azam, M., Setoodeh Jahromy, S., Raza, W., Wesenauer, F., Schwendtner, K., & Winter, F. (2019). Comparison of the characteristics of fly ash generated from bio and municipal waste: fluidized bed incinerators. *Materials*, 12(17), 2664.

Bagwan, W. A. (2024). Electronic waste (E-waste) generation and management scenario of India, and ARIMA forecasting of E-waste processing capacity of Maharashtra state till 2030. *Waste Management Bulletin*, 1(4), 41-51.

Bhardwaj, L. K., Rath, P., Jain, H., & Choudhury, M. (2025). Exploring the effects of e-waste on soil, water quality and human health. *Discover Civil Engineering*, 2(1), 1-16..

Bakaiyang, L., Madjadoumbaye, J., Boussafir, Y., Szymkiewicz, F., & Duc, M. (2021). Re-use in road construction of a Karal-type clay-rich soil from North Cameroon after a lime/cement mixed treatment using two different limes. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00626.

Baldovino, J. A., Moreira, E. B., Teixeira, W., Izzo, R. L., & Rose, J. L. (2018). Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 10(1), 188-194.

Banar, M., Güney, Y., Özkan, A., Günkaya, Z., Bayrakçı, E., & Ulutaş, D. (2019). Utilisation of waste clay from boron production as a landfill liner material. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33(3), 206-222.

Barman, D., & Dash, S. K. (2022). Stabilization of expansive soils using chemical additives : A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(4), 1319-1342.

Basma, A. A., & Tuncer, E. R. (1991). Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays. *Transportation research record*, (1295).

Bassoud, A., Khelafi, H., Mokhtari, A. M., & Bada, A. (2021). Evaluation of summer thermal comfort in arid desert areas. Case study: Old adobe building in Adrar (South of Algeria). *Building and Environment*, 205, 108140.

Bassoud, A. (2022):"Etude thermo mécanique des habitats traditionnels dans les régions arides, Cas des tobes à Adrar " Thèse Doctorat. Université Mohamed Boudiaf.

Behrooznia, L., Sharifi, M., Alimardani, R., & Mousavi-Avval, S. H. (2018). Sustainability analysis of landfilling and composting-landfilling for municipal solid waste management in the north of Iran. *Journal of cleaner production*, 203, 1028-1038.

Belabbaci, Z. (2014). Stabilisation des sols gonflants. Thèse de doctorat. Université Aboubakr Belkaid Tlemcen.

Bell, F. J. (1996). "Lime stabilization of clay minerals and soils." 42(4): 223-237.

Bellal, S. A., Hadeid, M., Ghodbani, T., & Dari, O. (2016). Accès à l'eau souterraine et transformations de l'espace oasien: le cas d'Adrar (Sahara du Sud-ouest algérien). *Cahiers de géographie du Québec*, 60(169), 29-56.

Belatra,A; Beroman,R. (2017). Etude expérimentale des mélange sable de dune-bentonite : leurs performances comme barrière de confinement dans les centres d'enfouissement technique (CET).

Benmeriama, C., Laguel, M. M., Harrouz, A. E. K. (2017). Etude des propriétés physico-chimiques des boues d'épuration issues par la raffinerie d'Adrar (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draïa-Adrar).

Bennett, G. (1988). Health aspects of the disposal of waste chemicals: By JW Grisham (Ed.), Pergamon Press, New York, NY, 1986, ISBN 0-08-033159-9, 454 pages, \$85.00. *Journal of Hazardous Materials*, 17(3), 340-341.

Benson, C. H., Zhai, H., & Wang, X. (1994). Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of geotechnical engineering*, 120(2), 366-387.

Benson, C.H., Daniel, D.E., Boutwell, G.P. (1999). "Field performance of compacted clay liners". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, (5), 390-403.

Besq, A., Malfoy, C., Pantet, A., Monnet, P., & Righi, D. (2003). Physicochemical characterisation and flow properties of some bentonite muds. *Applied Clay Science*, 23(5-6), 275-286.

Billard, H. (2001). Waste disposal centers. Exploitation ; Centres de stockage des dechets. Exploitation. *Techniques de l'ingénieur. Environnement*, 1.

Block, C., Van Caneghem, J., Van Brecht, A., Wauters, G., & Vandecasteele, C. (2015). Incineration of hazardous waste: a sustainable process ? *Waste and Biomass Valorization*, 6, 137-145.

Booker, J. R., Brachman, R., Quigley, R. M., & Rowe, R. K. (2004). Barrier systems for waste disposal facilities. Crc Press.

Bouazza, A. (2002). Geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 20(1), 3-17.

Bouazza, A., & Bowders, J. J. (2010). Geosynthetic clay liners for waste containment facilities (Vol. 254). London: CRC Press.

Bounouara, Z., Malab, S., Mekerta, B., Benaissa, A., & Bourokba, S. A. (2020). Treatment of dredged sediments of bouhanifia dam for their valorization in passive barrier of landfill. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(4), 3997-4011.

Bourabah, M. (2012). Comportement mécanique des sols fins, application à la valorisation des sédiments de barrages en technique routière, Thèse de doctorat en sciences, Université de Tlemcen, Algérie.

Bourokba, S. A., Hachichi, A., Benaissa, A., & Sebai, S. (2003). prévision du potentiel de gonflement de quelques argiles gonflantes de région d'Oran. *Séminaire international de Géomatériaux Université de M'sila*.

Bourokba Mrabent, S. A., Hachichi, A., Souli, H., Taibi, S., & Fleureau, J. M. (2017). Effect of lime on some physical parameters of a natural expansive clay from Algeria. *European journal of environmental and civil engineering*, 21(1), 108-125.

Bozbey, I., & Guler, E. (2006). Laboratory and field testing for utilization of an excavated soil as landfill liner material. *Waste Management*, 26(11), 1277-1286.

Brandl, H. (1981). Alteration of soil parameters by stabilization with lime. *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Volume 3, Stockholm.

Bultel, F. (2001). Prise en compte du gonflement des terrains dans le dimensionnement des revêtements des tunnels, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Cabane, N. (2004). Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation, Université Jean Monnet-Saint-Etienne.

Cambi, C., Carrisi, S., & Comodi, P. (2012). Use of the methylene blue stain test to evaluate the efficiency of lime treatment on selected clayey soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 138(9), 1147-1150.

Koerner, R. M. (2005). Designing with geosynthetics , Livre,Fourth Edition chapitre 5 p 552, 561.

Cartaud F., 2004. Modélisation des écoulements dans les interfaces des barrières d'étanchéité composites d'installations de stockage de déchets. Thèse Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. France.

Chapuis, R. P. (1990). Sand–bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), 47-57.

Chapuis, R. P. (2002). The 2000 RM Hardy Lecture: Full-scale hydraulic performance of soil bentonite and compacted clay liners. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 417-439.

Chen, F. H. (1988), Foundations on expansive soil. *Develop. Geotech. Eng.* 54 (1988) 464.

Chen, L., Nanny, M. A., Knappe, D. R. U., Wagner, T. B., & Ratasuk, N. (2004). Chemical Characterization and Sorption Capacity Measurements of Degraded Newsprint from a Landfill. *Environmental Science & Technology*, 38(13), 3542–3550.

Chen, F. H. (2012). Foundations on expansive soils (Vol. 12). Elsevier.

Cokca, E., Yazici, V., & Ozaydin, V. (2009). Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-cement. *Geotechnical and geological engineering*, 27, 489-499.

Conner, J. R. (1990). Chemical fixation and solidification of hazardous wastes. (No Title).

Costet, J., Sanglerat, G., Biarez, J., & Lebel, P. (1969). Cours pratique de mécanique des sols. Paris: Dunod.

Cui, Y. J., Tang, A. M., Loiseau, C., & Delage, P. (2008). Determining the unsaturated hydraulic conductivity of a compacted sand–bentonite mixture under constant-volume and free-swell conditions. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33, S462-S471.

Dąbska, A. (2019). Hydraulic conductivity of compacted lime-softening sludge used as landfill liners. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230(12), 280.

Dabaghian, Z., Peyravi, M., Jahanshahi, M., & Rad, A. S. (2018). Potential of Advanced Nano-structured Membranes for Landfill Leachate Treatment: A Review. *ChemBioEng Reviews*, 5(2)

Dalhat, M. A., & Al-Abdul Wahhab, H. I. (2017). Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia. *International journal of pavement engineering*, 18(4), 349-357.

Daniel, D. E., & Wu, Y. K. (1993). Compacted clay liners and covers for arid sites. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(2), 223-237.

Daniel, D. E. (1984). Predicting hydraulic conductivity of clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(2), 285-300.

Daniel, D. E., & Koerner, R. M. (1995). Waste containment facilities: Guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover systems. ASCE.

Daoud, F. Z. (1996). The permeability of compacted fine-grained soils La perméabilité des sols fins compactés, Institut National Polytechnique de Lorraine.

Not available

Darcy, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau (Vol. 1). Victor Dalmont.Paris.

Demdoun, A., Gueddouda, M. K., Goual, I., & Benabed, B. (2016). Geotechnical characterization of geomaterial blends with bentonite of Maghnia for use as landfill liners. *Journal of Materials, Processes and Environment*, 4(2), 48-54.

Demdoun, A. (2019). Comportement hydrique et mécanique d'un mélange de Bentonite-Sable Calcaire-Tuf: Application à la conception des Installations de Stockage des Déchets (ISD), Université Amar Telidji-Laghout (Algérie)].

Demdoun, A., Gueddouda, M. K., Goual, I., Souli, H., & Ghembaza, M. S. (2020). Effect of landfill leachate on the hydromechanical behavior of bentonite-geomaterials mixture. *Construction and Building Materials*, 234, 117356.

Derras, A. (2012). Comportement des barrières ouvragées dans les Centre de Stockage de Déchets. (Mémoire de magister. Université Abou Bekr Belkaid. Tlemcen, Algérie).

Desachy, C. (2001) Les déchets: sensibilisation à une gestion écologique. Tec et .Doc.Paris, 70p

Devernay, S.C.É. (2008). Comportements sous flexion d'une argile: application à la .couverture d'une ISD TFA (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I)

Barman, D., & Dash, S. K. (2022). Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(4), 1319-1342.

Diamond, S., & Kinter, E. B. (1965). Mechanisms of soil-lime stabilization. *Highway research record*, 92(303), 83-102.

Djelloul, R. (2016), Influence de l'ajout de chaux et de ciment sur les propriétés physico-mécaniques d'une argile naturelle de la région d'Oran en vue de sa valorisation en construction routière , thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf.

Döll, P. (1997). Desiccation of Mineral Liners Below Landfills with Heat Generation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(11), 1001–1009.

Döll, P., et Philip, J. R. (2021). Modeling hydraulic behavior of clay barriers in extreme conditions. *Environmental Geotechnics*, 8(2), 123–135.

Dorbane, N. (2004). Gestion des déchets solides urbains dans la ville de Tizi-Ouzou (Doctoral dissertation, thèse de magister en science économiques. UMMTO, 212p).

Driss, A. A. E., Harichane, K., & Ghrici, M. (2018). Effet de la chaux sur la stabilisation des propriétés géotechniques d'un sol argileux. In 8th International Symposium on construction in seismic zone (SICZS 2018), Chlef on (Vol. 10).

Dubost D., 2002 ; Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes. Ed. Centre de recherche scientifique et technique sur les régions (C.R.S.T.R.A.), Biskra, 423p.

Dutil P., 1971 - Contribution à l'étude des sols et des paléosols du Sahara. Thèse Doctorat ès sc. natu., Univ. Strasbourg, 300 p

Eades, J. L., Nichols Jr, F. P., & Grim, R. E. (1962). Formation of new minerals with lime stabilization as proven by field experiments in Virginia. Highway Research Board Bulletin, (335).

Eades, J. L., & Grim, R. E. (1966). A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. Highway research record, (139).

Emarah, D. A., & Seleem, S. A. (2018). Swelling soils treatment using lime and sea water for roads construction. Alexandria engineering journal, 57(4), 2357-2365.

Garzón, E., Cano, M., OKelly, B. C., & Sánchez-Soto, P. J. (2016). Effect of lime on stabilization of phyllite clays. Applied Clay Science, 123, 329-334.

Fakhru'l-Razi, A., Pendashteh, A., Abdullah, L. C., Biak, D. R. A., Madaeni, S. S., & Abidin, Z. Z. (2009). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. Journal of hazardous materials, 170(2-3), 530-551.

Fattah, M. Y., Mohammed, Z. B., & Shehab, E. Q. (2022). Enhancement of Landfill Clay Liner Properties Using Lime Silica-Fume Mixture. Available at SSRN 4200293.

Gitipour, S., Hosseinpour, M. A., Heidarzadeh, N., Yousefi, P., & Fathollahi, A. (2015). Application of modified clays in geosynthetic clay liners for containment of petroleum contaminated sites. International Journal of Environmental Research, 9(1), 317-322.

Fnade. L (2023). Déchets dangereux, Available at: <https://www.fnade.org/fr/produire-matieres-energie/dechets-dangereux>.

Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). The global e-waste monitor 2020. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam, 120.

Gaidi, L. (2002). Transfert par infiltration de l'eau et du soluté dans les sols non saturés: utilisation de la méthode TDR (Time Domain Reflectometry) (Doctoral dissertation, Lyon, INSA).

Gates, W. P., Bouazza, A., & Churchman, G. J. (2009). Bentonite clay keeps pollutants at bay. Elements, 5(2), 105-110.

Gautam, P., Kumar, S., & Lokhandwala, S. (2019). Advanced oxidation processes for treatment of leachate from hazardous waste landfill: A critical review. Journal of Cleaner Production, 237, 117639.

Gautam, P., & Kumar, S. (2021). Characterisation of hazardous waste landfill leachate and its reliance on landfill age and seasonal variation : A statistical approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105496.

GhavamShirazi, S., & Bilsel, H. (2021). Characterization of volume change and strength behavior of micro-silica and lime-stabilized Cyprus clay. *Acta Geotechnica*, 16(3), 827-840.

Ghobadi, M. H., Babazadeh, R., & Abdilor, Y. (2014). Utilization of lime for stabilizing marly soils and investigating the effect of pH variations on shear strength parameters. *J. Eng. Geol*, 8(1), 1939-1962.

Gitipour, S., Hosseinpour, M. A., Heidarzadeh, N., Yousefi, P., & Fathollahi, A. (2015). Application of modified clays in geosynthetic clay liners for containment of petroleum contaminated sites. *International Journal of Environmental Research*, 9(1), 317-322.

Gitipour, S., Hosseinpour, M. A., Heidarzadeh, N., Yousefi, P., & Fathollahi, A. (2015). Application of modified clays in geosynthetic clay liners for containment of petroleum contaminated sites. *International Journal of Environmental Research*, 9(1), 317-322.

Giroud, J. P., & Morel, N. (1992). Analysis of geomembrane wrinkles. *Geotextiles and Geomembranes*, 11(3), 255-276.

Green, W. J., Lee, G. F., & Jones, R. A. (1981). Clay-soils permeability and hazardous waste storage. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 1347-1354.

Greenfied, E. (2023). Impact environnemental de la mise en décharge des déchets solides. Le 15 décembre 2023. *Conservation, Gestion des ordures solides*

Grim, R. E. (1959). Physico-chemical properties of soils: Clay minerals. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 85(2), 1-17.

Grisham, J. W. (1986). Health Aspects of the Disposal of Waste Chemicals. Pergamon Press, Maxwell House, Fairview Park, Elmsford, NY 10523.

Gueddouda, M. K., Goual, I., Benabed, B., Taibi, S., & Aboubekr, N. (2016). Hydraulic properties of dune sand–bentonite mixtures of insulation barriers for hazardous waste facilities. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(4), 541-550.

Guide technique (1996) R38696 : Mise en œuvre de matériaux rapportés destinés au confinement des centres de stockage.

Guney, Y., Sari, D., Cetin, M., & Tuncan, M. (2007). Impact of cyclic wetting–drying on swelling behavior of lime-stabilized soil. *Building and environment*, 42(2), 681-688.

Gupta, A. R., & Rathod, V. K. (2018). Waste cooking oil and waste chicken eggshells derived solid base catalyst for the biodiesel production : Optimization and kinetics. *Waste management*, 79, 169-178.

Guyot, G. (1999). Climatologie de l'environnement, Edition Dunod. Paris. France.

Hachichi, A., & Fleureau, J. M. (1999). Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie. *Revue française de géotechnique*, (86), 37-51.

Hachichi, A., Benaissa, A., Bourokba, S., & Boudia, M. (2003). Etude de la stabilisation chimique des sols gonflants de la region d'Oran. The Involvement of Geotechnical Engineering in Infrastructure Development in Africa, Marrakech, 371-379.

Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., & Grine, K. (2011). Use of natural pozzolana and lime for stabilization of cohesive soils. Geotechnical and geological engineering, 29, 759-769.

Heidarzadeh, N., & Parhizi, P. (2019). Improving the permeability and adsorption of phenol by organophilic clay in clay liners. Environmental Engineering Research, 25(1), 96-103.

Herzog, A., & Mitchell, J. K. (1963). Reactions accompanying stabilization of clay with cement. Highway Research Record, (36).

Hilt, G. H., & Davidson, D. T. (1960). Lime fixation in clayey soils. Highway Research Board Bulletin, (262).

Holtz, R. D., Kovacs, W. D. (1981). An introduction to geotechnical engineering, Prentice-Hall Englewood Cliffs.

Hong, J. H., et Park, K. J. (2004). Wood chip biofilter performance of ammonia gas from composting manure. Compost science et utilization, 12(1), 25-30.

Hoornweg D.(1999) bWhat a wasteQ solid waste management in Asia. UNEP Ind Environ Jan-Jun:65– 70.

Hoornweg, D., & Thomas, L. (1999). What a waste: solid waste management in Asia.

Ilyas, S., Srivastava, R. R., & Kim, H. (2021). O₂-enriched microbial activity with pH-sensitive solvo-chemical and electro-chlorination strategy to reclaim critical metals from the hazardous waste printed circuit boards. Journal of Hazardous Materials, 416, 125769.

Ismadji, S., Soetaredjo, F. E., Ayucitra, A. (2015). Clay materials for environmental remediation (pp. 5-37). Berlin, Germany:: Springer International Publishing.

Inglezakis, V. J., & Moustakas, K. (2015). Household hazardous waste management: A review. Journal of environmental management, 150, 310-321.

Jarraya, I., Fourmentin, S., & Benzina, M. (2010). Adsorption de Cov par un matériau argileux tunisien organo-Modifié. Journal de la Société Chimique de Tunisie, 12, 139-149.

Jiang, X., Li, Y., & Yan, J. (2019). Hazardous waste incineration in a rotary kiln: a review. Waste Disposal & Sustainable Energy, 1(1), 3-37.

Jo, H. Y., Benson, C. H., Shackelford, C. D., Lee, J. M., & Edil, T. B. (2005). Long-term hydraulic conductivity of a geosynthetic clay liner permeated with inorganic salt solutions. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 131(4), 405-417.

Kalkan, E. (2011). "Impact of wetting–drying cycles on swelling behavior of clayey soils modified by silica fume." Applied Clay Science 52(4): 345-352.

Kalkan, E. (2006). "Utilization of red mud as a stabilization material for the preparation of clay liners." Engineering geology 87(3-4): 220-229.

Kavak, A., & Baykal, G. (2012). Long-term behavior of lime-stabilized kaolinite clay. *Environmental earth sciences*, 66, 1943-1955.

Khattab, S. A. A. (2002). Etude multi-échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux (Doctoral dissertation, Orléans).

Khattab, S. A., Al-Mukhtar, M., & Fleureau, J. M. (2007). Long-Term Stability Characteristics of a Lime-Treated Plastic Soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(4), 358–366.

Khan, F., Ahmed, S., & Ali, M. (2020). Recent advancements in clay-based materials for waste containment systems. *Journal of Hazardous Materials*, 391, 121745.

Khan, N. A., Morabet, R. E., Khan, R. A., Alsubih, M., Gaurav, G. K., Klemeš, J. J., & Thakur, A. K. (2022). Modelling and parameter optimisation for performance evaluation of sequencing batch reactor for treating hospital wastewater. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-16.

Khedidja, B., Abdeldjalil, Z., Belkacem, M., Abdelkader, B., & Mohamed-Amine, A. (2024). Evaluation of the Permeability of Clay-Lime Mixtures for Hazardous Waste Insulation Barriers, Case of Southern Algeria (Adrar). *Trends in Sciences*, 21(7), 7725-7725.

Kiki, T. (2016). Caractérisation minéralogique, thermique et microscopique des sols fins en technique routière, Bordeaux.

King, K. S., Quigley, R. M., Fernandez, F., Reades, D. W., & Bacopoulos, A. (1993). Hydraulic conductivity and diffusion monitoring of the Keele Valley Landfill liner, Maple, Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(1), 124-134.

Kinuthia, J. M., Wild, S., & Jones, G. I. (1999). Effects of monovalent and divalent metal sulphates on consistency and compaction of lime-stabilized kaolinite, *Applied Clay Science*, 14, no. 1-3 (1999): 27-45.

Knickmeyer, D. (2020). Social factors influencing household waste separation: A literature review on good practices to improve the recycling performance of urban areas. *Journal of cleaner production*, 245, 118605.

Koerner, R. M. (2005). Designing with geosynthetics (Vol. 796). Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall.

Kong, Z., Wang, X., Liu, Q., Li, T., Chen, X., Chai, L., et Shen, Q. (2018). Evolution of various fractions during the windrow composting of chicken manure with rice chaff. *Journal of environmental management*, 207, 366-377.

Kong, F., Ren, H. Y., Pavlostathis, S. G., Nan, J., Ren, N. Q., & Wang, A. (2020). Overview of value-added products bioelectrosynthesized from waste materials in microbial electrosynthesis systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 125, 109816.

Kouloughli, S., & Lehocine, M. B. (2007). Etude des mélanges sable-bentonite utilisés dans la construction de barrières de confinement de déchets solides. *Sciences & Technologie. B, Sciences de l'ingénieur*, 34-42.

Kumar, V., Sharma, N., Umesh, M., Chakraborty, P., Kaur, K., Duhan, L., ... & Maitra, S. S. (2023). Micropollutants characteristics, fate, and sustainable removal

technologies for landfill leachate: A technical perspective. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103649.

Kumar, A., Thakur, A. K., Gaurav, G. K., Klemeš, J. J., Sandhwar, V. K., Pant, K. K., et Kumar, R. (2023). A critical review on sustainable hazardous waste management strategies: a step towards a circular economy. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(48), 105030-105055.

Lamara, M., Chiker, T., Amara, S., & Gueddouda, M. K. (2014). Protection de l'environnement à travers la valorisation de sable de dune dans les régions arides.

Lan, T. N (1981). "Utilisation de l'essai au bleu de méthylène en terrassement routier." (111).

Lasledj, A. (2009). Traitement des sols argileux à la chaux: processus physico-chimique et propriétés géotechniques (Doctoral dissertation, Orléans).

Lautrin, D. (1987). Une procédure rapide d'identification des argiles. *Bul. LCPC* (152).

Le Runigo, B. (2008). Durabilité du limon de Jossigny traité à la chaux et soumis à différentes sollicitations hydriques: comportements hydraulique, microstructural et mécanique, Ecole Centrale de Nantes (ECN)/Université de Nantes.

Le Runigo, B., Cuisinier, O., Cui, Y. J., Ferber, V., & Deneele, D. (2009). Impact of initial state on the fabric and permeability of a lime-treated silt under long-term leaching. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(11), 1243-1257.

Li, C., Yang, L., Liu, X., Yang, Y., Qin, L., Li, D., & Liu, G. (2021). Bridging the energy benefit and POPs emission risk from waste incineration. *The innovation*, 2(1).

Lidskog, R. (1998). Social aspects of the siting of facilities for hazardous waste management. *Waste management & research*, 16(5), 476-483.

Liu, Z., Wu, W., Shi, P., Guo, J., & Cheng, J. (2015). Characterization of dissolved organic matter in landfill leachate during the combined treatment process of air stripping, Fenton, SBR and coagulation. *Waste Management*, 41, 111–118.

Locat, J., Trembaly, H., & Leroueil, S. (1996). Mechanical and hydraulic behaviour of a soft inorganic clay treated with lime. *Canadian geotechnical journal*, 33(4), 654-669.

Lun, X. Z., & Christensen, T. H. (1989). Cadmium complexation by solid waste leachates. *Water Research*, 23(1), 81-84.

Al-Kiki, I. M., Al-Juari, K. A., & Khattab, S. A. (2008). Strength, durability and hydraulic properties of clayey soil stabilized with lime and industrial waste lime. *Al-Rafidain Engineering Journal*, 16(1), 102-116.

Marcoen, J. M., Tessier, D., Thorez, J., Monjoie, A., & Schroeder, C. (2000). Manuel relatif aux matières naturelles pour barrières argileuses ouvragées pour CET (centres d'enfouissement technique) et réhabilitation de dépotoirs en région wallonne.

McCallister, L. D. (1990). The effects of leaching on lime-treated expansive clays, The University of Texas at Arlington.

McCallister, L. D., & Petry, T. M. (1992). Leach tests on lime-treated clays. *Geotechnical testing journal*, 15(2), 106-114.

Meer, S. R., et Benson, C. H. (2007). Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 133(5), 550-563.

Metelková, Z., Boháč, J., Sedlářová, I., & Přikryl, R. (2011). Changes of pore size and of hydraulic conductivity by adding lime in compacting clay liners. In *Geotechnical Engineering: New Horizons* (pp. 93-98). IOS Press.

Millogo, Y., Morel, J. C., Traoré, K., & Ouedraogo, R. (2012). Microstructure, geotechnical and mechanical characteristics of quicklime-lateritic gravels mixtures used in road construction. *Construction and Building Materials*, 26(1), 663-669.

Wang, M., Wen, J., Zhuang, H., Xia, W., Jiang, N., & Du, Y. (2022). Screening additives for amending compacted clay covers to enhance diffusion barrier properties and moisture retention performance. *Applied Sciences*, 12(14), 7341.

Misra, V., & Pandey, S. D. (2005). Hazardous waste, impact on health and environment for development of better waste management strategies in future in India. *Environment international*, 31(3), 417-431.

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (Vol. 3, p. 558). New York: John Wiley et Sons.

Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., & Chinkulkijniwat, A. (2017). Effect of fly ash on properties of crushed brick and reclaimed asphalt in pavement base/subbase applications. *Journal of hazardous materials*, 321, 547-556.

Moretti, L., Natali, S., Tiberi, A., & D'Andrea, A. (2020). Proposal for a methodology based on xrd and sem-eds to monitor effects of lime-treatment on clayey soils. *Applied Sciences*, 10(7), 2569.

Mosavat, N., & Nalbantoglu, Z. (2013). The impact of hazardous waste leachate on performance of clay liners. *Waste Management & Research*, 31(2), 194-202.

Mudoi, M. P., Thakur, A. K., Khichi, A. S., & Shankar, R. (2021). Photocatalysis as advanced oxidation processes for wastewater treatment. An innovative approach of advanced oxidation processes in wastewater treatment. Nova Science Publishers Inc, New York, 161-182.

Muntohar.A.S., Swelling and compressibility characteristics of soil-Bentonite mixtures, *Dimensi Teknik Sipil* 5 (2) (2003) 93–98.

Nalbantoglu, Z., & Tuncer, E. R. (2001). Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay. *Canadian geotechnical journal*, 38(1), 154-160.

Nalbantoglu, Z., (2006) Lime stabilization of expansive clay. In: Al Rawas AA, Goosen MFA, editors. *Expansive Soils-Recent Advances in Characterization and Treatment*. Taylor & Francis Group, Balkema, London, pp. 341-348

Nally.Greg.Mc , *Soil and rock construction materials*, CRC Press LLC, 1998

Ngô, C., & Régent, A. (2004). *Déchets et pollution*. Edt Dunod, Paris. 152p.

Nguyen, Thi Thanh H. (2015). *Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel*, Paris Est.

Nollet, J., & Beaulieu, M. (2006). La gestion des fournisseurs: subir ou accompagner le changement?. *Gestion*, 31(3), 64-69. Hec Montréal ,6p

O’Flaherty.C.A, Highways (2002).: The Location, Design, Construction and Maintenance of Pavements, 4th Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom,

Ola, S.A. (1977), The potentials of lime stabilization of lateritic soils, *Engineering Geology.*, Vol. 11, pp. 305-317.

Olinic, T., & Olinic, E. (2016). The effect of quicklime stabilization on soil properties. *Agriculture and agricultural science procedia*, 10, 444-451.

Ören, A. H., & Akar, R. Ç. (2017). Swelling and hydraulic conductivity of bentonites permeated with landfill leachates. *Applied Clay Science*, 142, 81-89.

Osula, D.O.A. (1991), Lime modification of problem laterite, *Engineering Geology.*, Vol. 30, pp. 141-154.

Ouali, S., Mehmah, B., & Malek, A. (2007). Etude de faisabilité d’utilisation des eaux thermales de Zelfana Dans la Production d’Hydrogène. Centre de Développement des Energies Renouvelables. Algérie.ns la Production d’Hydrogène."

Pelte, T., Pierson, P., Gourc, J.P. (1994). “Thermal analysis of geomembrane exposed to solar radiation”. *Geosynthetics International* (1) 1, 21-44.

Philip, L. K., Shimell, H., Hewitt, P. J., & Ellard, H. T. (2002). A field-based test cell examining clay desiccation in landfill liners. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 35(4), 345-354.

Philipponat, G. (1978). Fondations et ouvrages en terre.

Philipponnat.G , Hubert. B, Isnard.A (2000) *Fondations et ouvrages en terre*. Eyrolles, Paris

Portelinha, F. H., Lima, D. C., Fontes, M. P., & Carvalho, C. A. (2012). Modification of a lateritic soil with lime and cement: an economical alternative for flexible pavement layers. *Soils and Rocks*, São Paulo, 35(1), 51-63.

Pouranian, M. R., Notani, M. A., Tabesh, M. T., Nazeri, B., Shishehbor, M. (2020). Rheological and environmental characteristics of crumb rubber asphalt binders containing non-foaming warm mix asphalt additives. *Construction and Building Materials*, 238, 117707.

Prusinski, J. R., & Bhattacharja, S. (1999). Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. *Transportation research record*, 1652(1), 215-227.

Qlihaa, A., Dhimni, S., Melrhaka, F., Hajjaji, N., & Srhiri, A. (2016). Caractérisation physico-chimique d’une argile Marocaine [Physico-chemical characterization of a morrocan clay]. *J. Mater. Environ. Sci*, 7(5), 1741-1750.

Rabbani, M., Heidari, R., & Yazdanparast, R. (2019). A stochastic multi-period industrial hazardous waste location-routing problem: Integrating NSGA-II and Monte Carlo simulation. *European Journal of Operational Research*, 272(3), 945-961.

Raheem, A. M. (2020). "Controlling the Permeability of Sandy Soil Using Different Local Waste Materials." *Key Engineering Materials* **857**: 302-310.

Rahman, M. T., Mohajerani, A., & Giustozzi, F. (2020). Possible recycling of cigarette butts as fiber modifier in bitumen for asphalt concrete. *Materials*, 13(3), 734.

Rahmani, M. C.(2014) "Durabilité des fondations d'un centre de stockage de déchets vis-à-vis des sollicitations de service."

Ramade, F. (2005). *Eléments d'écologie: écologie appliquée*. 6^{ème} édition, Dunod, Paris, 2005. 864 p

Rao, S. N., & Rajasekaran, G. (1994). Lime injection technique to improve the behaviour of soft marine clays. *Ocean engineering*, 21(1), 29-43.

Rao S.M., Shivananda P. (2005). « Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions ». *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 23, pp. 79-85.

Rogers, C. D. F., Glendinning, S, & Roff, T. E. J. (1997). Lime modification of clay soils for construction expediency. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 125(4), 242-249.

Rogers, C. D., & Glendinning, S. (2000). "Lime requirement for stabilization." *Transportation research record*, **1721**(1): 9-18.

Rosone, M., Megna, B., & Celauro, C. (2021). Analysis of the chemical and microstructural modifications effects on the hydro-mechanical behaviour of a lime-treated clay. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(4), 447-460.

Rowe, R. K., Caers, C. J., & Chan, C. (1993). Evaluation of a compacted till liner test pad constructed over a granular subliner contingency layer. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(4), 667-689..

Rowe, R.K. (1998). "Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste". *Proceedings of the 6th International Conference on Geosynthetics*, Atlanta USA, (1), 27-103.

Rowe, R. K., & Brachman, R. W. I. (2004). Assessment of equivalence of composite liners. *Geosynthetics International*, 11(4), 273-286.

Rowe, R. K., & Brachman, R. W. I. (2005). Performance and durability of landfill barrier systems. *Geotechnical Engineering*, 45(4), 457-470.

Rowe, R. K. (2013). The role of diffusion in environmental geotechnics. In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (pp. 127-150).

Rowe, R. K. (2018). Environmental geotechnics: looking back, looking forward. *Talian Geotech. J. Riv. Ital. Di Geotec*, 4, 8-40.

Roy, H., Rahman, T. U., Suhan, M. B. K., Al-Mamun, M. R., Haque, S., & Islam, M. S. (2022). A Comprehensive Review on Hazardous Aspects and Management Strategies of Electronic Waste: Bangladesh and Global Perspectives. Available at SSRN 4029212.

Rubinos, D., Spagnoli, G., & Barral, M. T. (2015). Assessment of bauxite refining residue (red mud) as a liner for waste disposal facilities. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29(6), 433-452.

Sadala, S., Dutta, S., Raghava, R., Jyothsna, T. S., Chakradhar, B., & Ghosh, S. K. (2019). Resource recovery as alternative fuel and raw material from hazardous waste. *Waste Management & Research*, 37(11), 1063-1076.

Sadki, H., Ziat, K., & Saidi, M. (2014). Adsorption d'un colorant cationique d'un milieu aqueux sur une argile locale activée. *Journal of Materials and Environmental Science*, 5, 2060-2065.

Sadok, A. (2013). Maintenance du barrage d'Ouizert dans la gestion des sédiments d'envasement et dans la réalisation d'un Centre de Stockage de Déchets (CSD). (Mémoire de magister. Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran, Algérie).

Sakr, M. A., Shahin, M. A., & Metwally, Y. M. (2009). Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27, 105-113.

Savoldelli J, Tomback D, Savoldelli H (2017) Breaking down polystyrene through the application of a two-step thermal degradation and bacterial method to produce usable byproducts. W

Scalia IV, J., & Benson, C. H. (2010). Preferential flow in geosynthetic clay liners exhumed from final covers with composite barriers. *Canadian geotechnical journal*, 47(10), 1101-1111.

Serratrice, J. F., & Soyez, B. (1996). Les essais de gonflement. *Bulletin-Laboratoires Des Ponts Et Chaussees*, 65-86.

Sengupta, D., Ilankoon, I. M. S. K., Kang, K. D., Chong, M. N. (2022). Circular economy and household e-waste management in India: Integration of formal and informal sectors. *Minerals Engineering*, 184, 107661.

Shackelford, C. D. (1994). "Waste-contaminant transport through clay liner systems." *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(2), 289-315.

Shackelford, C. D., Benson, C. H., Katsumi, T., Edil, T. B., & Lin, L. (2000). Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids. *Geotextiles and Geomembranes*, 18(2-4), 133-161.

Shahzaib Sharif, Kausar Ali, Mehboob Anwer Khan³ & Mohd Sajid (2024).A Comprehensive Review on Clay Soil Stabilization Using Rice Husk Ash and Lime Sludge. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, Vol. 11, Issue 1; pp.23-26

Shakir, A. O., & Ali, H. A. (2019). The effect of lining material on the permeability of clayey soil. *Civil Engineering Journal*, 5(3), 662-678.

Shankar, M. U., & Muthukumar, M. (2017, November). Comprehensive review of geosynthetic clay liner and compacted clay liner. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 263, No. 3, p. 032026). IOP Publishing.

Sharma, H. D., & Lewis, S. P. (1994). Waste containment systems, waste stabilization, and landfills: design and evaluation. John Wiley & Sons.

Sharma, L. K., Sirdesai, N. N., Sharma, K. M., & Singh, T. N. (2018). Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study. *Applied Clay Science*, 152, 183-195.

Shelley, T. L., & Daniel, D. E. (1993). "Effect of gravel on hydraulic conductivity of compacted soil liners." *119*(1): 54-68.

Shon, C. S., Saylak, D., & Mishra, S. K. (2010). Combined use of calcium chloride and fly ash in road base stabilization. *Transportation research record*, 2186(1), 120-129.

Skempton, A. (1953). "The colloidal activity of clays." *International Society For Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Switzerland, 106-118.

Smaida, A., Mekerta, B., & Gueddouda, M. K. (2021). Physico-mechanical stabilization of a high swelling clay. *Construction and Building Materials*, 289, 123197.

Smith, M. M., & Aber, J. D. (2018). Energy recovery from commercial-scale composting as a novel waste management strategy. *Applied energy*, 211, 194-199.

Sobti, J., & Singh, S. K. (2017). Techno-economic analysis for barrier materials in landfills. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11(5), 467-478.

Soltaninejad, S., Marandi, S. M., & BP, Naveen. (2023). Effects of the Types and Amounts of Clay Minerals on Durability of Lime-Stabilized Clay Soils. *Minerals*, 13(10), 1317.

Souli, H., Fleureau, J. M., Ayadi, M. T., & Besnard, M. (2008). Physicochemical analysis of permeability changes in the presence of zinc. *Geoderma*, 145(1-2), 1-7.

Stoltz, G., Cuisinier, O., & Masrouri, F. (2012). Multi-scale analysis of the swelling and shrinkage of a lime-treated expansive clayey soil. *Applied clay science*, 61, 44-51.

Su, P., Zhang, J., Yang, B. (2022). The current status of hazardous waste management in China: identification, distribution, and treatment. *Environmental Engineering Science*, 39(1), 81-97.

Sun, Y., Chen, S. S., Lau, A. Y., Tsang, D. C., Mohanty, S. K., Bhatnagar, A., Ok, Y. S. (2020). Waste-derived compost and biochar amendments for stormwater treatment in bioretention column: Co-transport of metals and colloids. *Journal of hazardous materials*, 383, 121243.

Sun, Wen. J, Qian-Tong. T, Tian-Hao. L, Ri-Dong. F, Gao-Ge. S, & Yun-zhi Tan.. Adsorption performance of bentonite and clay for Zn (II) in landfill leachate. *Geoenvironmental Disasters*, 11(1), 4.

Teng, C., Zhou, K., Peng, C., & Chen, W. (2021). Characterization and treatment of landfill leachate: A review. *Water research*, 203, 117525.

Thériault, P. (2001). Etude de l'influence des métaux lourds sur la conductivité hydraulique de couches sable/bentonite, Université Laval.

Torkashvand, J., Farzadkia, M., Sobhi, H. R., & Esrafil, A. (2020). Littered cigarette butt as a well-known hazardous waste: a comprehensive systematic review. *Journal of hazardous materials*, 383, 121242.

Tournier, F., Portier, E., & Pagel, M. (2010). Control of pressure dissolution and quartz cementation on the reservoir quality of glacial ordovician sandstones from the Sbaa basin, Algeria. In *SPE North Africa Technical Conference and Exhibition (SPE-128493)*.

Touze-Foltz, N. (2001). “Modélisation des transferts advectifs dans les étanchéités composites de centres de stockage de déchets”. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 286p.

Townsend, D. L., & Klym, T. W. (1966). Durability of lime-stabilized soils. Highway Research Record, 139, 25-41.

Tran, N. T. (2009). Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière. Université d'Artois.

Tran, V. D. (2013). Étude de l'amélioration des sols par traitement à la chaux.

Thakur, A. K., Singh, R., Pullela, R. T., & Pundir, V. (2022). Green adsorbents for the removal of heavy metals from Wastewater: A review. Materials Today: Proceedings, 57, 1468-1472.

Thakur, A. K., Kumar, R., Chaudhari, P., & Shankar, R. (2021). Removal of heavy metals using bentonite clay and inorganic coagulants. Removal of emerging contaminants through microbial processes, 47-69.

Thanh. D. T , Yu-Jun C, Anh Minh. T, Martine. A , Roger. C.(2014)"Effects of lime treatment on the microstructure and hydraulic conductivity of Héricourt clay".

Trinh, M. M., Kuo, C. H., & Chang, M. B. (2019). Characterization of PCDD/Fs and dl-PCBs emission from combustion of PCB-containing oil in a fluidized-bed incinerator. Chemosphere, 225, 35-42.

Truche, C. (2010). Caractérisation et quantification des minéraux argileux dans les sols expansifs par spectroscopie infrarouge aux échelles du laboratoire et du terrain, Université Paul Sabatier-Toulouse III.

Tsai, T. D., & Vesilind, P. A. (1998). A new landfill liner to reduce ground-water contamination from heavy metals. Journal of Environmental Engineering, 124(11), 1061-1065.

.Tuncan, A., Onur, M. I., & Akpınar, K. uncan M (2016) Use of sepiolite and zeolite mixtures as a landfill liner. Int J Waste Resour, 6(197), 2.

Ural, N. (2021). The significance of scanning electron microscopy (SEM) analysis on the microstructure of improved clay: An overview. Open Geosciences **13**(1): 197-218.

Vitale, E., Deneele, D., Paris, M., & Russo, G. (2017). Multi-scale analysis and time evolution of pozzolanic activity of lime treated clays. Applied Clay Science, 141, 36-45.

Wasil, M,2020. Effect of Bentonite Addition on the Properties of Fly Ash as a Material for Landfill Sealing Layers. Applied. Sciences. 10, 1488

Wang, J., & Qiao, Z. (2024). A comprehensive review of landfill leachate treatment technologies. Frontiers in Environmental Science, 12, 1439128.

Wang, J., Shih, Y., Wang, P. Y., Yu, Y. H., Su, J. F., & Huang, C. P. (2019). Hazardous waste treatment technologies. Water environment research, 91(10), 1177-1198.

Wang, Q., Awasthi, M. K., Ren, X., Zhao, J., Wang, M., Chen, H., & Zhang, Z. (2018). Recent advances in composting of organic and hazardous waste: a road map to safer environment. Biosynthetic Technology and Environmental Challenges, 307-329.

- Wei, Y., Zhao, Y., Zhao, X., Gao, X., Zheng, Y., Zuo, H., & Wei, Z. (2020).** Roles of different humin and heavy-metal resistant bacteria from composting on heavy metal removal. *Bioresource technology*, 296, 122375.
- Wild, S., Arabi, M., & Rowlands, G. O. (1987).** Relation between pore size distribution, permeability, and cementitious gel formation in cured clay–lime systems. *Materials science and technology*, 3(12), 1005-1011.
- Williams, A. A. B., & Donaldson, G. W. (1980).** Developments relating to building on expansive soils in South Africa, 1973-1980. National Building Research Institute, Council for Scientific and Industrial Research.
- Wu, Y., Ren, J., & Liu, J. (2024).** Field Investigation of Water Infiltration into a Three-Layer Capillary Barrier Landfill Cover System Using Local Soils and Construction Waste. *Buildings*, 14(1), 139.
- Xu, Y., Xue, X., Dong, L., Nai, C., Liu, Y., & Huang, Q. (2018).** Long-term dynamics of leachate production, leakage from hazardous waste landfill sites and the impact on groundwater quality and human health. *Waste Management*, 82, 156-166.
- Yilmaz, I., & Marschalko, M. (2014).** The effect of different types of water on the swelling behaviour of expansive clays. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 1049-1062.
- Yong, R. N., & Ouhadi, V. R. (2007).** Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils. *Applied clay science*, 35(3-4), 238-249.
- Yosra, H. 2023.** Évaluation et prédiction de la conductivité hydraulique saturée des mélanges sol-bentonite utilisés dans la construction des structures d’entreposage des rejets miniers (Doctoral dissertation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).
- Yu, Z., Gao, C., Yang, C., & Zhang, L. (2023).** Insight into quantities, flows, and recycling technology of E-waste in China for resource sustainable society. *Journal of Cleaner Production*, 393, 136222.
- Zami.M.S.L, Angela (2010),** Economic benefits of contemporary earth construction in low-cost urban housing – State-of-the-art review, *Journal of Building Appraisal* 5(3) (2010) 259-271.
- Zhang, Q.-Q., Tian, B.-H., Zhang, X., Ghulam, A., Fang, C.-R., & He, R. (2013).** Investigation on characteristics of leachate and concentrated leachate in three landfill leachate treatment plants. *Waste Management*, 33(11), 2277–2286. doi:10.1016/j.wasman.2013.07.021
- Zhao, Q., Choo, H., Bhatt, A., Burns, S. E., & Bate, B. (2017).** Review of the fundamental geochemical and physical behaviors of organoclays in barrier applications. *Applied Clay Science*, 142, 2-20.
- Zhu, F., Li, Z., Dong, W., & Ou, Y. (2019).** Geotechnical properties and microstructure of lime-stabilized silt clay. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 2345-2354.

Normes

ASTM D 4546 (1990). Standard Test Method for one- dimensional swell or settlement of cohesive soils. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.08. Easton, PA : American Society for Testing and Materials.

ASTM D 4972 (1995). Standard Test Method for pH of soils. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.08. Easton, PA : American Society for Testing and Materials.

ASTM D 4373 (2007) Standard Test Method for Rapid Determination of Teneur en carbonate content of soils. Annual Book of ASTM Standards : American Society for Testing and Materials.

NF P94-093 (1999). "Détermination des références de compactage d'un matériau : essai Proctor normal-Essai Proctor modifié."

NF P94-054 (1991). " Sols : reconnaissances et essais, Détermination de la masse volumique des particules solides des sols, Méthode du pycnomètre à eau."

NF P94-051 (1993). "Sols : reconnaissance et essais–Détermination des limites d'Atterberg."

NF P 94-054. "Masse volumique des grains solides. "

NF P94-056 (1992). "Sols : reconnaissance et essais-Analyse granulométrique des sols-Méthode par tamisage."

NF P94-057 (1992). "Sols : reconnaissance et essais-Analyse granulométrique des sols-Méthode par sédimentation."

NF P94-054. "Détermination de poids volumique des grains solides".

NF P94-055 (1993). " Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un sol - Méthode chimique."

NFP P94-060. "Détermination de l'indice de retrait."

NF P94-068 (1998). "Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche."

NX P94-091. "Détermination des indices de compressibilité C_c Gonflement et consolidation C_v ."

NF P94-071-1 (1994b). "Sols : reconnaissance et essais - Essai de cisaillement rectiligne à la boîte - Partie 1 : cisaillement direct."