

	الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية	
	People's Democratic Republic of Algeria	
	وزارة التعليم العالي والبحث العلمي	
	Ministry of Higher Education and Scientific Research	
	جامعة عبد الحميد بن باديس – مستغانم	
	Abdel Hamid Ibn Badis University – Mostaganem	
	كلية العلوم والتكنولوجيا	
	Faculty of Sciences and Technology	
	قسم هندسة المدنية	
	Department of Process Engineering	

N° d'ordre : M2...../TP/2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DEMASTER ACADEMIQUE

Filière: Travaux Publics

Spécialité: Voies et Ouvrages d'Arts

Thème

Comportement hydrique d'un sol traité avec ciment

Présenté par

1-Bacha sabiha

2-Bekhat chaimaa

Soutenu le 28/06/ 2026 devant le jury composé de :

Président	Pr MISSOUM Hanifi	Université de Mostaganem
Examineur	Pr. MEBROUKI Abdelkader	Université de Mostaganem
Encadrant	Mr MEKAIDECHE Khalfallah	Université de Mostaganem
Co-Encadrant	Mme MOSTEFA Fouzia	Université de Mostaganem

Année Universitaire :2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous exprimons notre gratitude à Dieu le Tout-Puissant, qui nous a accordé la force, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous souhaitons adresser nos sincères remerciements à notre encadrant pour son soutien sans faille, ses précieux conseils, sa disponibilité et son accompagnement constant tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Nos pensées reconnaissantes se tournent également vers les membres du jury, que nous remercions chaleureusement pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre travail.

Nous tenons également à remercier l'ensemble des enseignants qui ont enrichi notre parcours universitaire grâce à leur savoir et leur engagement.

Une profonde reconnaissance est dédiée à nos parents et nos familles pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements constants et les sacrifices qu'ils ont consentis tout au long de notre formation.

Enfin, nous témoignons toute notre gratitude à toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à la réalisation de ce projet.

Dédicaces

Ce travail de fin d'études est dédié avec tout mon cœur à mes parents, qui ont été une source inépuisable de force, de patience et de courage tout au long de mon parcours académique.

À ma mère, dont les encouragements constants, les prières sincères et le soutien sans faille dans les moments difficiles ont été pour moi un pilier essentiel.

À mon père regretté, que Dieu lui accorde Sa miséricorde et l'accueille dans Son immense paradis. Son absence me pèse chaque jour, mais son souvenir reste profondément ancré en moi, vivant à travers mes succès et mes efforts. Ce travail constitue également un hommage à son héritage et une manière de lui montrer qu'il continue à m'inspirer et à m'accompagner, malgré tout.

Je tiens aussi à le dédier à ma famille entière, véritable moteur de soutien moral et matériel, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont cru en moi et m'ont apporté leur aide précieuse dans les moments de doute ou de fatigue.

Enfin, à mes amis et collègues, compagnons de route qui ont partagé mon expérience et ont rendu ce parcours plus enrichissant, plus joyeux et plus significatif.

Chaima

Dédicaces

À mon père, source inépuisable de force et de soutien tout au long de mon chemin, toujours présent pour m'encourager et me guider avec sagesse.

À ma mère adorée, incarnation de tendresse, d'amour inconditionnel et de sacrifice, que Dieu veille sur elle et la protège.

À mes frères et sœurs, mon véritable pilier et mes précieux compagnons de vie, dont la présence constante et les encouragements m'ont accompagnée à chaque étape.

À toutes les personnes qui m'ont soutenue, de près comme de loin, durant mon parcours universitaire, leur bienveillance restera gravée en moi. Et à ma binôme, avec qui j'ai partagé travail et efforts pour mener à bien ce projet.

Je dédie ce modeste travail à chacune de ces personnes qui ont marqué ma vie, en espérant qu'il représente le début d'un avenir empli de réussite et de bonheur.

Sabiha

Résumé

La terre crue est le plus ancien matériau de construction façonné par l'homme. Ce matériau est capable de répondre aux critères économiques et environnementaux. La fissuration systématique due au retrait et sa forte sensibilité à l'eau vis-à-vis de l'eau sous différentes formes (vapeur, liquide et gaz), constituent des facteurs limitants majeures pour son utilisation dans la construction en terre. Avant son utilisation, la terre crue nécessite un traitement préalable, à savoir le compactage, la stabilisation par l'ajout du ciment ou l'effet de condition de cure.

Dans l'objectif d'améliorer les caractéristiques hydriques de la terre crue, un traitement à la base de ciment expiré a été utilisé. Des essais hydriques ont été réalisés sur trois échantillons compactés non traité et traité à 8% et 12% pour évaluer l'effet de l'incorporation du ciment et le temps de cure.

Les résultats montrent que l'ajout de ciment expiré jusqu'à 12% dans les échantillons du sol salin compacté, diminue le coefficient de la perméabilité à l'eau, augmente la capillarité.

Mots-clés : sol salin compacté, ciment expiré, perméabilité, capillarité.

Abstract

Raw earth is the oldest construction material shaped by man. This material is capable of meeting both economic and environmental criteria. Systematic cracking due to shrinkage and its high sensitivity to water in various forms (vapor, liquid, and gas) are major limiting factors for its use in earthen construction. The soil requires pretreatment, namely compaction (dynamic or static), the addition of cement, or curing conditions.

To improve the hydraulic properties of the green earth, a treatment using expired cement was applied. Hydraulic tests were conducted on three compacted samples, including an untreated sample and samples treated with 8% and 12% cement, to evaluate the effect of cement incorporation and curing time.

The results show that adding up to 12% dead cement to samples of compacted saline soil reduces the water permeability coefficient and increases capillarity.

Keywords: compacted saline soil, dead cement, permeability, capillarity.

ملخص

تُعدّ التربة أقدم مادة بناء شكّلها الإنسان. وتتميز هذه المادة الصديقة للبيئة بقدرتها على تلبية المتطلبات الاقتصادية والبيئية. غير أن التشققات المنتظمة الناتجة عن الانكماش، إضافة إلى حساسيتها العالية للماء بمختلف أشكاله (السائل، البخار، والرطوبة)، تُعد من أهم العوامل التي تحدّ من استخدامها في البناء بالطين.

قبل استخدامها، تتطلب التربة الخام معالجة مسبقة تتمثل في الدمك، أو التثبيت بإضافة الأسمنت، أو التحكم في ظروف (المعالجة) الإنضاج.

بهدف تحسين الخصائص المائية للتربة الخام، تم اعتماد معالجة باستعمال الأسمنت منتهي الصلاحية. وقد أُجريت اختبارات مائية على ثلاث مجموعات من العينات المدموكة: عينات غير معالجة، وعينات معالجة بنسبة 8%، وأخرى معالجة بنسبة 12% من الأسمنت منتهي الصلاحية، وذلك لتقييم تأثير إضافة الأسمنت ومدة المعالجة.

أظهرت النتائج أن إضافة الأسمنت منتهي الصلاحية بنسبة تصل إلى 12% إلى التربة المالحة المدموكة تؤدي إلى خفض معامل نفاذية الماء، في حين تساهم في زيادة الخاصية الشعرية.

الكلمات المفتاحية: التربة المالحة المضغوطة، الأسمنت منتهي الصلاحية، النفاذية، الظاهرة الشعرية.

Liste des figures

Figure I-1: Schéma des phases du sol (Mehenni, A., 2015)	- 8 -
Figure I-2 : Triangle des textures.....	- 10 -
Figure I-3 : Courbes Proctor fonction de l'énergie de compactage (Yilmaz et al, 2016)...	- 11 -
Figure I-4: compactage selon la méthode de la méthode Sherbrooke(Dibgolongo 2023) -	12 -
Figure I-5: schéma du moule de compactage (Serratrice, J. F. (2018)).....	- 13 -
Figure I-6: essai de compactage statique à 6 MPa stabilisé ave 2 et 4 % de ciment	- 13 -
Figure I-7: L'évolution du coefficient de perméabilité en fonction de la teneur en eau et de la capacitéMoussai, B. (1993).....	- 14 -
Figure I-8: Effet du compactage sur la structure d'un sol(Lambe, 1958)	- 15 -
Figure I-9: Courbes de taille des pores pour l'intrusion de mercure dans trois échantillons de compactés (Delage et al ,1996)	- 15 -
Figure I-10: compactage à différentes énergies OPN, OPM et OPM +25 (Serbah el ,2019- 17 -	
Figure I-11: La densité sèche maximale en fonction de l'énergie de compactage (Hussain, 2017).....	- 17 -
Figure I-12: la teneur en eau optimale en fonction de l'énergie de compactage (Hussain, 2017)	- 18 -
Figure I-13: Poids volumique sec en fonction de la teneur en eau pour différents teneurs en ciment (Laibi, B. (2017))......	- 19 -
Figure I-14: courbe de compactage avec l'ajout du sable normalisé (Seco el al, 2018)...	- 20 -
Figure I-15: l'influence de la nature du sol sur le compactage (Tschebotarioff, 1973).....	- 21 -
Figure I-16 : Les régions de la salinité en monde	- 22 -

Figure I-17 : Densités pour différents degrés de salinité du limono-argileux et de l'argilo-limoneux (Tang et al, 2020).	- 24 -
Figure I-18: Effet de la salinité sur le comportement au compactage selon la méthode Proctor (Ying et al, 2021)	- 24 -
Figure II-1 :la ville syrienne de Tell.	- 26 -
Figure II-2: Architecture de terre dans le monde (CRa-terre)	- 26 -
Figure II-3: La construction en terre crue en Algérie	- 27 -
Figure II-4: Les différents techniques de construction de la terre crue (Craterre, 2009)	- 28 -
Figure II-5: Technique de pisé.....	- 29 -
Figure II-6: Une école construite en pisé à Bonbaden, (en Allemagne).....	- 29 -
Figure II-7: Château de Chabet dans la Loire (42) (Guibaud, 2005).....	- 30 -
Figure II-8: Une construction en torchis à Angers, France.	- 31 -
Figure II-9: Habitation contemporaine en bauge à Marchésieux, Manche (C.-A. de Chazelles)	- 32 -
Figure II-10 Technique de l'adobe (Production Drôle De Trame – 2009)	- 33 -
Figure II-11: Maison de brique de terre compressée.	- 34 -
Figure II-12: différentes types de BTC.....	- 34 -
Figure II-13: Presse hydraulique	- 35 -
Figure II-14: Distribution granulométriques et recommandations (CRA-Terre).	- 36 -
Figure II-15: Carte de plasticité (CRA-Terre)	- 37 -
Figure II-16: Recommandation de la teneur en eau et la densité sèche pour les BTC (Houben et Guillaud 1994).....	- 38 -
Figure III-1: la zone d'étude	- 40 -
Figure III-2: Tamisage par voie humide à 400 µm	- 41 -
Figure III-3: Préparation de la pâte	- 42 -
Figure III-4: Coupelle de casagrande.	- 42 -

Figure III-5: La procédure pour détermination de la limite de plasticité	- 43 -
Figure III-6: L'essai de limite de retrait	- 44 -
Figure III-7: Essai de sédimentometrie.	- 45 -
Figure III-8: Détermination des poids volumique des grains sols.....	- 45 -
Figure III-9: Essai de tache au bleu méthylène	- 46 -
Figure III-10: L'essai de mesure du Ph	- 49 -
Figure III-11: Mesure de la conductivité électrique (Mostifa .F 2023).....	- 50 -
Figure III-12: Le compactage de Proctor du sol Bordjia.....	- 52 -
Figure III-13: l'essai de perméabilité..	- 53 -
Figure III-14: le dispositif de capillarité à l'eau utilisé dans cette mémoire	- 54 -
Figure IV-1: Histogramme d'évaluation des limites d'Atteberg sans l'effet de temps de cure. - 57 -	
Figure IV-2: Courbe de la variation des valeurs de limites d'Atterberg sans l'effet de temps de cure.	- 57 -
Figure IV-3: Histogramme d'évaluation des limites d'Atteberg avec un temps de cure de 7 jours.	- 58 -
Figure IV-4: la bague de Casagrande des échantillons utilisés dans cette étude	- 58 -
Figure IV-5: Histogramme d'évaluation des limites retrait.....	- 59 -
Figure IV-6: La courbe granulométrique	- 60 -
Figure IV-7: variation de VBS en fonction de teneur en eau ciment.....	- 61 -
Figure IV-8: Résultats de Drx du sol de Bordjia	- 63 -
Figure IV-9: Influence de dosage en ciment sur le coefficient K	- 64 -
Figure IV-10: la variation du coefficient Ken fonction de teneurs en eau des échantillons.- 65	
Figure IV-11: la variation du coefficient Cb à différentes teneurs en ciment des échantillons séchés à 28 jours.....	- 66 -

Figure IV-12: Influence de la teneur en eau sur le coefficient C_b - 67 -

Figure IV-13: influence de dosage en ciment sur le coefficient C_b - 67 -

Liste de tableau

Tableau I-1: Appréciation du pH et de la salinité (Bocoum, M. 2004 cité par Diallo et al,2015	- 23 -
Tableau II-1: Granulométrie recommandé par (CRA-Terre)	- 35 -
Tableau III-1: Classification proposée par Dakshanamurthy et Raman (1973) (bouklikha.R 2015).....	- 42 -
Tableau III-2: Ordres de grandeur (Principaux seuil indicatifs) (bouklikha.R 2015).....	- 43 -
Tableau III-3: différentes valeurs de la densité des grains solides pour certain sol	- 46 -
Tableau III-4 : Classement des sols en fonction du VBS.....	- 47 -
Tableau III-5: Type de sol en fonction du % en CaCO ₃ (bouklikha.R 2015).	- 48 -
Tableau III-6: Type de sol en fonction du % en MO (Meftah .K,2008).	- 49 -
Tableau IV-1 : caractéristiques granulométrique du sol étudié	- 60 -
Tableau IV-2 : Les valeurs de bleu méthylène et la surface spécifique	- 61 -
Tableau IV-3: les caractéristiques initiales des échantillons compacté.....	- 63 -

Résumé

L'état de saturation d'un sol compacté destiné à la fabrication d'un matériau terre influence sa structure et ses propriétés hydriques. Cet éco-matériau est capable de répondre aux critères économiques et environnementaux. La fissuration systématique due au retrait et sa forte sensibilité à l'eau vis-à-vis de l'eau sous différentes formes (vapeur, liquide et gaz), constituent des facteurs limitants majeurs pour son utilisation dans la construction en terre. La terre nécessite un traitement préalable, à savoir le compactage (dynamique ou statique), l'ajout du ciment ou l'effet de condition de cure.

Dans l'objectif d'améliorer les caractéristiques hydriques de la terre crue, un traitement à la base de ciment expiré a été utilisé. Des essais hydriques ont été réalisés sur trois échantillons compactés non traité et traité à 8% et 12% pour évaluer l'effet de l'incorporation du ciment et le temps de cure.

Les résultats montrent que l'ajout de ciment expiré jusqu'à 12% dans les échantillons du sol salin compacté, diminue le coefficient de la perméabilité à l'eau, augmente la capillarité.

Mots-clés : sol salin compacté, ciment expiré, perméabilité, capillarité.

Abstract

The degree of saturation of compacted soil used to produce earth-based materials influences its structure and hydraulic properties. This eco-material is capable of meeting both economic and environmental criteria. Systematic cracking due to shrinkage and its high sensitivity to water in various forms (vapor, liquid, and gas) are major limiting factors for its use in earthen construction. The soil requires pretreatment, namely compaction (dynamic or static), the addition of cement, or curing conditions.

To improve the hydraulic properties of the green earth, a treatment using slaked cement was applied. Hydraulic tests were conducted on three compacted samples, including an untreated sample and samples treated with 8% and 12% cement, to evaluate the effect of cement incorporation and curing time.

The results show that adding up to 12% dead cement to samples of compacted saline soil reduces the water permeability coefficient and increases capillarity.

Keywords: compacted saline soil, dead cement, permeability, capillarity.

Table des matières

Dédicaces.....	i
Dédicaces.....	ii
Remerciements	iii
Liste de tableau.....	xi
Résumé	xii
Introduction Générale.....	- 4 -
Chapitre01 :Généralité sur les sols compactés	- 6 -
1.2 Définition d'un sol	- 6 -
1.3 Caractéristiques des sols.....	- 6 -
1.3.1 Caractéristiques physiques des sols compacté :	- 7 -
1.4 Caractéristiques minéralogiques des sols	- 8 -
1.5Texture du sol	- 9 -
1.5 1.Les classes texturales :.....	- 9 -
1.6 Les sols compactés.....	- 10 -
1.6.1 Définition du Compactage :	- 10 -
1.6.2 Les méthodes de compactage :	- 11 -
1.6.4 L'énergie de compactage :	- 16 -
1.6.5 Influence de ciment, chaux sur le compactage :	- 18 -

1.6.6 La teneur en eau au cours du compactage :	- 20 -
1.6.7 L'influence de la nature du sol :	- 20 -
1.6.8 Problème liés au compactage :	- 21 -
1.7 Les sols salins :	- 22 -
1.7. 1.Influence de la salinité sur le compactage des sols	- 23 -
1.8 conclusion	- 24 -
Chapitre 02 : Construction en terre cure.....	- 25 -
2.1 Introduction	- 25 -
2.2 La terre crue :	- 25 -
2.2.1 La construction en bloc de terre crue dans le monde :	- 25 -
2.2.2 La construction en bloc de terre crue dans Algérie :	- 27 -
2.3 Les techniques de construction en terre crue :	- 27 -
2.3.1 Technique de pisé :	Error! Bookmark not defined.
2.3.2 Technique de torchis :	- 31 -
2.3.3 Technique de bauge :	- 31 -
2.3.4 Technique de l'adobe :	- 32 -
2.3.5 Brique de terre comprimée :	- 33 -
2.4 : Critères de choix du matériau terre	- 35 -
2.4.1 La granulométrie du sol :	- 35 -
2.4.2 La plasticité du sol :	- 37 -
2.4.3 La confection du sol :	- 37 -
2.5 Conclusion	- 38 -

Chapitre 03 : Identification du sol.....	38 -
3.1 Introduction	39 -
3.2 Présentation de la zone d'étude	39 -
3.3 Préparation des échantillons de sols avant identification	40 -
3.3.1 Séchage et broyage :	40 -
3.3.2 Préparation des mélanges :	40 -
3.3.3 Vérification de la teneur en eau :	36-
3.4 Identification du sol salin	41 -
3.4.1 Limites d'Atterberg :	41 -
3.4.2 limite de plasticité :	43 -
3.4.3 La limite de retrait :	44 -
3.4.4 Analyse granulométrique :	44 -
3.4.5 Détermination des poids volumique des grains sols :	45 -
3.4.6 Essai de bleu méthylène :	46 -
3.4.7 Dosage des carbonates CaCO ₃ (NF ISO 10693) :	48 -
3.4.8 Le teneur en matières organiques MO :	48 -
3.4.9 Mesure du potentiel d'hydrogène ph (NF X 31-103) :	49 -
3.4.10 Mesure de la conductivité électrique :	49 -
3.4.11 L'essai de Proctor :	50 -
3.4.12 L'essai de Perméabilité :	52 -
3.4.13 Capillarité à l'eau :	54 -
Chapitre 04 : Résultats et discussion Error! Bookmark not defined.....	56-

4.1 Introduction	- 56 -
4.2 Limites d'Atterberg.....	- 56 -
4.3 La limite de retrait :	-59-
4.3 :Analyse granulométrique	- 59 -
4.4 :Propriétés Chimique.....	- 61 -
4.4.1 Essai de bleu méthylène :	- 61 -
4.4.2 : Mesure du potentiel d'hydrogène ph (NF X 31-103)	- 62 -
4.4.3 : Minéralogie par Diffraction des Rayons X (DRX)	- 62 -
4.4.4 Confection des échantillons :	- 63 -
4.4.5 L'essai de Perméabilité :	- 63 -
4.4.6 Capillarité à l'eau :	- 65 -
4.5 : Conclusion	- 68 -
Conclusion générale	- 69 -

Introduction Générale

Le secteur du bâtiment représente environ 30 à 40 % de la consommation mondiale d'énergie, selon l'IEA (International Energy Agency). Alors l'orientation vers l'utilisation des matériaux naturels et écologiques dans les bâtiments est un sujet d'actualité. La terre crue est l'une des matières naturelles les plus abondantes. Néanmoins, une étude de ses propriétés est très importante avant son utilisation comme un matériau de construction vu sa vulnérabilité vis-à-vis de l'eau. En addition, l'évaluation de ses caractéristiques hydriques est également importante afin d'estimer son aptitude aux échanges avec l'environnement extérieur. Une étude des performances hydriques permet de connaître le comportement d'un matériau et limiter sa dégradation face aux conditions climatiques.

La terre crue présente des propriétés complexes, notamment lorsque leur teneur en eau et leur vide entre les interstices. Parmi les méthodes géotechniques utilisées pour améliorer cette la fragilité de la terre crue, le compactage joue un rôle primordial. En réduisant les vides et en chassant l'air, cette technique accroît significativement la résistance mécanique tout en réduisant la perméabilité. En outre, la stabilisation représente une solution aux problème de la terre crue.

Cette thèse vise principalement à analyser le comportement du sol en examinant l'impact des paramètres de mise en œuvre, tels que l'ajout de ciment et l'effet de temps de cure. Pour atteindre ces objectifs, la recherche est organisée en plusieurs chapitres :

Dans le premier chapitre présente des généralités sur les sols compactés, des principes fondamentaux de la mécanique des sols, les techniques de compactage statique et dynamique et des études de cas illustrant l'influence de la teneur en eau et mode de compactage sur la perméabilité à l'eau

Ce chapitre présente un aperçu de la construction en terre cure, en mettant l'accent sur les leur historique en monde et en Algérie. Il recense les techniques utilisées comme le pisé, la brique

de terre comprimée puis une analyse des recommandations donnée par CRa-terre qui permet de sélectionner le sol adapté à la construction en terre.

Le troisième chapitre détaille les protocoles expérimentaux et les méthodologies utilisés pour réaliser différents essais, notamment la mesure de la perméabilité et des propriétés capillaires des sols.

En fin, le quatrième chapitre présente des résultats et des discussions ainsi qu'une analyse des données de laboratoire, en soulignant les performances hydriques du sol étudié.

Chapitre 01: Généralité sur les sols compactés

1.1 Introduction

Les sols fins sont utilisés en génie civil, comme remblais des digues ou des routes, des barrages, et comme un sol support de différents ouvrages. Ces caractéristiques hydromécaniques particulières rendent de tels sols incapables à supporter les structures. Ces sols sont de nature très complexe, ils ont posé toujours de nombreux problèmes dans le domaine de la géotechnique, ce qui nécessite un traitement approprié pour améliorer leurs caractéristiques lorsque le sol est utilisé comme matériau constitutif des couches de chaussées.

Le traitement par compactage est un des procédés suivis pour stabiliser ou traiter de ces sols de mauvaise qualité.

Dans ce chapitre, nous allons focaliser l'amélioration par compactage (dynamique) en particulier la relation entre le compactage et les caractéristiques des sols compactés en utilisant les différentes corrélations qui relient entre les paramètres du compactage et les propriétés du sol.

1.2 Définition d'un sol

Le sol est un matériau complexe, variable, hétérogène, constitué de grains de solide et de pores remplis d'eau et d'air. Le sol est donc un matériau à trois phases, phase solide (Squelette minéral), phase liquide et phase gazeuse. Chaque phase joue un rôle bien précis dans le comportement du sol.

1.2.1 Caractéristiques des sols

L'étude des composants des sols attire l'attention de plusieurs chercheurs dans les domaines de la géologie, de la pédologie et de la géotechnique. Cette dernière donne une grande importance au sol en tant que matériau de construction et s'intéresse au sol dans ses interactions avec les

Chapitre 1 : Généralité sur les sols compactés

agents chimiques de traitement. L'étude géotechnique comporte une identification complète du sol naturel ou reconstitué et une caractérisation du comportement thermo-hydro-mécaniques.

1.2.1.1 Caractéristiques physiques des sols compacté

Une phase solide :

Le réarrangement des grains solides forme le squelette du sol, constitué par les minéraux et des éléments organiques.

Une phase liquide :

Selon (El Youssef, R. (2026) l'eau interstitielle contenue dans le sol compacté décompose en:

- L'eau de constitution, est liée aux caractéristiques chimique ou minéral du sol.
- L'eau adsorbée comprend l'eau hygroscopique, forme une fine couche autour des grains du sol.
- L'eau capillaire, quant à elle, est maintenue dans les pores fins par des forces de tension entre l'eau et l'air, tout en restant partiellement influencée par la gravité.
- L'eau libre représente la quantité d'eau qui passe facilement dans les inter-pores du sol sous l'effet de la gravité ou d'un gradient de pression.

Une phase gazeuse :

Les pores inter-granulaires constitutifs du sol sont occupés par de l'air, lorsque le sol est sec, et la vapeur d'eau lorsque le sol est humide.

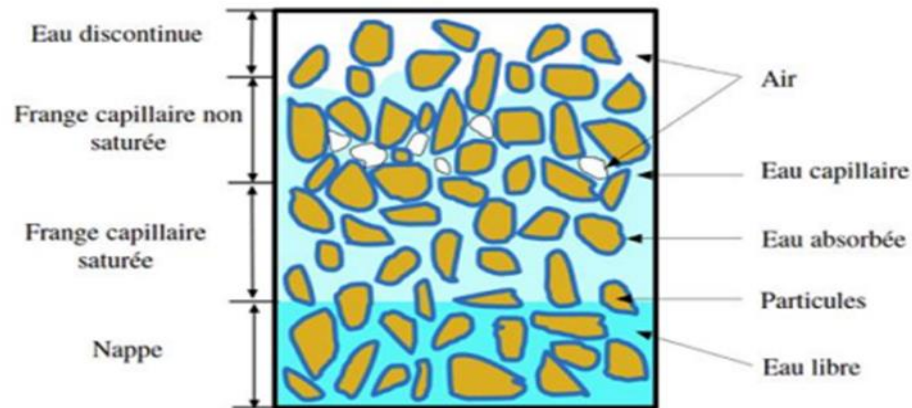


Figure I-1: Schéma des phases du sol (Mehenni, A., 2015)

1.2.1.2 Caractéristiques minéralogiques des sols

Les sols sont constitués de particules de minéraux regroupées en agrégats. Ces minéraux sont stables ou en train d'évoluer dans les conditions thermo barométriques et climatiques de la surface de la terre. Généralement y sont rencontrés :

Les constituants minéraux des sols, tels que le quartz, les argiles, les feldspaths (potassiques et plagioclases), les micas, les carbonates (calcite et dolomite) ainsi que les oxydes et hydroxydes métalliques (hématite, goethite, limonite), se manifestent principalement sous trois formes physiques :

- **Grains polygonaux :** de géométrie plus ou moins régulière, leur taille varie de quelques micromètres à plusieurs millimètres.
- **Lamelles microscopiques :** caractéristiques des minéraux argileux, dont la dimension maximale reste inférieure à quelques microns.
- **Agrégats rocheux :** fragments de roches mères dont la morphologie dépend directement de l'assemblage des minéraux qui les composent.

Chapitre 1 : Généralité sur les sols compactés

Les propriétés physiques et mécaniques du sol dépendent de la nature des assemblages minéraux. Ainsi les minéraux granulaires (quartz, carbonates) n'ont pas de cohésion propre. Seules les argiles présentent une cohésion, qui résulte d'interactions spécifiques avec l'eau.

1.5 Texture du sol

La caractérisation de la texture des sols (gravier, sable, limon et argile) repose sur la proportion des différentes fractions granulométriques. Le tableau ci-dessous présente la classification internationale de ces fractions en fonction de leur taille.

Tableau I.1 : Diamètre des particules en μm de chaque fraction granulaire.

Fractions Granulaires	Diamètre des particules en μm
Sable grossier	200 - 2000
Sable fin	50 - 200
Limon grossier	20 - 50
Limon fin	2 - 20
Argile	< 2

1.5 1. Les classes texturales :

La désignation de la texture est une étape très importante après la caractérisation granulométrique et sédimentométrique. Par exemple dans le triangle (figure I.2), représente le pourcentage de chaque élément ; sable, limon ou argile. Une appellation est donnée de chaque sol signale une texture à dominance sableuse et a teneur d'argile appréciable. La détermination de la classe texturale se fait par l'intermédiaire du triangle de texture Ex : AS, SA, AL.....etc.

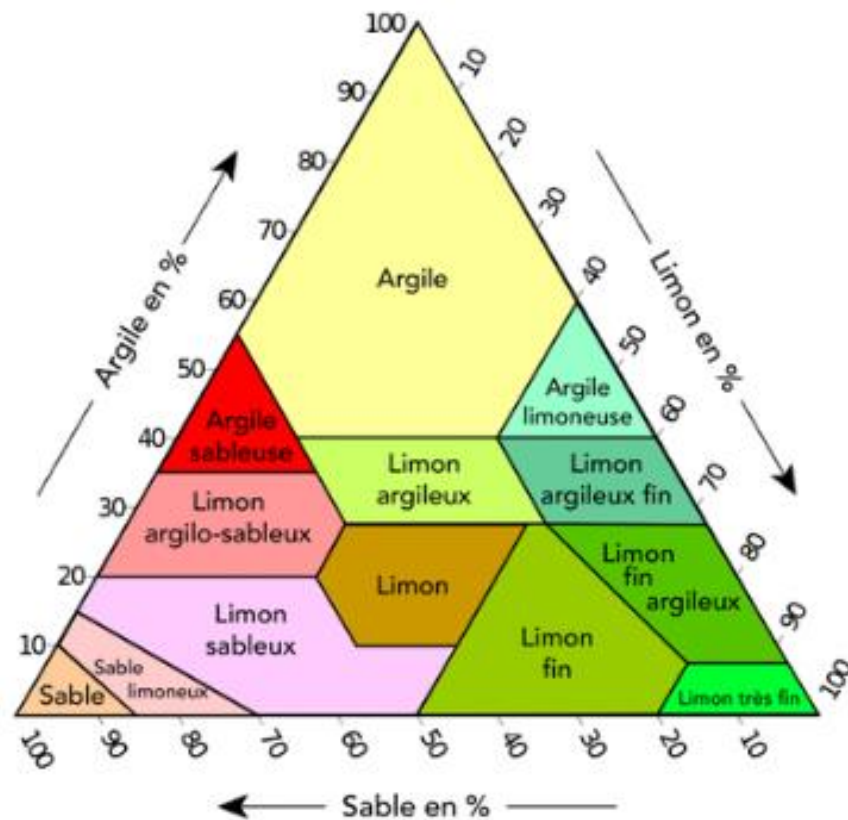


Figure I-2 :Triangle des textures

1.6 Les sols compactés

1.2.2 Définition du Compactage :

Dans les sols compactés, Le mode de compactage est un réarrangement des particules entre eux sous une charge exercée afin de réduire le pourcentage des vides et améliorer le comportement mécanique des sols. Les travaux de compactage sont présentés souvent dans les terrassements, les talus, barrage et projets routiers.

Le compactage conduit à une diminution des pores remplis d'air sans expulsion d'eau contrairement à la consolidation. Dans ce qui suit, nous aborderons l'ensemble des aspects liés aux objectifs assignés au compactage des sols.

1.6.2 Les méthodes de compactage :

➤ Compactage dynamiques

L'essai de Proctor normal ou modifié est le plus utilisé depuis les années 1950 pour déterminer les caractéristiques de compactage ; la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale. L'énergie de compactage augmente la densité sèche accroît et la teneur en eau vers le coté sec (Yilmaz et al, 2016).

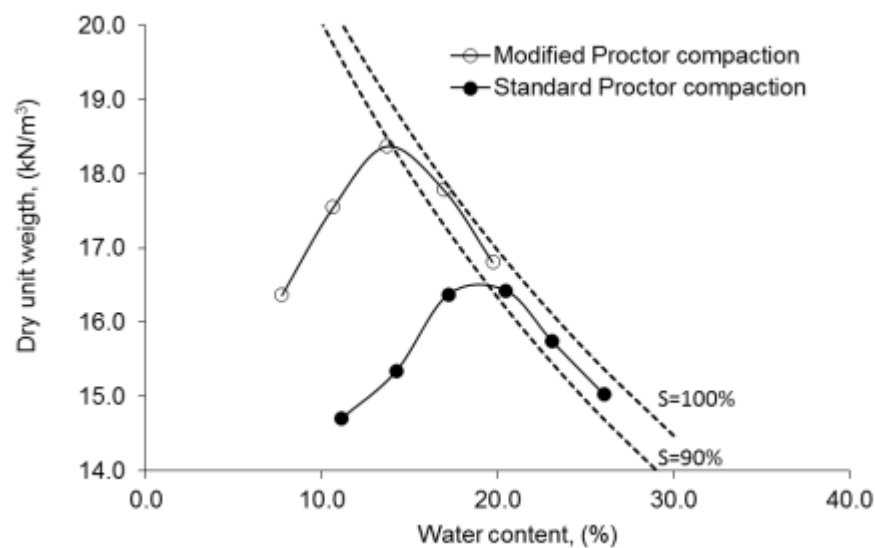


Figure I-3 : Courbes Proctor fonction de l'énergie de compactage (Yilmaz et al, 2016)

Une autre méthode a été présentée par (Dibgolongo, 2023) celle de la méthode Sherbrooke est très simple il suffit juste de mettre la sonde dans le moule Proctor toujours en présence du sol compacté puis par une inondation fixée arbitrairement à quelques minutes afin de simuler l'inondation qui est faite in situ.

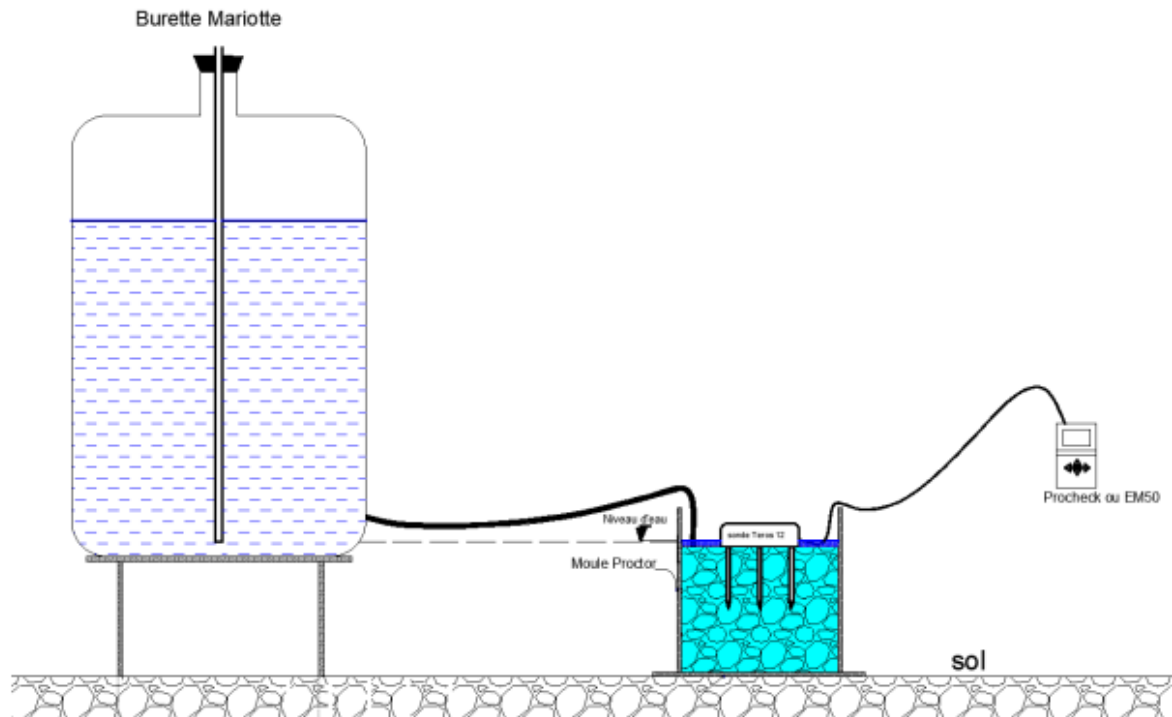


Figure I-4: compactage selon la méthode de la méthode Sherbrooke(Dibgolongo 2023)

➤ Compactage statique

Parmi les premières chercheurs qui ont commencé à compacter le sol avec un compactage statique (Esteoule, J., & Istvan, C. (1991) Moussaï et al., 1993 ; Cui et Delage, 1996 ; Mesbah et al., 1999) avec deux type :

- Compactage statique en contrôlant la force.
- Compactage statique en contrôlant le déplacement.

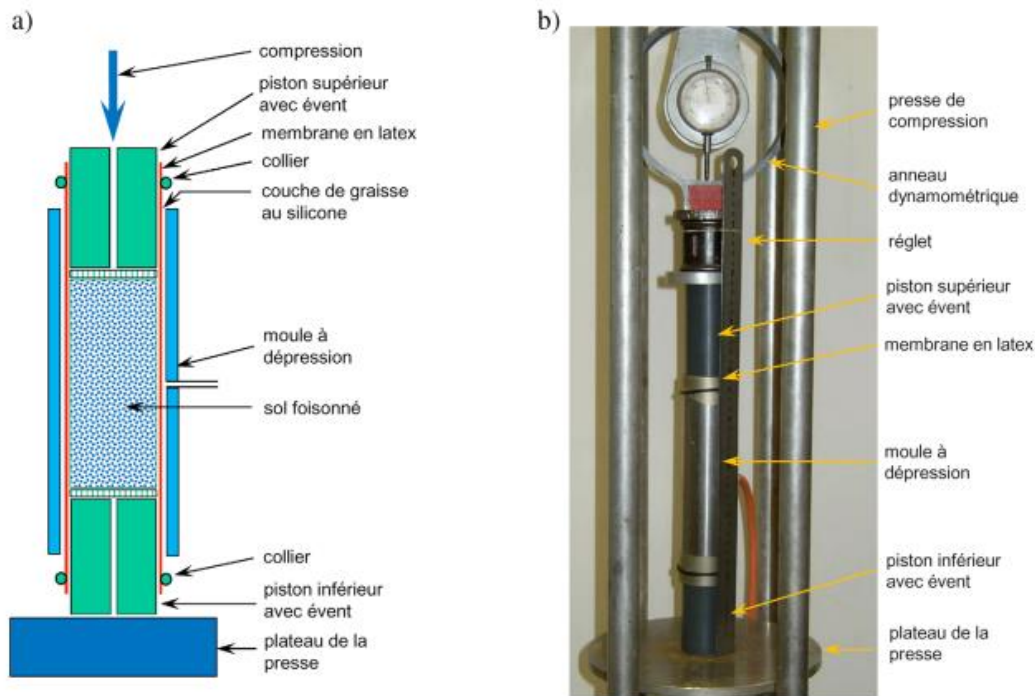


Figure I-5:schéma du moule de compactage (Serratrice, J. F. (2018))

Dans les essais de compactage statique de (Mesbah et al,1999) d'un sol argileux traité au 2 % et 4 de ciment avec une contrainte de 6 MPa. L'ajout de ciment permet de diminuer la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale décale vers des valeurs inférieures.

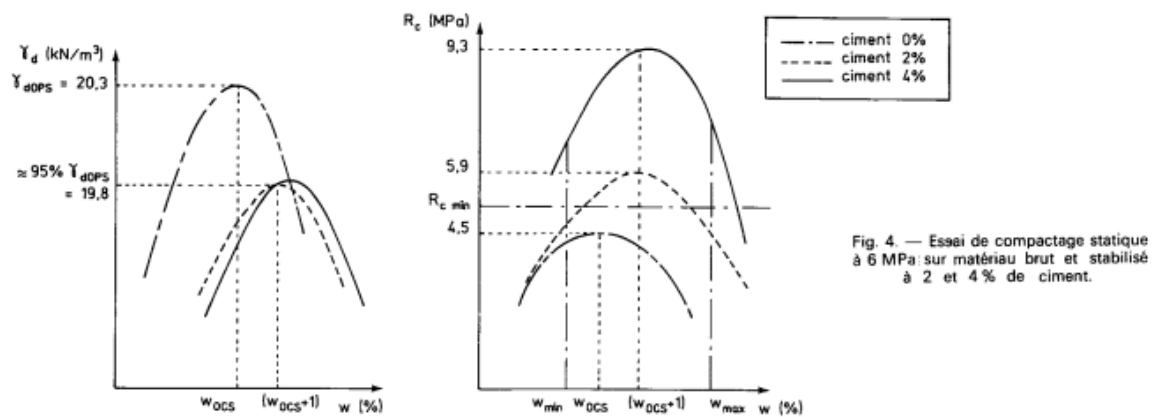


Fig. 4. — Essai de compactage statique à 6 MPa sur matériau brut et stabilisé à 2 et 4 % de ciment.

Figure I-6:essai de compactage statique à 6 MPa stabilisé ave 2 et 4 % de ciment

Chapitre 1 : Généralité sur les sols compactés

Cette augmentation de l'énergie de compactage est directement liée au réarrangement des grains entre eux, favorisant une structure plus dense et plus compacte. Ce phénomène entraîne une diminution de la perméabilité du matériau, comme l'illustre la figure.

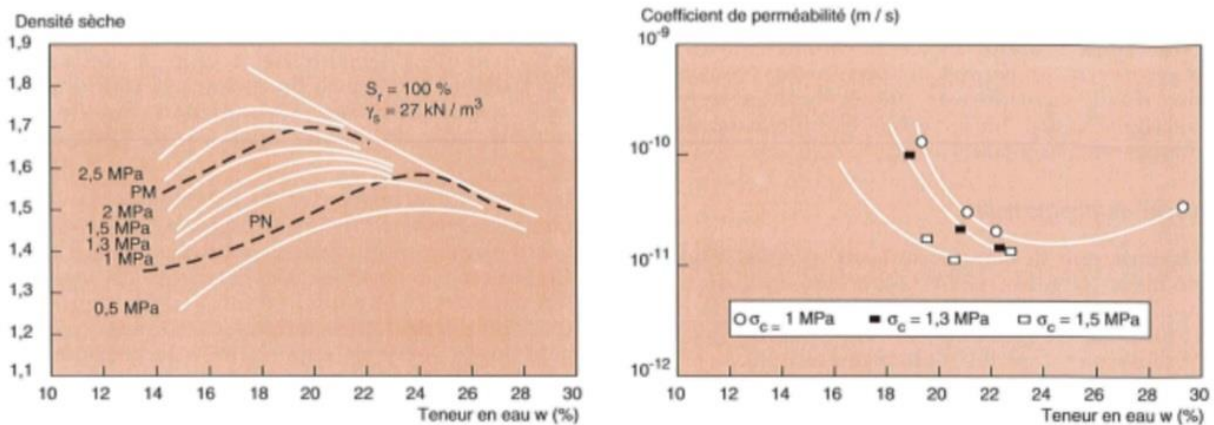


Figure I-7: L'évolution du coefficient de perméabilité en fonction de la teneur en eau et de la compacité Moussai, B. (1993)

1.6.3 Microstructure des sols fins compactés :

(Lambe, 1958) a donné une description de l'orientation des particules et l'influence du comptage sur l'arrangement des grains dans le côté sec, côté humide et au niveau de l'optimum de Proctor (figure I.8).

La figure 555 représente la distribution des tailles des pores des trois échantillons ; compacté à l'optimum, au côté sec et au côté humide. L'ensemble des petits pores ayant un rayon d'entrée compris entre 0,01 et 0,18 μm ont été observée dans les trois échantillons par contre des pores les plus grandes au tour de 4 μm ont été enregistrée dans les échantillons sec. Une autre remarque très importante est que l'échantillon compacté à l'optimum de Proctor présente le plus faible volume poreux par rapport aux autres échantillons.

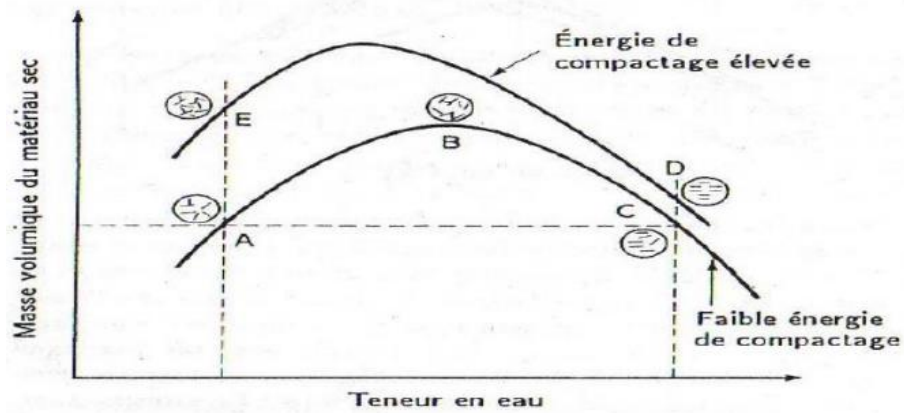


Figure I-8:Effet du compactage sur la structure d'un sol(Lambe, 1958) .

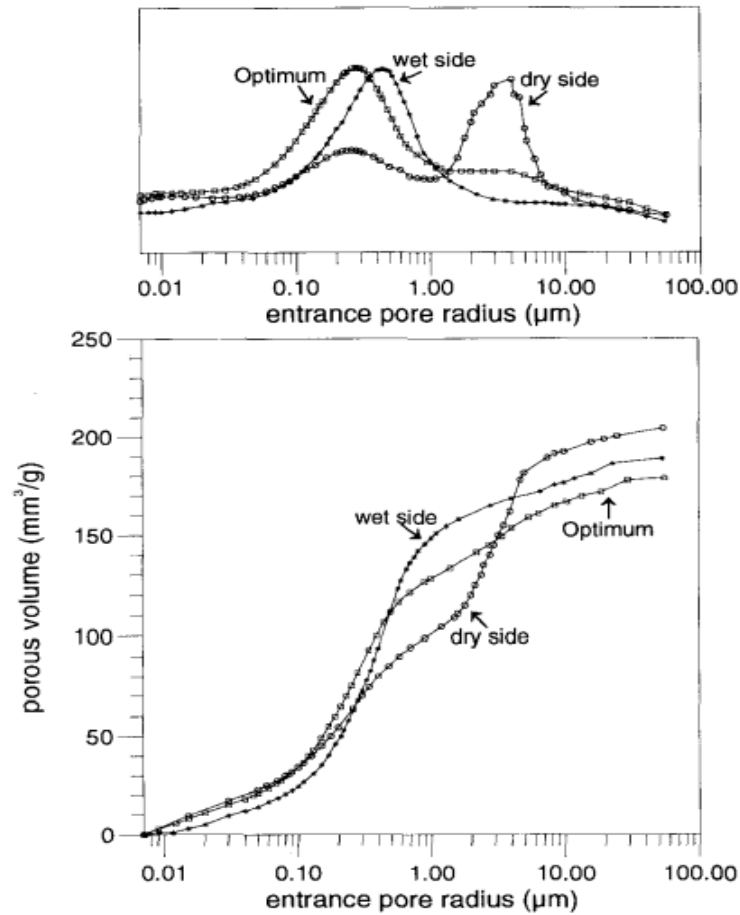


Figure I-9:Courbes de taille des pores pour l'intrusion de mercure dans trois échantillons de compactés (Delage et al ,1996)

Chapitre 1 : Généralité sur les sols compactés

1.6.4 L'énergie de compactage :

Un sol compacté est la conséquence de l'application d'une énergie de compactage sur un sol donné. Cette énergie est appliquée, au laboratoire, selon une norme bien définie impliquant un mouton cylindrique de masse et de diamètre normalisés que l'on fait chuter 25 fois d'une hauteur donnée sur le sol contenu dans un moule cylindrique. Le compactage se fait en trois couches pour l'essai Proctor normal et en cinq couches pour le Proctor modifié.

L'énergie de compactage est une mesure de l'énergie mécanique appliquée à une masse de sol. Elle est exprimée par (MN/m³) et définie comme suit :

$$E = \frac{N.H.m.g}{V} \quad (1)$$

N : Nombre total de coups.

H : Hauteur de chute de la dame.

m : Masse de la dame.

g: Accélération de la pesanteur.

V : Volume du matériau compacté dans le moule.

(Hussain, 2017) a compacté un sol argileux-limoneux (WL=126.2%, Pl=43%) utilisant la norme de (ASTM D 422 -63) pour voir l'influence et le taux de l'énergie de compactage sur la variation de la densité moyenne (MDD) et de la densité apparente (OMC) en fonction de l'énergie de compactage. Lorsque l'énergie de compactage est passée de 237 kJ/m³ à 1 197 kJ/m³, la densité est passée de 1,61 g/cm³ à 1,75 g/cm³.

Les énergies exercées lors du compactage (OPN, OPM et OPM+25 coups) de (Serbah et al, 2019) permet de tracer la densité sèche qui dépend teneur en eau des sédiments de dragage. La courbe Proctor met en évidence l'existence d'une teneur en eau optimale WOPN, pour laquelle la densité sèche est maximale, ce qui montre que le compactage à optimums de Proctor plus de 25 coups permet d'augmenter la densité sèche maximale à 5%.

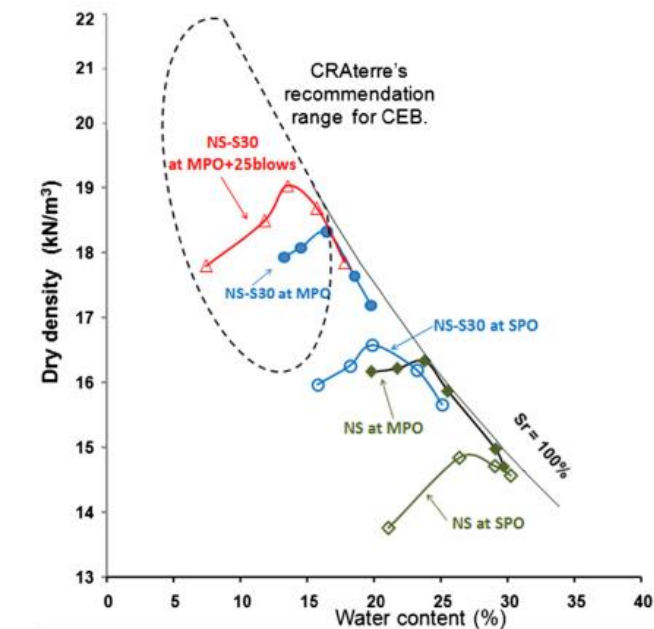


Figure I-10: compactage à différentes énergies OPN, OPM et OPM +25 (Serbah el ,2019)

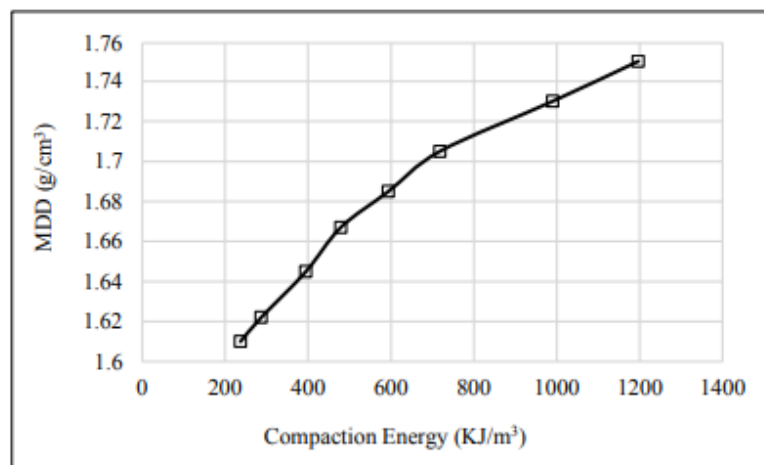


Figure I-11: La densité sèche maximale en fonction de l'énergie de compactage (Hussain, 2017)

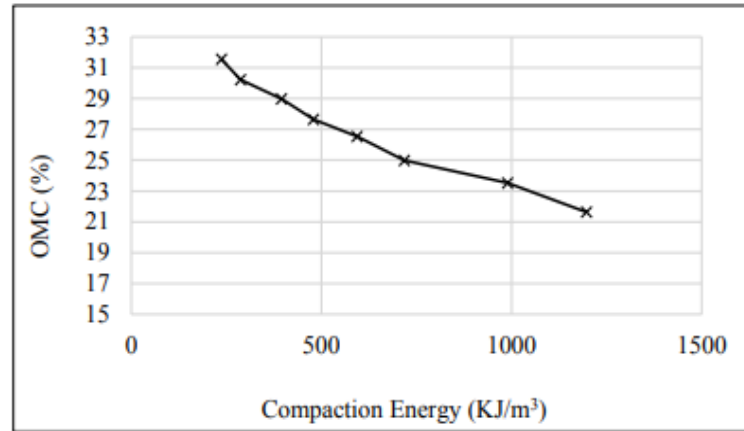
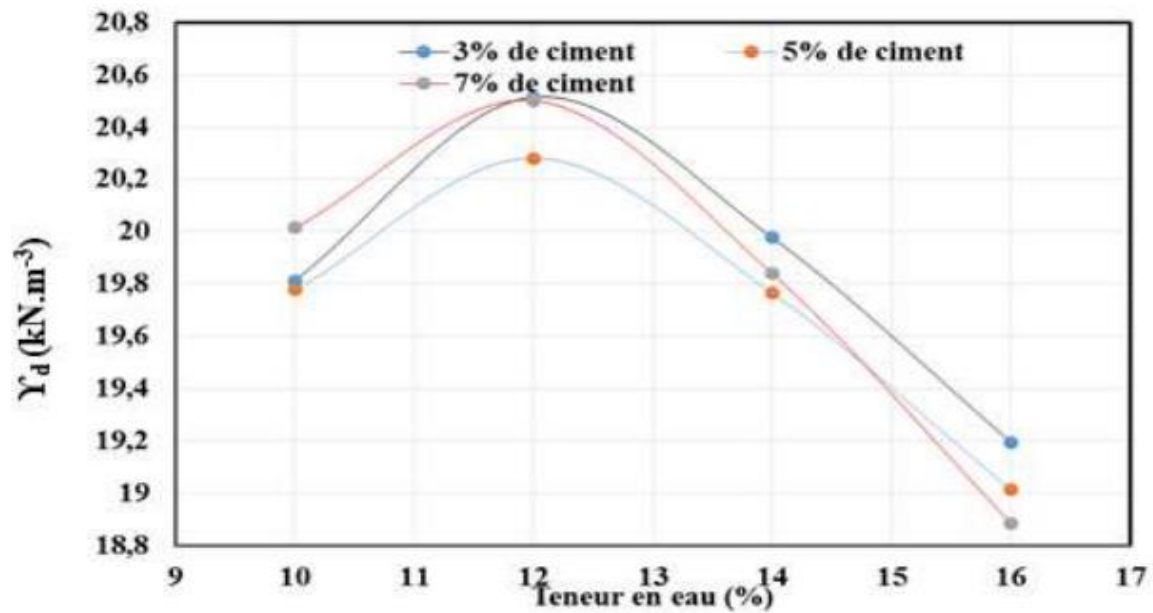


Figure I-12: la teneur en eau optimale en fonction de l'énergie de compactage (Hussain, 2017)

1.6.5 Influence de ciment, chaux sur le compactage :

Une modification de la structure du sol après le traitement avec un ajout du pourcentage 3%, 5% et 12% de ciment a été observée dans l'étude de (Laibi, B. (2017)). Cette ajout de ciment au sol entraînant une modification des caractéristiques du compactage utilisé pour la conception de brique de terre comprimée. D'après la figure, il n'existe pas une différence entre la valeur de teneur en eau optimale pour les trois dosages en ciment.



FigureI-13: Poids volumique sec en fonction de la teneur en eau pour différentes teneurs en ciment (Laibi, B. (2017)).

Afin de voir l'influence du sable sur un sol écrêté à 2mm ($WL = 25.72\%$ and $PL = 18.05$) est composé de plus de 50% de calcite, (Seco et al, 2018) a ont obtenu des valeurs de de densité augmente avec la teneur en sable normalisé.

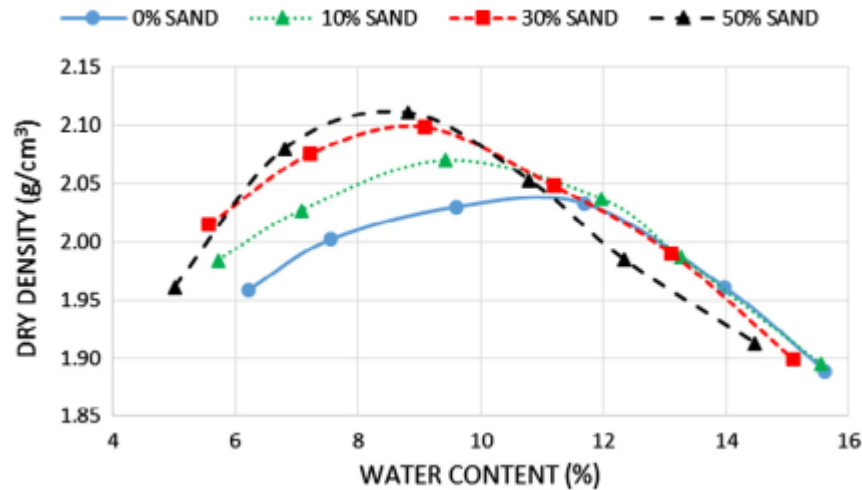


Figure I-14: courbe de compactage avec l'ajout du sable normalisé (Seco el al, 2018)

1.6.6 La teneur en eau au cours du compactage :

La compacité, la compressibilité, la résistance à la compression et au cisellement sont des caractéristiques très influencées par la teneur en eau du compactage des sols argileux ou limoneux argileux.

ALONSO, 1993 a essayé de trouver de solutions aux problèmes des déformations causées par les variations de teneur en eau au cours de la période d'utilisation des sols. Il rajouté que les sols compactés ont tendance à gonfler ou s'effondrer à cause de plusieurs paramètres une tel que la variation de la teneur en eau, la variété de la minéralogie, la densification lors de l'application d'une contrainte ou des énergies de compactage.

Concernant le comportement mécanique d'un sol argileux est très influencé par l'effets de la taille des agrégats, de la teneur en eau initiale et de la pression appliquée (Derdour et al, 1994).

1.6.7 L'influence de la nature du sol :

Sur la figure (I.15) les symboles A, B, Creprésente Proctor modifié pour le sol 1, Proctor standard pour le sol 2, Proctor 15 coups pour le sol 3. Les courbes de compactage des sables présentent généralement un maximum bien marqué, ce qui montre que leur densité sèche varie sensiblement avec la teneur en eau. En revanche, les sols dont la courbe de compactage est plus plate sont moins sensibles aux variations de teneur en eau ; ils constituent donc de bons

Chapitre 1 : Généralité sur les sols compactés

matériaux de remblai (Figure 0.15). Ainsi, le compactage des sables est relativement peu influencé par l'eau, tandis que l'humidité joue un rôle très important dans le compactage des sols argileux.

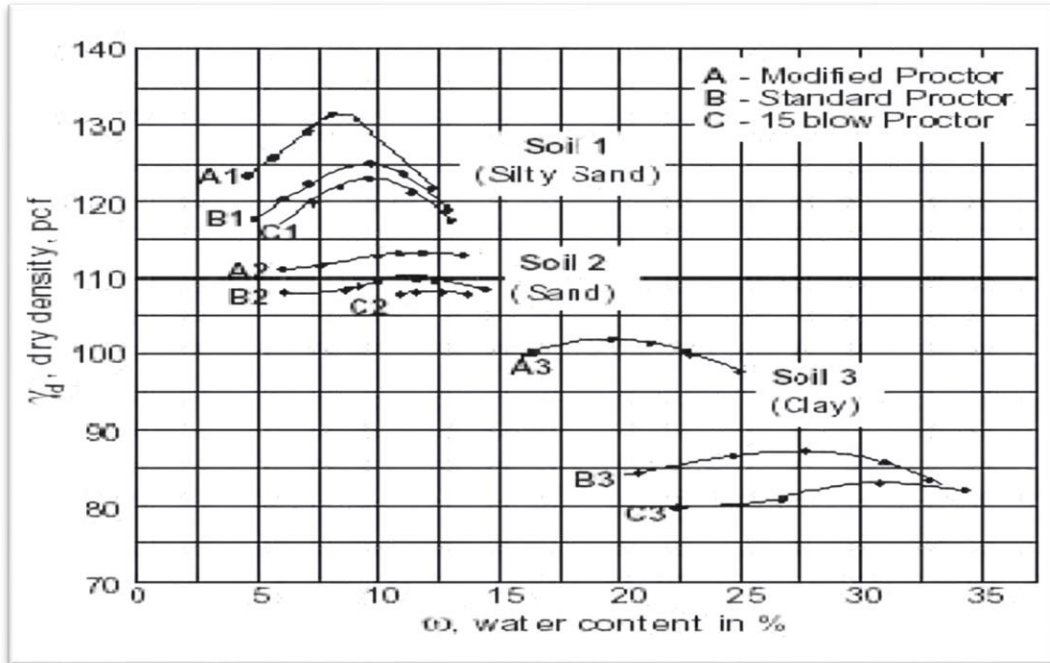


Figure I-15: l'influence de la nature du sol sur le compactage (Tschebotarioff, 1973)

1.6.8 Problème liés au compactage :

- **Matelassage** : Comportement d'un sol à l'état très humide lors du compactage, se traduit par la formation de bourrelets, par une certaine instabilité de l'engin et finalement une impossibilité de compactage.
- **Feuilletage** : Dégâts sous forme de clivage lamellaire qui peuvent conduire à une destruction de tesson qui se désagrège suivant une succession de plans parallèles.
- **Orniérage** : Déformation de la section transversale de la chaussée (forme de dalot) suivant les sentiers de roues. La présence d'orniérage est souvent caractéristique d'un problème de capacité structurelle.

1.7 Les sols salins :

Dans les plusieurs régions en monde, l'eau dans le sol présente généralement une certaine salinité. Une estimation indique que 7% de la superficie mondiale des terres est affectée par la salinité (I.16). Par définition la salinité est de la pourcentage existence des sels dans le sol. Deux paramètres essentielle permettent de caractériser de la salinité des sols sont des paramètres physico-chimiques tel que la conductivité électrique (CE), le pH selon (Bocoum, M. 2004) sont représenté dans tableau (I.1).

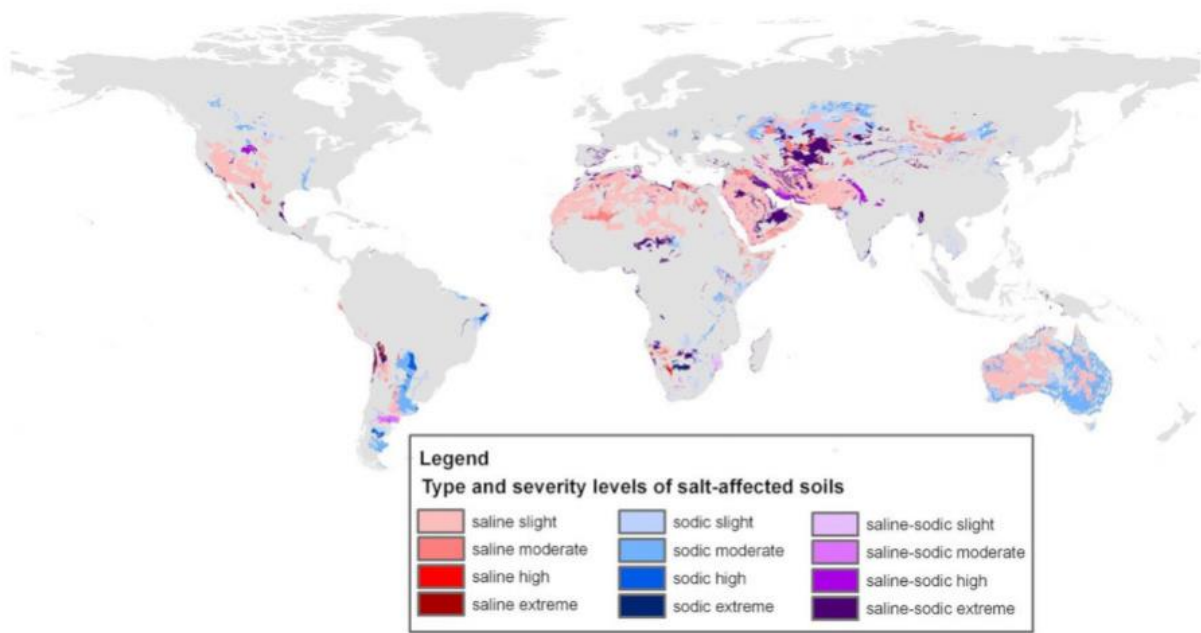


Figure I-16 :Les régions de la salinité en monde

(<https://www.encyclopedie-environnement.org/zoom/salinisation-sols/>)

Chapitre 1 : Généralité sur les sols compactés

Tableau I-1: Appréciation du pH et de la salinité (Bocoum, M. 2004 cité par Diallo et al, 2015)

pH		Conductivité Electrique (CE)	
Gammes de pH	Sol	Conductivité Electrique (iS/cm)	Sol
< 4,5	Extrêmement acide	< 250	Non salin
4,6 - 5,2	Très acide	250 – 500	Légèrement salin
5,3 - 5,5	Acide	500 – 1000	Salin
5,6 – 6,0	Modérément acide	1000 – 2000	Très salin
6,1 – 6,6	Légèrement acide	> 2000	Extrêmement salin
6,7 – 7,2	Neutre		
7,3 – 7,9	Légèrement alcalin		
8,0 – 8,5	Alcalin		
> 8,6	Très alcalin		

1.7. 1. Influence de la salinité sur le compactage des sols

Une relation proportionnelle entre la salinité et la densité a été obtenue par (Tang et al, 2020) lors des essais de compactage d'un deux sol argile limoneuse et limon limoneux. Une diminution de la densité est observée pour les échantillons qui contiennent des argiles.

Dans la figure de compactage (Ying et al, 2021), l'ajout de sel provoque une diminution de la densité sèche et la teneur en eau décale vers le côté humide. Ce qui implique que le sol non salé présente une densité sèche maximale plus élevée et une teneur en eau optimale plus faible que celles du sol naturel.

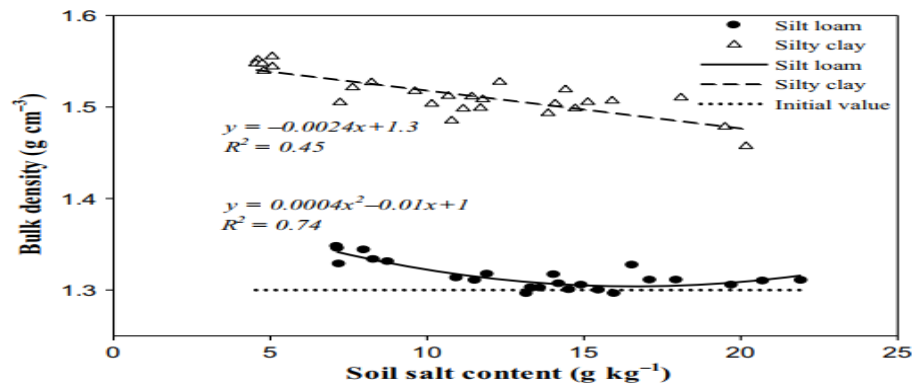


Figure I-17 : Densités pour différents degrés de salinité du limono-argileux et de l'argilo-limoneux (Tang et al, 2020).

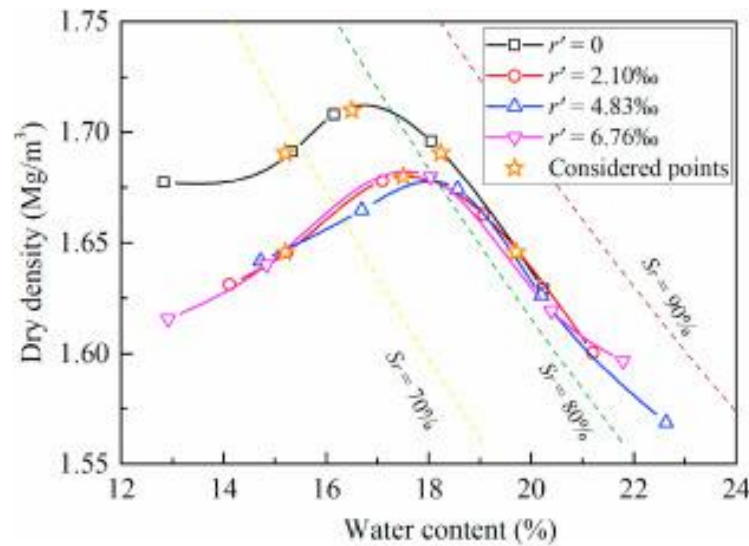


Figure I-18: Effet de la salinité sur le comportement au compactage selon la méthode Proctor (Ying et al, 2021)

1.8 conclusion

Les sols compactés par leur mode de fabrication sont complexes car ils sont constitués de trois phases : solides, air et eau. On a touché dans ce chapitre, plusieurs aspects touchant les sols compactés : définition de compactage, objectif de compactage, l'influence de plusieurs paramètres comme énergie de compactage, nature de sol et la teneur en eau, difficultés et en dernier lieu les corrélations se rapportant aux sols compactés.

Chapitre 02 : Construction en terre crue

Chapitre 02 : Construction en terre crue

2.1 Introduction

Construire en terre est technique qui a été utilisée depuis la naissance de l'être humaine. Vu les effets de serre et le changement climatique et les consommations énergétiques dans le monde, les chercheurs sont en plus conscients de l'importance d'utiliser la terre crue ou stabilisée en tant que matériau de construction. Donc cette démarche représente une stratégie qui à limiter l'utilisation des matériaux tel que le béton, la chaux et le ciment.

La terre crue représente le matériau alternatif qui remplace d'autres matériaux de construction à son disponibilité son faible coût de transport et peu énergivore.

2.2 La terre crue

2.2.1 La construction en bloc de terre crue dans le monde

Depuis longtemps, la terre est utilisée comme matériau de construction à travers le monde. Elle est utilisée parfois avec le bois, la paille et la pierre selon les traditions et la disponibilité des ressources naturelles. Donc ce sont des édifices qui sont construits de matériaux empruntés alentour. Ce matériau écologique est utilisé depuis 7000 ans dans la ville syrienne de Tell et la construction de la Grande Muraille de Chine remonte à 2000 ans. Les pyramides d'Égypte, qui sont des monuments merveilleux, témoignent de l'importance de ce matériau dans l'histoire de l'humanité. En Europe et dans les pays industrialisés, la terre crue a commencé à perdre de son importance au XIXe siècle. Cette transition a entraîné une perte progressive des savoir-faire techniques traditionnels. Des grands projets modernes, comme le marché de Koudougou au Burkina Faso (début 2000) ou des quartiers de logements en France (L'Isle-d'Abeau, 1985).

Chapitre 02 : Construction en terre cure



Figure II-1 :la ville syrienne de Tell.

Selon le recensement international sur la construction en terre établi par le centre de, connu sous le nom de CRA-terre, environ un tiers de la population globale réside dans des logements en terre (Figure II.1).

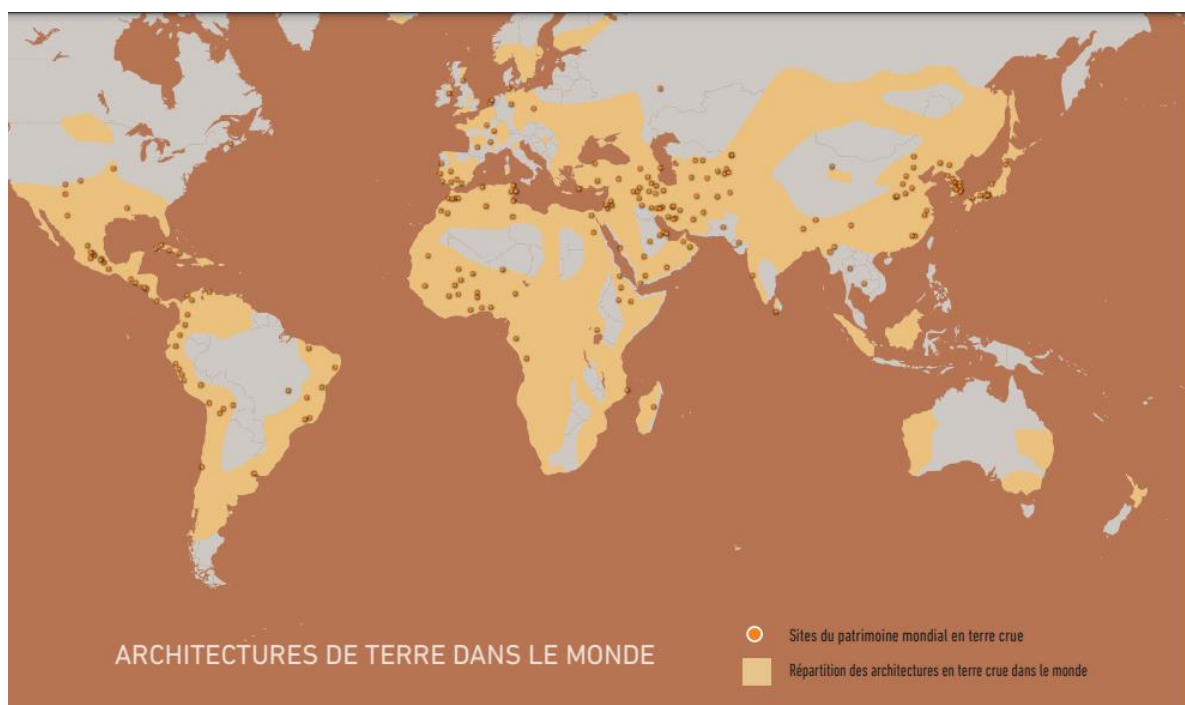


Figure II-2: Architecture de terre dans le monde (CRA-terre)

Chapitre 02 : Construction en terre crue

2.2.2 La construction en bloc de terre crue dans Algérie :

L'Algérie tout comme beaucoup de pays a une politique mitigée en ce qui concerne les architectures de terre ou la construction en terre (Foufa Amina, 2015). En nord algérien, on peut citer les maisons en r+1 construites à Sidi bel Abbès (figure) dans le cadre du programme de construction rurale en utilisant des matériaux locaux et des méthodes traditionnelles telles que la brique de terre comprimée. En plus la ville de Tlemcen, et ses environs, Mansourah, et Honein en sont le témoignage de ces architectures (Foufa Amina, 2015)

Au sud, un autre grand patrimoine architectural en terre crue est recensés à savoir le Ksar de Moughel, la vallée du Gourara à Adrar, Timimoune, Biskra, Ghardaïa au sein de la vallée du M'Zab, Tamanrasset, ainsi que les villages traditionnels des Aurès tels que Ghoufi et Béni Souik. (a) r+1 construites à Sidi bel Abbès (b) Ghardaïa au sein de la vallée du M'Zab (c) la vallée du Gourara à Adrar



Figure II-3: La construction en terre crue en Algérie

2.3 Les techniques de construction en terre crue :

La terre est employée de différentes façons, que ce soit sous forme de terre mélangée avec de la paille, de terre excavée, de terre à couverture ou de terre encore humide qui est moulée, empilée, coulée ou utilisée pour le garnissage. Cette différence La technique de construction en terre connaît diverses appellations à travers le monde : le pisé, le torchis, la bague, l'adobe,

Chapitre 02 : Construction en terre crue

etc. (Figure II.4). Cette fluctuation est liée à l'agriculture de la zone et à la disponibilité des matériaux et équipements.

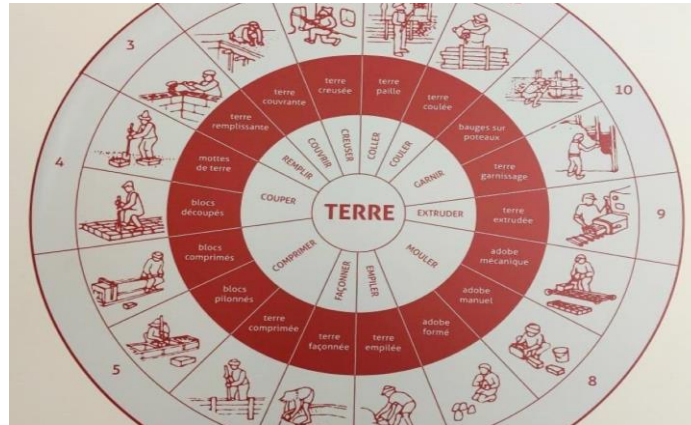


Figure II-4: Les différents techniques de construction de la terre crue(Craterre,2009)

2.3.1 Technique de pisé

Construction en pisé est méthode traditionnelle s'appelle construction de mur en terre crue monolithique. Elle consiste à compacter dynamiquement à l'aide d'une dame une quantité d'argile plus sable dans un grand à l'aide d'un coffrage en bois (figure II.5).

Généralement les constructions en pisé bâti en R+1 à savoir l'école construite en pisé à Bonbaden, et le château situé dans la Loire (42) (figure II-7).

Chapitre 02 : Construction en terre cure

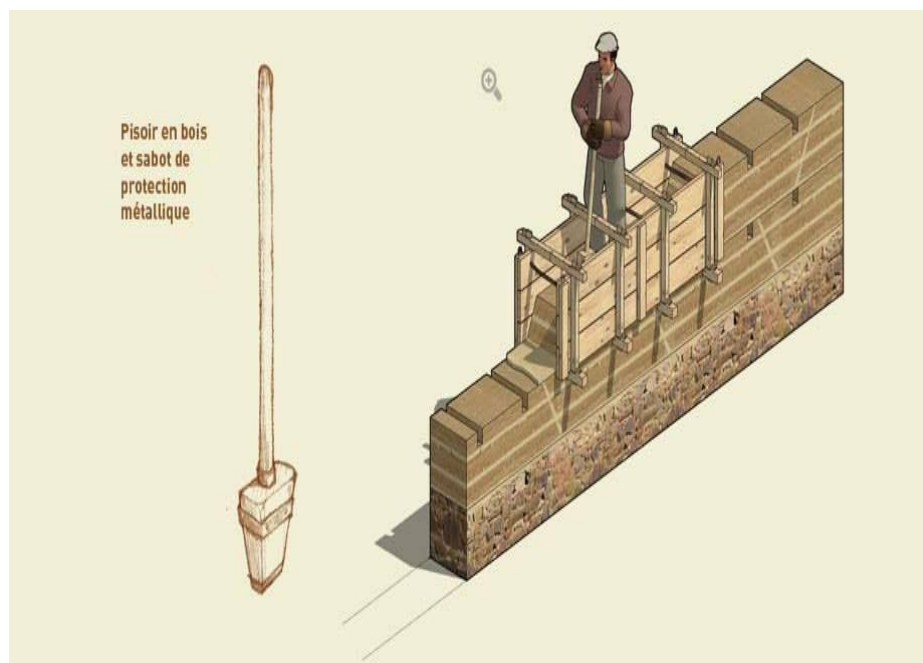


Figure II-5: Technique de pisé



Figure II-6: Une école construite en pisé à Bonbaden, (en Allemagne)



Figure II-7: Château de Chabet dans la Loire (42) (Guibaud, 2005)

Chapitre 02 : Construction en terre cure

2.3.2 Technique de torchis :

Le torchis, ou colombage, est une technique de construction consistant à réaliser des parois légères en appliquant de la terre crue sur une ossature en bois (figure II.8). Utilisée historiquement dans de nombreux pays, et particulièrement en France, cette méthode repose sur une sélection rigoureuse des matériaux terre et bois pour former la structure du bâtiment. Ce mode de construction, utilisée depuis longtemps dans divers pays, notamment en France (figure II.8).



Figure II-8: Une construction en torchis à Angers, France.

2.3.3 Technique de bauge :

Cette technique consiste à superposer des mottes de terre, tassées manuellement ou au pied, pour ériger des murs monolithiques. Le matériau est généralement renforcé par l'ajout de diverses fibres naturelles pour améliorer sa cohésion.

Chapitre 02 : Construction en terre cure



Figure II-9:Habitation contemporaine en bauge à Marchésieux, Manche (C.-A. de Chazelles)

2.3.4 Technique de l'adobe :

L'adobe est fabriqué en utilisant une pate mélange à fois avec la paille ou des fibres coulée dans des moules en bois. Ces moules prismatiques ont des dimensions sont identiques à aux briques. Après le démoulage les éléments sont placés à l'extérieure ou exposé au soleil afin de garantir

Cette procédure est très répandue dans le sud de l'Afrique et au Yémen, ou les premiers bâtiments du monde situé à la ville de Shibām, ont été construites en adobe.

Chapitre 02 : Construction en terre cure



Figure II-10 Technique de l'adobe (Production Drôle De Trame – 2009)

2.3.5 Brique de terre comprimée :

Labrique de terre comprimée (BTC) est une technique a été apparu depuis les années 1950 comme un matériau moderne en remplaçant l'adobe qui présente une faible densité et caractéristique mécanique. Ce matériau s'intégré dans des constructions modernes comme un matériau décorant au début. Ce matériau présente des avantages considérables en termes sociaux, économiques et écologiques. Des exemples des constructions en BTC sont situés à Mayotte (Mamoudzou) est donnée dans (la figure II.11).

Les BTC combinent les meilleures caractéristiques de la technologie de la terre traditionnelle et des processus de fabrication de briques modernes. Au lieu que la terre soit moulée à la main dans un cadre en bois comme pour l'adobe, ou compactée dans des formes comme pour le pisé, les BTC sont formés en comprimant la terre dans une presse en acier.

Chapitre 02 : Construction en terre cure



Figure II-11: Maison de brique de terre compressée.

Les blocs de terre crue sont fabriqués avec des presses hydrauliques moderne (figures II.12). Ces presses sont fabriqués à l'aide de moules multi-compartiments de différentes dimensions.(figure II.12).

1 300*150*100mm	2 300*150*100mm	3 150*150*100mm	4 300*150*100mm	5 300*150*100mm
6 150*150*100mm	7 300*150*100mm	8 300*150*100mm	9 150*150*100mm	10 300*150*100mm
11 300*150*100mm	12 300*150*100mm	13 250*150*100mm	14 250*150*100mm	15 300*150*100mm
16 300*150*100mm	17 230*180*115mm	18 230*220*115mm	19 230*220*115mm	20 230*220*115mm
21 230*140*115mm	22 245*107*60mm	23 250*60mm Diagonal	24 200*100*60mm	25 200*100*60mm
26 200*100*60mm	27 260*160*100mm	28 300*150*100mm	29 300*150*100mm	30 250*125*60mm

Figure II-12:différentes types de BTC



Figure II-13: Presse hydraulique

2.4 : Critères de choix du matériau terre

Le choix de la matière première crue ou stabilisé est une étape cruciale dans la fabrication d'un matériau destiné à la construction en terre. Selon les chercheurs dans ce domaine le choix se base sur :

2.4.1 La granulométrie du sol :

Comme montre la figure(II.14) qui représente une plage granulométrique recommandée pour la fabrication de BTC. Une quantité de chaque composant du sol est donnée par le tableau (II.1).

Tableau II-1:Granulométrie recommandée par (CRA-Terre)

Chapitre 02 : Construction en terre cure

Granulométrie	Diamètre (mm)	Pourcentage (%)
Gravier	2 – 25	0 à 50 %
Sable	0,063 – 2	35 à 55 %
Limon	0,002 – 0,063	10 à 20 %
Argile	< 0,002	10 à 15 %

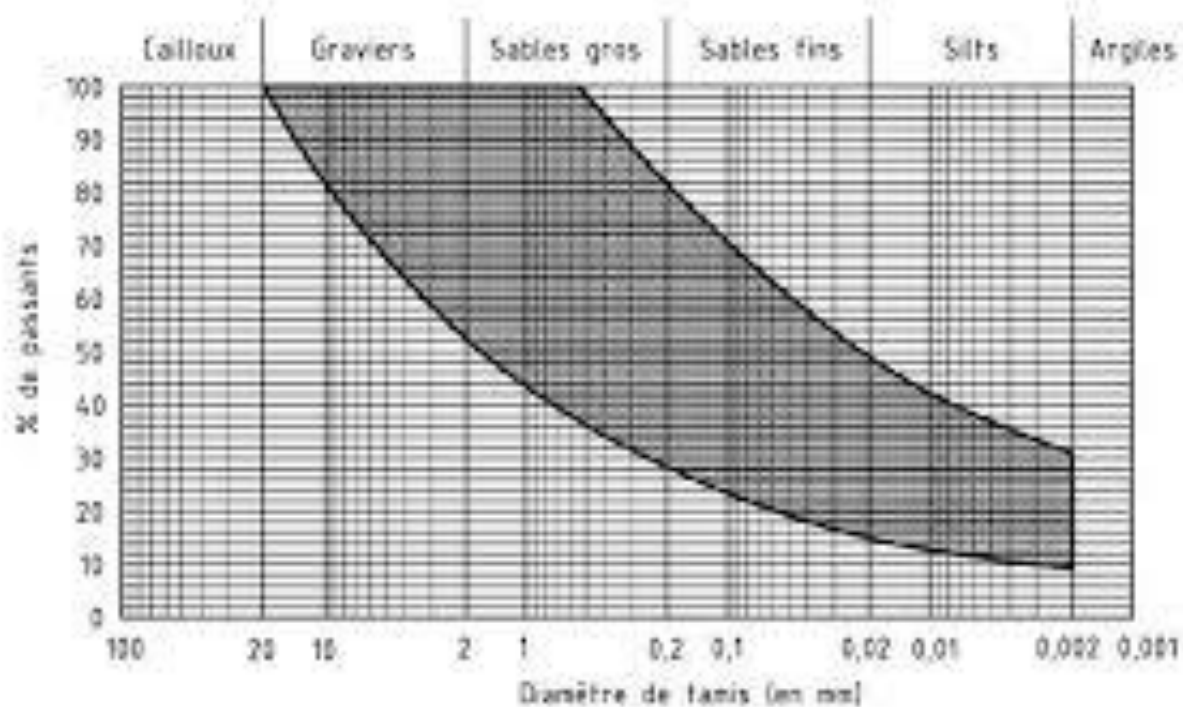


Figure II-14: Distribution granulométriques et recommandations (CRA-Terre).

Chapitre 02 : Construction en terre cure

2.4.2 La plasticité du sol :

La figure (II.15) qui représente une plage de la plasticité recommandée pour la fabrication de BTC. La limite de liquidité varie entre 25 % et 50 %, tandis que l'indice de plasticité s'étend de 2 % à 30 %.

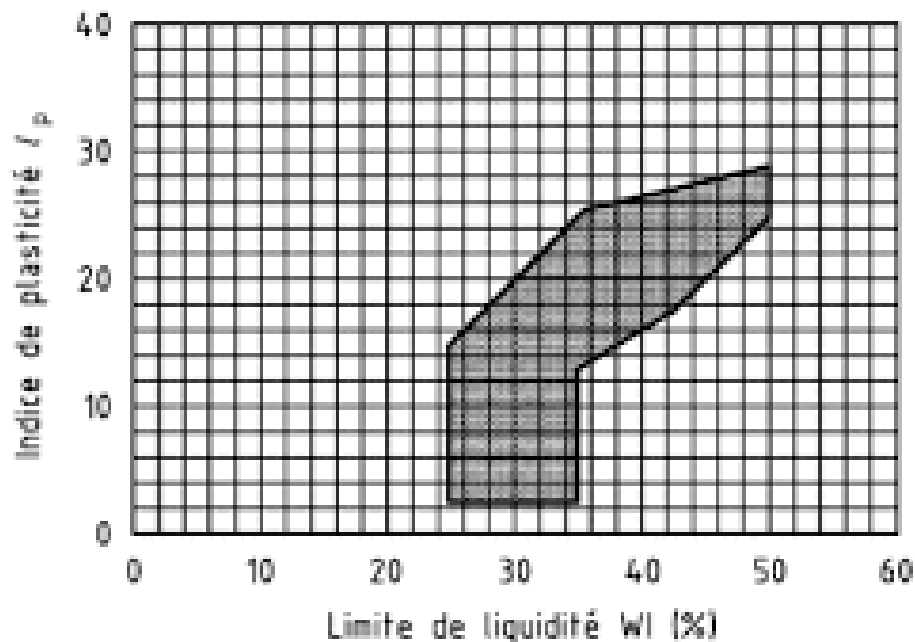


Figure II-15: Carte de plasticité (CRA-Terre)

2.4.3 La confection du sol :

Sachant que le compactage dynamique n'est pas approprié pour la fabrication de la BTC mais il permet de déterminer la densité sèche maximale et la teneur en eau maximale. (Houben et Guillaud 1994) a proposé des fourchettes recommandées pour les constructions en adobe, pisé et BTC (figure II.16). Puis les valeurs sont utilisées pour procéder à un essai de compactage statique à l'aide d'une presse hydraulique et d'un moule cylindrique double piston.

Chapitre 02 : Construction en terre cure

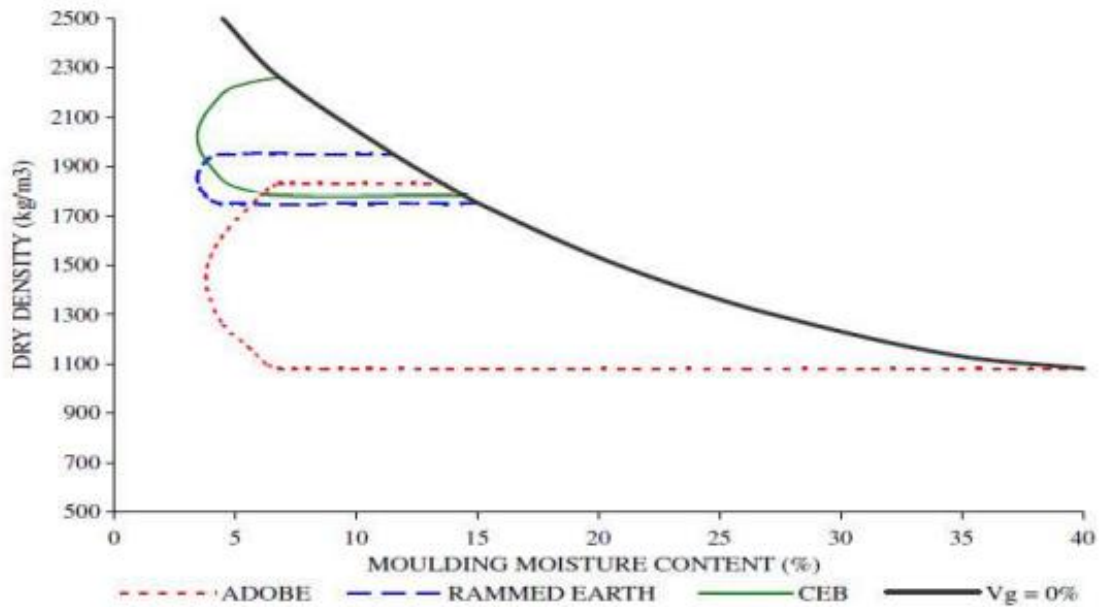


Figure II-16: Recommandation de la teneur en eau et la densité sèche pour les BTC (Houben et Guillaud 1994)

2.5 Conclusion

Dans cette partie bibliographique, on a vu un aperçu général sur la construction en terre à travers le monde et en Algérie. Toutes les techniques présentées (pisé, bauge, adobe, torchis) sont fortement liées aux traditions et les ressources naturelles de chaque région.

Chapitre03: Identification du sol

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le programme expérimental adopté pour l'identification complète du sol salin provenant de la région de Bordjia. Les échantillons de sol, traités et non traités, ont été compactés à la faible énergie correspondant à l'essai Proctor normal. Les sols traités ont été stabilisés à l'aide de ciment expiré à des teneurs de 8 % et 12 %.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'influence de l'ajout de ciment expiré sur les propriétés du sol salin, tout en examinant la faisabilité d'une solution économiquement avantageuse grâce à la valorisation de ce matériau.

Les protocoles expérimentaux des différents essais réalisés au laboratoire MDS de l'université sont présentés dans cette partie, conformément aux normes et recommandations internationales en vigueur.

3.2 Présentation de la zone d'étude

La sélection de la parcelle s'appuie sur la carte de répartition spatiale de la salinité, précisément dans la zone où les valeurs de salinité sont les plus élevées. Cette parcelle se situe à l'extrême sud-est de la zone des Bordjias. Ses coordonnées géographiques, basées sur le système WGS 1984, se trouvent entre les latitudes 35°41'54.97" N et 35°41'56.37" N, et les longitudes 0°6'41.12" E et 0°6'42.77" E (Mostifa F 2023).



Figure III-1: la zone d'étude

3.3 Préparation des échantillons de sols avant identification

3.3.1 Séchage et broyage :

Le sol humide prélevé in-situ a été séchés et broyés dans laboratoire. Puis séchées une autre fois dans l'étuve à une température 50° avant chaque mélange.

3.3.2 Préparation des mélanges :

La préparation des ménages commence toujours par le séchage du sol dans l'étude. Une fois le sol est sec, le sol est mélangé à une teneur en eau optimale des trois cas. Le ménage est placé dans des sacs hermétiques pendant 24 heures pour garantir l'homogénéisation.

3.3.3 Vérification de la teneur en eau :

Avant chaque essai, une vérification de la teneur en eau des sols dans sol après 24 heures a été effectué pour assurer la répétabilité des résultats.

Chapitre 03 : Identification du sol

3.3.4 Identification du sol salin

Après la préparation du sol des essais d'identification a été menées afin de prendre une vision globale sur leurs propriétés physico-chimiques.

3.3.4.1 Limites d'Atterberg :

Notre programme expérimental a débuté par la détermination des limites d'Atterberg conformément à la norme NF P 94-051. Dans un premier temps, l'échantillon de sol a été tamisé par voie humide à travers un tamis de 400 μm dans un bac de réception (Figure 3.2). Le mélange obtenu a ensuite été laissé au repos pendant 24 heures afin de permettre la décantation des particules fines. Après cette période, l'eau surnageante a été éliminée par siphonage. Le sol récupéré a ensuite été placé dans une étuve afin d'éliminer l'excès d'eau.

Après séchage, le matériau a été soigneusement malaxé et préparé selon la procédure illustrée à la Figure (III.3), en vue de la réalisation des essais de détermination de la limite de liquidité (Figure III.4) et de la limite de plasticité (Figure III.5).

Les résultats obtenus seront exploités à l'aide des tableaux (III.1) et (III.2) afin de classer le sol étudié selon les critères géotechniques appropriés.



Figure III-2: Tamisage par voie humide à 400 μm

Chapitre 03 : Identification du sol



Figure III-3: Préparation de la pate



Figure III-4: Coupelle de casagrande.

Tableau III-1: Classification proposée par Dakshanamurthy et Raman (1973)

Limites de liquidité WL	Classification
0-20	Non gonflant
20-35	Gonflement faible
35-50	Gonflement moyen
50-70	Gonflement élevé
70-90	Gonflement très élevé
>90	Gonflement critique

3.4.2 limite de plasticité :



Figure III-5: La procédure pour détermination de la limite de plasticité

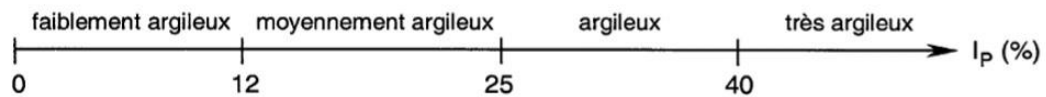


Tableau III-2: Ordres de grandeur (Principaux seuil indicatifs) (bouklikha.R 2015)

Nature	WL(%)	WP(%)	Ip(%)
Limon	24	17	7
Argile limoneuse peu plastique	40	24	16
Argile plastique	114	29	85
Argile de Mexico	500	125	375
Bentonite	710	54	656

Chapitre 03 : Identification du sol

3.4.3 La limite de retrait :

La limite de retrait conventionnelle a été établie conformément à la norme AFNOR XP P 94-060, en utilisant une pâte composée des particules ayant franchi un tamis de 400 μm et séchée à l'air libre (figure III.6).

La méthode de détermination repose sur le principe suivant :

Une pâte homogène est préparée à partir des particules passant par un tamis de 400 μm , avec une teneur en eau proche de sa limite de liquidité WL.

Cet essai vise à déterminer, à partir d'un échantillon de volume connu (V_h) :

- Son poids initial (P_h)
- Son poids (P_d) et son volume (V_d) final.

La différence de volume entre l'état saturé et l'état sec de l'échantillon est conventionnellement considérée comme égale au volume d'eau dont la densité correspond au retrait.

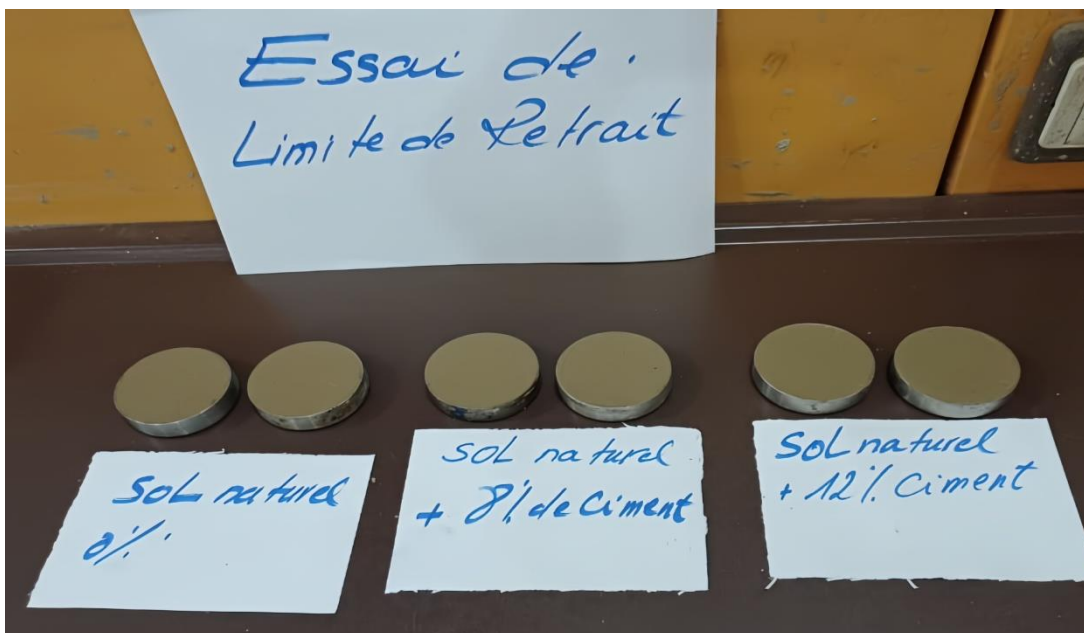


Figure III-6: L'essai de limite de retrait.

Chapitre 03 : Identification du sol

3.4.4 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a été procédée par la méthode de tamisage par voie humide et la sédimentométrie, respectivement selon la norme NF P94-056 et 057.



Figure III-7: Essai de sédimentométrie.

3.4.5 Détermination des poids volumique des grains sols :

Le poids volumique des grains sols a été déterminé à partir de l'équation et selon à procédure expérimentale (figure III8) est conforme à la norme NF P 94- 054. Chaque valeur de de la densité des grains solides indique un sol donne tableau III.3.

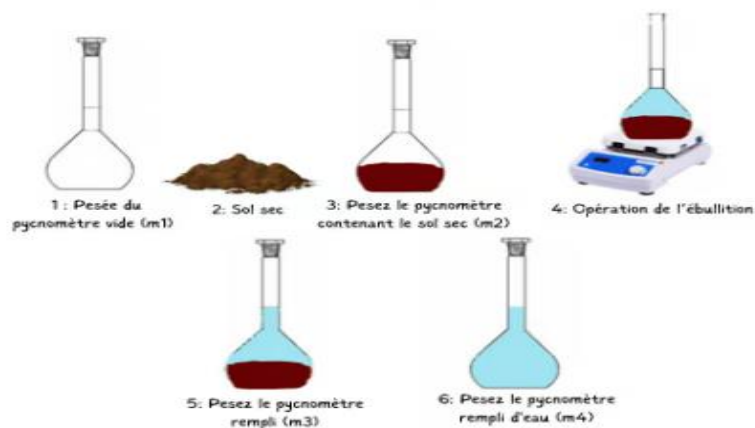


Figure III-8: Détermination des poids volumique des grains sols.

Chapitre 03 : Identification du sol

Tableau III-3: différentes valeurs de la densité des grains solides pour certain sol

Type de sol	Densité des grains solides
Sable	2,63 – 2,67
Limons	2,65 – 2,7
Argile et argile limoneuse	2,67 – 2,9
Sols organiques	moins de 2

3.4.6 Essai de bleu méthylène :

Le procédé de l'essai repose sur le maintien, sous agitation continue, d'un mélange précis, auquel sont ajoutées de manière progressive des doses successives de bleu de méthylène (Figure 3.9) jusqu'à saturation des particules argileuses. Une fois cette saturation atteinte, un excès de bleu de méthylène se manifeste, indiquant la fin de l'essai. Cet excès est détecté grâce au test de la tâche, qui consiste à déposer une goutte de la suspension sur un papier filtre standardisé. Le résultat est une tâche constituée d'un dépôt de sol coloré en bleu, entouré d'une zone humide et incolore. Lorsqu'un excès de bleu de méthylène est présent, une auréole bleu clair apparaît dans la zone humide, rendant le test positif.



a. Dosage de la suspension

b. Test de la tache

Figure III-9: Essai de tache au bleu méthylène

Chapitre 03 : Identification du sol

La détermination de la surface spécifique totale d'un sol est réalisée à partir des résultats obtenus lors de l'essai au bleu de méthylène. Cette surface spécifique est directement proportionnelle à la quantité de bleu de méthylène absorbée par la fraction argileuse du sol. Elle est calculée selon la formule décrite au -dessous.

$$SST = \frac{20,9 \times V_{cc}}{P_s} \text{ (eq3)}$$

SST:surface spécifique totale (m²/g)

VCC : volume de bleu de méthylène utilisé (cm³)

P_s : masse du matériau sec (g)

Le classement de la nature de sol en fonction du Valeur de bleu méthylène VBS est donné par le tableau (3.4).

Tableau III-4 :Classement des sols en fonction du VBS

Valeur de bleu méthylène VBS	Nature du sol
< 0,2	Sols sableux
0,2 – 2,5	Sols limoneux
2.5 - 6	Sols limoneux-argileux
6 - 8	Sols argileux
>8	Sols très argileux

Chapitre 03 : Identification du sol

3.4.7 Dosage des carbonates CaCO_3 (NF ISO 10693) :

Ce test vise à déterminer, à l'aide d'une burette à gaz, le volume de dioxyde de carbone (CO_2) produit par la réaction entre l'acide chlorhydrique (HCl) et le carbonate de calcium (CaCO_3) présent dans l'échantillon analysé. La décomposition du carbonate de calcium par l'acide chlorhydrique dilué suit la réaction chimique suivante :



La teneur en carbonate de calcium dans un sol fin est un indicateur significatif de sa résistance mécanique ainsi que de sa sensibilité à l'eau. En fonction de cette teneur, le comportement du sol peut varier, allant de celui d'une argile à celui d'une roche

Tableau III-5: Type de sol en fonction du % en CaCO_3

Teneur en Carbonate en %	Classification	Exemple
<10	Non calcaire	Argile, sable siliceux...
10 à 29	Peu calcaire	Marne
30 à 69	Moyennement calcaire	Marne...
70 à 89	Fortement calcaire	Calcaire marneux ...
>90	Calcaire	Calcaire

3.4.8 Le teneur en matières organiques MO :

Nous avons utilisé la formule ci-dessous pour déterminer la teneur en matières organiques selon la norme AFNOR (NF P 94-055).

$$\text{MO (\%)} = \frac{(\text{M1} - \text{M2})}{(\text{M1} - \text{M0})} * 100 \quad \text{eq (2)}$$

M0 : pesé de la coupelle vide

Chapitre 03 : Identification du sol

M1 : pesée la coupelle contenant l'échantillon de 50g.

M2 : pesé d'échantillon à une température entre 450 °C et 500 °C

Tableau III-6: Type de sol en fonction du % en MO (Meftah .K,2008).

Teneur en matières organiques (MO%)	Type de sol
MO<3	Non organique
3< MO<10	Faiblement organique
3<MO<30	Moyennement organique
MO>0	Très organique

3.4.9 Mesure du potentiel d'hydrogène ph (NF X 31-103) :

Ce protocole repose sur l'équilibre ionique établi entre une quantité déterminée de solide et un volume spécifique d'eau déminéralisée. Le rapport entre la masse de l'échantillon et celle de l'eau est défini à 1/5 (g/g). Le pH est mesuré au sein de la suspension aqueuse une fois l'équilibre atteint, après une agitation de 60 minutes à une température de 20 ± 2 °C, suivie d'un temps de repos de 2 heures..(Mostifa.F2023)



Figure III-10: L'essai de mesure du Ph

3.4.10 Mesure de la conductivité électrique :

Chapitre 03 : Identification du sol

La conductivité électrique d'un sol dépend principalement de la concentration en ions présents dans l'eau interstitielle, de leur charge électrique et de leur capacité de mobilité. Elle constitue un paramètre permettant d'estimer, de manière approximative, la concentration des ions solubles contenus dans l'échantillon étudié.

➤ Conductivité à l'extrait dilué $C_{e1/5}$ (NF X 31- 113)

Le rapport entre le sol et l'eau pour le mélange est fixé à 1/5, et la mesure est effectuée à l'aide d'un conductimètre multi-gammes de marque Hanna. Le mélange est agité pendant 30 minutes, puis la conductivité de la solution est déterminée après un processus de filtration.



Figure III-11: Mesure de la conductivité électrique (Mostifa .F 2023)

3.4.11 L'essai de Proctor :

Le compactage de l'échantillon de sol est effectué à l'aide d'un moule standardisé et d'une dame de Proctor normal, conformément à la norme NF P 94-093. Les teneurs en eau présumé dans cette partie sont : 16 %, 18 %, 20 %, 22 %, 24 %, Et aussi des proportions différentes de ciment (0%,8%,12%), afin de déterminer les caractéristiques initiales du compactage (γ_d ; w).

L'essai consiste à compacter le sol mélangé à une teneur en eau préalablement avant 24 heure. Le compactage à l'énergie Proctor normal du sol Bordjia a été compacté avec 3 couches (figure III.13) en respectant les modalités d'exécution données dans le tableau (III.7).

Chapitre 03 : Identification du sol

Tableau III7 : Exécution des essais Proctor normal et modifié norme (NF P 94-093) .

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2 490 g	2 490 g	3 couches, à raison de :
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	25 coups par couche
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	56 coups par couche
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4 535 g	5 couches, à raison de :
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	25 coups par couche
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	56 coups par couche
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	



Figure III-12: Le compactage de Proctor du sol Bordjia

3.4.12 L'essai de Perméabilité :

Les essais de perméabilité ont été effectués sur des échantillons compactés de mélanges sol-ciment. Les pourcentages de ciment expiré étudiés sont de 0 %, 8% et 12 %. Le moule utilisé dans cette partie est de 7 cm de diamètre et 2cm d'hauteur. D'autre série des échantillons ont été séchés à 7 jours pour voir l'influence de séchage ou la teneur en eau initiale sur la perméabilité.

L'essai de perméamètre à charge variable permet de caractériser le coefficient de perméabilité k donné par la formule ci-dessous (eq N 5). Le protocole expérimental donné par la norme NF P94-512-11. Étant donné que le sol est compacté, des essais de perméabilité au perméamètre à charge variable ont été réalisés (Figure III.13). Cette méthode est recommandée pour les sols compactés faiblement perméables.

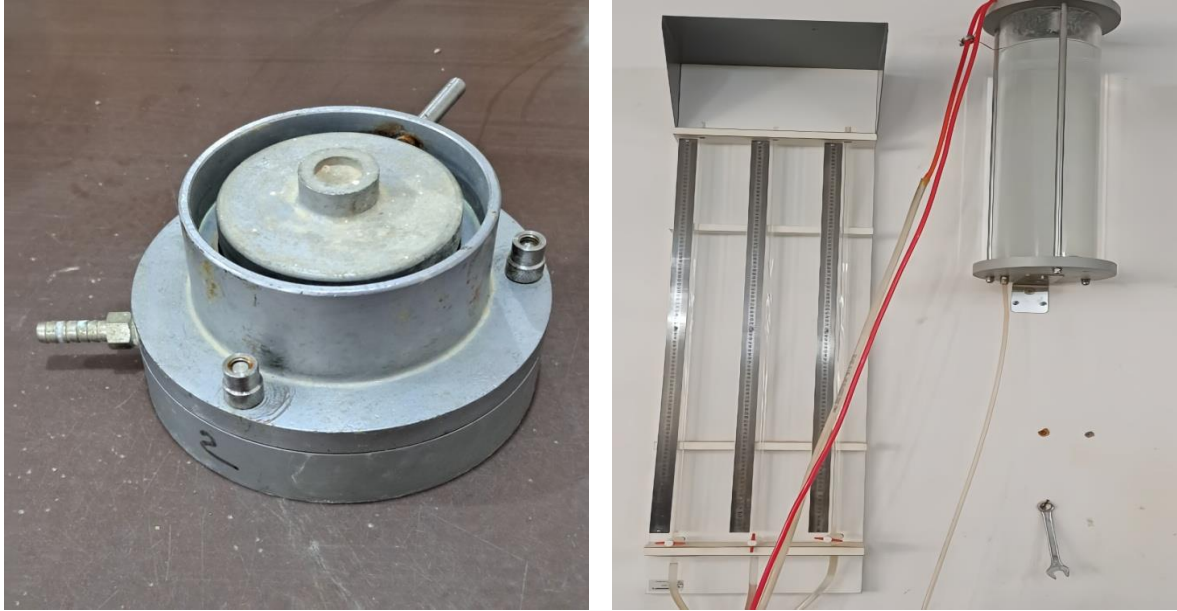


Figure III-13: l'essai de perméabilité..

Pour l'essai à charge variable, la perméabilité est donnée par :

$$K = 2,3 \frac{a.l}{A.T} \text{Log} \frac{h_1}{h_2} \text{eq N1} \quad (5)$$

Avec :

K : la perméabilité (cm /s)

a : section du tube piézométrique (cm²)

A : section de l'échantillon en (cm²)

L : longueur du moule (cm)

T : temps pour passer de h₁ à h₂.

h₁ : charge hydraulique au point amont (niveau d'eau le plus élevé).

h₂ : charge hydraulique au point aval (niveau d'eau le plus faible).

Chapitre 03 : Identification du sol

3.4.13 Capillarité à l'eau :

Afin de déterminer le coefficient d'absorption d'eau en étudiant la tension superficielle des fluides dans sol compacte, une série des essais de capillarité ont été effectuées. Les échantillons ont été testé compacté et séché à 28 jours. Le dosage de ciment utilisé dans cette série est de 8% et 12%.

La durée de l'essai est de 2 heures en utilisant des échantillons de dimensions de moule Proctor.

Les échantillons sont placés en contact avec l'eau à 5 mm de la base. Le coefficient d'absorption d'eau est donné par l'équation suivante :

$$C_b = \frac{100M}{S\sqrt{t}} = \frac{100(P_1 - P_0)}{S\sqrt{t}} \quad (6)$$

P1 : poids initiale (g)

P0 poids finale (g)

S : surface de contact (m²)

T temps (s)

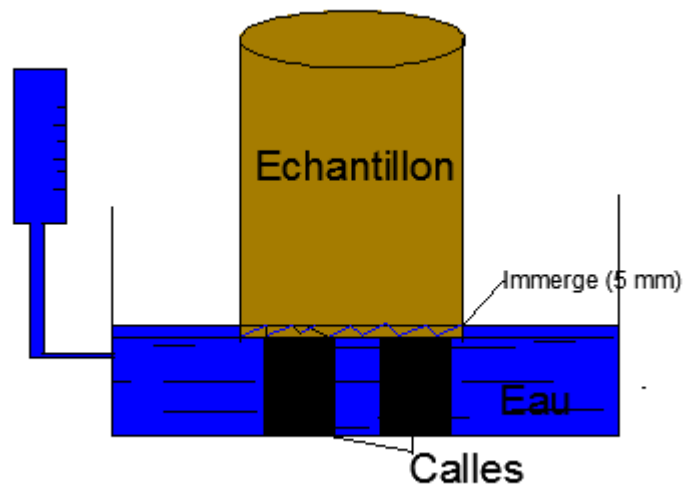


Figure III-14: le dispositif de capillarité à l'eau utilisé dans cette mémoire

Chapitre 03 : Identification du sol

3.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'exposition des diverses techniques expérimentales qui seront employées pour mener à bien notre programme expérimental.

Certaines de ces méthodes sont relativement classiques, notamment celles servant à l'identification physico-chimique des matériaux. D'autres, en revanche, se révèlent plus spécifiques, comme la technique de mesure de la succion. Certaines, enfin, peuvent se montrer particulièrement délicates, à l'exemple de la mesure de la perméabilité en conditions non saturées. L'application de ces différentes techniques nous permettra d'évaluer les défis à relever, ainsi que les points forts et limites associés à chacune d'entre elles.

Chapitre 04: Résultats et discussions

4.1 Introduction

Dans cette partie nous allons présenter les résultats du travail expérimental des échantillons testé et traité au ciment. L'ensemble des échantillons ont été testé soit immédiatement après démoulage ou séchés à différents temps de cure.

4.2 Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg su sol salin de Bordjia ont été déterminées et comparées à celles traité à 8% et 12% de ciment (figure IV.1 et IV.2). Une augmentation de la limite de liquidité et de plasticité en revanche l'indice de plasticité diminue. Cette variation est concordance avec les résultats de (Sariosseiri and Muhunthan2009, Aziz et al, 2021). Dans l'étude de (Siddiquy et al, 2025) d'un sol a une limite de liquidité (58,21 %), limite plastique (31,05 %), teneur en sable (6,2 %), teneur en limon (52,56 %) et teneur en argile (41,24 %), cette augmentation a été observée avec l'ajout de 8% et 12%.

Dans la figure IV.3 représente l'influence de temps de cure sur les limites d'Atterberg, des essais ont été réalisés sur les échantillons traité au ciment et séchées à 7 jours.

Chapitre 04 :Résultats et discussions

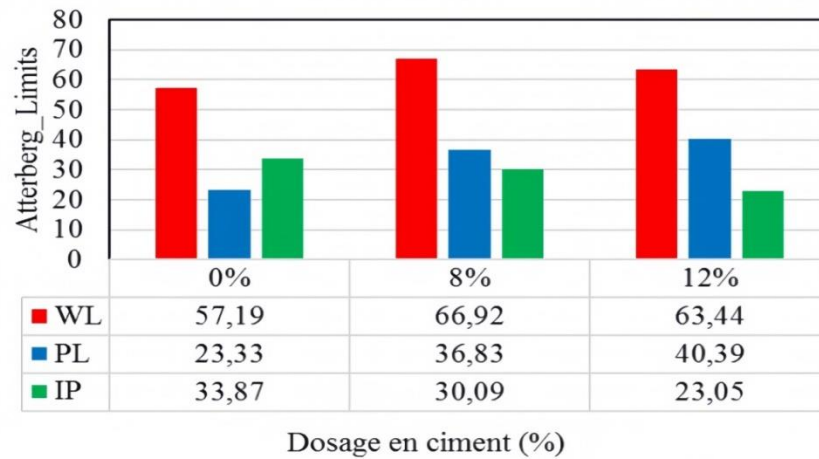


Figure IV-1: Histogramme d'évaluation des limites d'Atteberg sans l'effet de temps de cure.

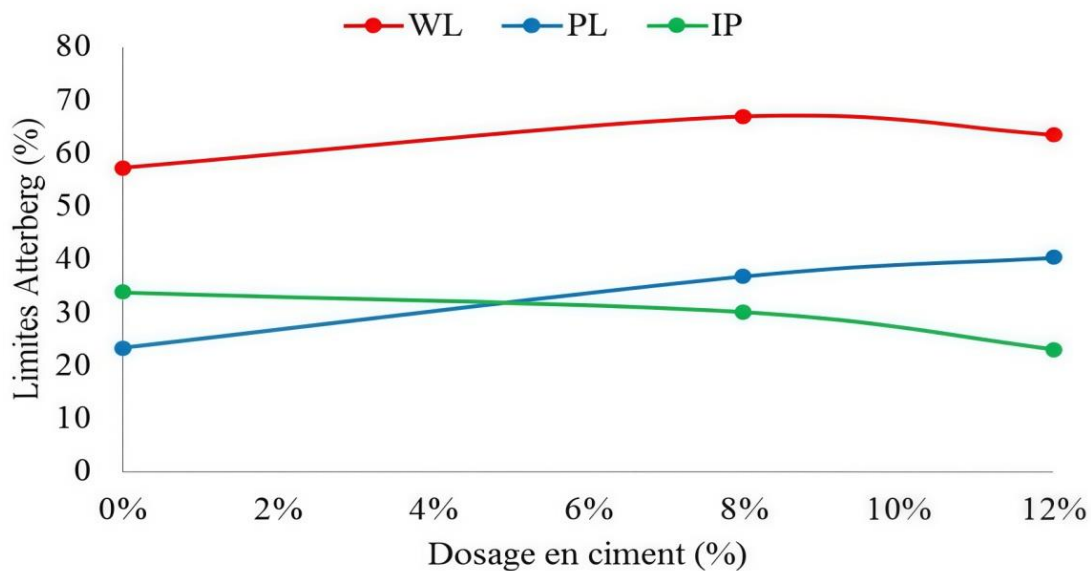


Figure IV-2: Courbe de la variation des valeurs de limites d'Atterberg sans l'effet de temps de cure.

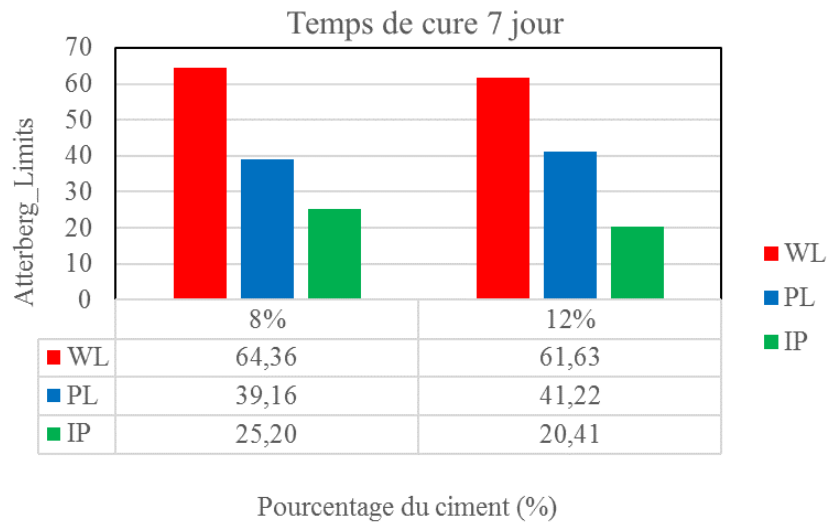


Figure IV-3: Histogramme d'évaluation des limites d'Atteberg avec un temps de cure de 7 jours.

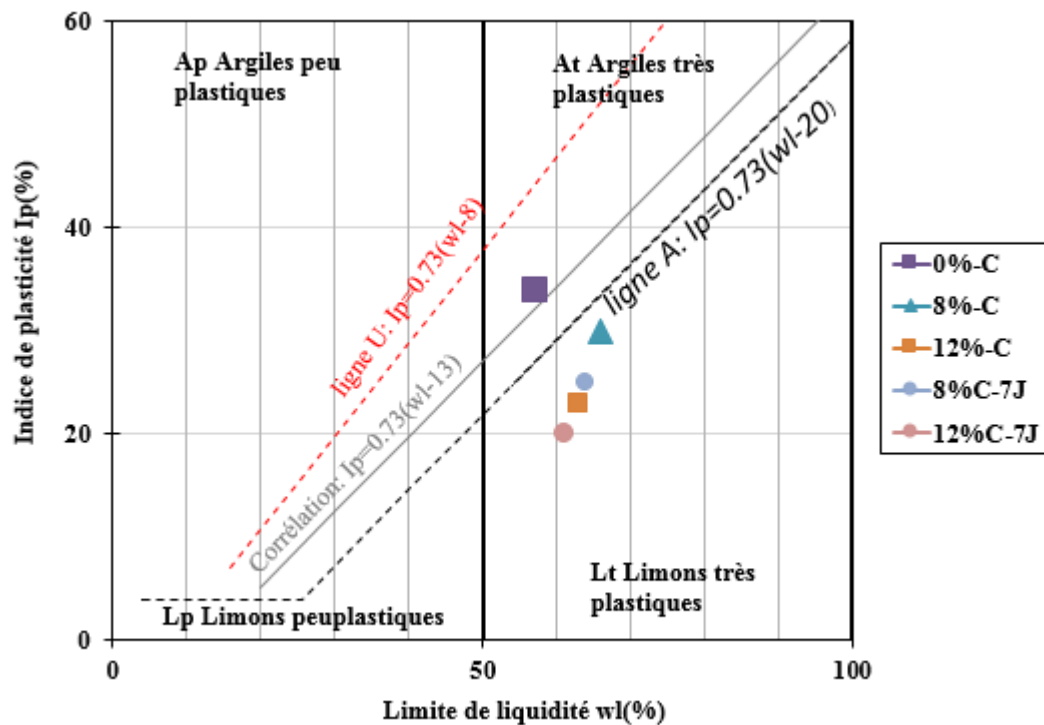


Figure IV-4: la bague de Casagrande des échantillons utilisés dans cette étude

4.3 La limite de retrait

La figure (IV.5) illustre une augmentation progressive de la limite de retrait en fonction de la teneur en ciment. Elle passe d'environ 18 % pour le sol naturel à près de 24 % avec un ajout de 8 % de ciment, atteignant environ 30 % pour une addition de 12 %. Cela démontre que l'incorporation de ciment améliore les propriétés du sol tout en diminuant sa sensibilité aux variations de volume liées à l'évaporation de l'eau.

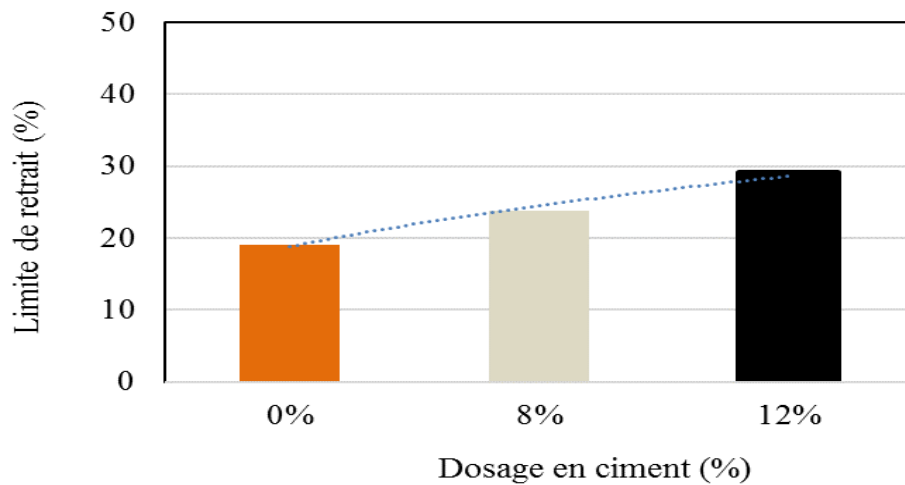


Figure IV-5:Histogramme d'évaluation des limites retrait

4.4 :Analyse granulométrique

La courbes granulométrique (tamisage et sédimentométrie) du sol de Bordjia est présentée graphiquement sur la Figure IV.6.À partir de la courbe granulométrique, on peut déterminer le tableau IV.1 qui représente la granulométrie dominée par des particules fines (limon–argile) donc le sol salin de Bordjia est un sol **argilo-limoneux**.

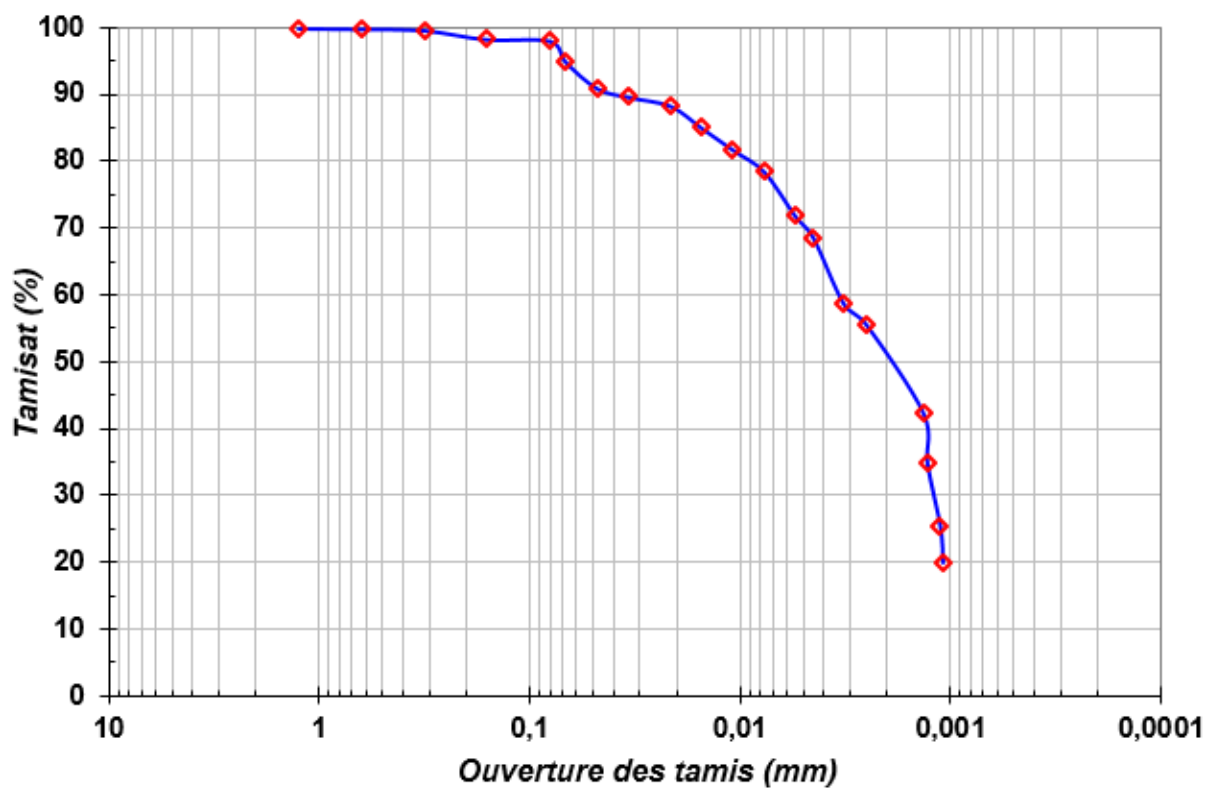


Figure IV-6: La courbe granulométrique

Tableau IV-1 : caractéristiques granulométrique du sol étudié

Granulométrie	Pourcentage
Gravier	0
Sable	8,5
Limon	40,7
Argile	50,8

Chapitre 04 :Résultats et discussions

4.5 :Propriétés Chimique

4.5.1 Essai de bleu méthylène

La figure (IV.7) et le tableau représentent les valeurs de bleu méthylène et la surface spécifique totale des trois échantillons contenant 0 %, 8 % et 12 % de ciment. Une diminution de la valeur du bleu de méthylène est observée lorsque le taux de ciment augmente.

Tableau IV-2 :Les valeurs de bleu méthylène et la surface spécifique

Paramètres	0%	8%	12%
Valeur de bleu VBS (%)	5.25	3,5	2,5
surface spécifique totale SST(m ² /g)	109,7	73,1	52,2
Classement des sols en Valeur de VBS	Sols limoneux-argileux		

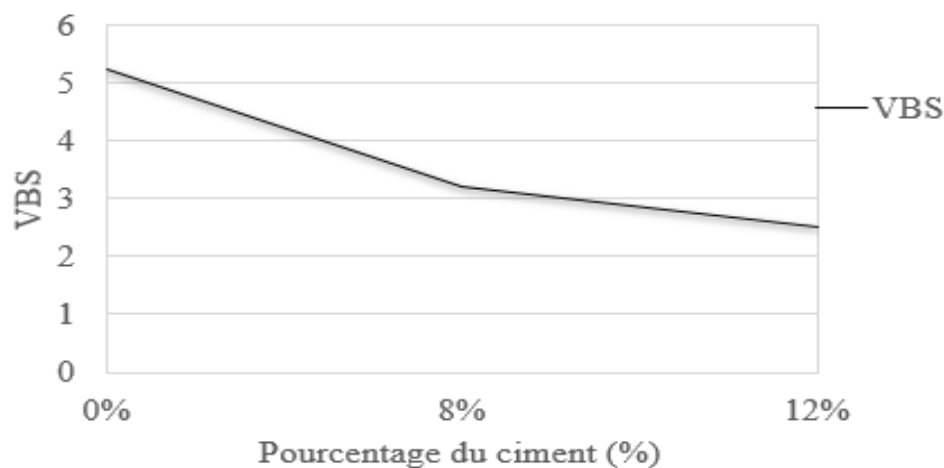


Figure IV-7: variation de VBS en fonction de teneur en eau ciment

Chapitre 04 :Résultats et discussions

3.4.8 Le teneur en matières organiques MO :

La valeur de la matière organiques MO du sol Bordjia 1.69%

3.4.7 Dosage des carbonates CaCO_3 :

La teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) de 24,19 % indique un sol fortement calcaire.

4.4.2 : Mesure du potentiel d'hydrogène pH (NF X 31-103)

Un pH de 8 indique que le sol limono-argileux possède une légère alcalinité. Cette caractéristique stimule les réactions d'hydratation et renforce la stabilité du sol.

3.4.10 Mesure de la conductivité électrique :

La valeur de conductivité électrique de 7,9 mS/cm indique un sol fortement salin. Une telle conductivité traduit une forte concentration en sels solubles, ce qui peut affecter la structure du sol

4.4.3 : Minéralogie par Diffraction des Rayons X (DRX)

Le diffractogramme obtenu par diffraction des rayons X (DRX) met en évidence la composition minéralogique de l'échantillon analysé. L'analyse des pics de diffraction, exprimés en angle 2θ , permet d'identifier les phases cristallines présentes dans le matériau.

On observe un pic très intense autour de $2\theta \approx 26,6^\circ$, caractéristique du **quartz (SiO_2)**, indiquant que ce minéral constitue la phase dominante de l'échantillon. D'autres pics associés au quartz apparaissent également entre 20° et 60° , confirmant sa présence majoritaire.

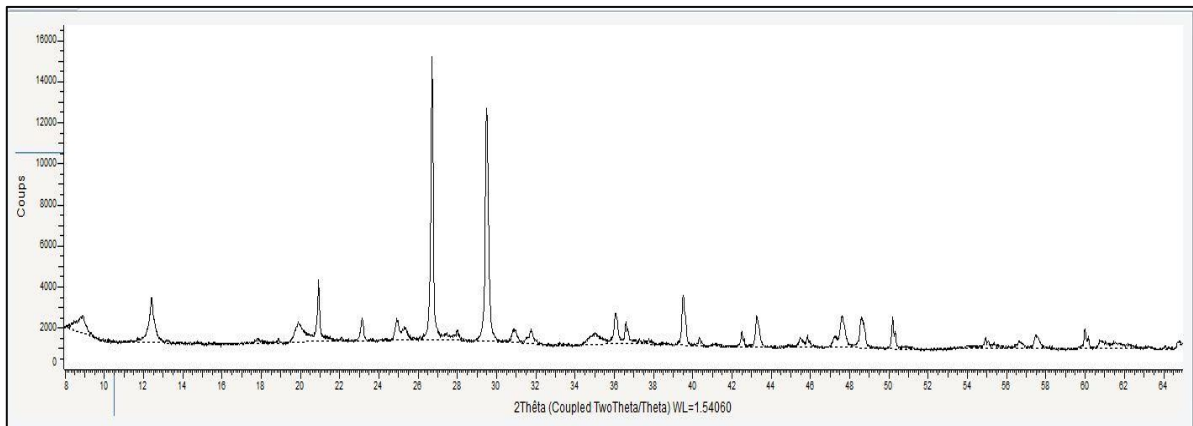


Figure IV-8: Résultats de Drx du sol de Bordjia

4.4.4 Confection des échantillons :

Les échantillons ont été préparé et confection avec les valeurs de teneur en eau, la densité sèche et à chaque dosage de ciment expiré (0%, 8% et 12%).

Tableau IV-3: les caractéristiques initiales des échantillons compacté.

Energie de compactage	Dosage en ciment	γ_d (g/cm ³)	w	e
Proctor normal	0%	1,62	25,59	0,645
	8%	1,64	22,63	0,626
	12%	1,70	19,32	0,580

4.4.5 L'essai de Perméabilité :

La figure (IV.9) présente l'évolution du coefficient K avec l'ajout du ciment à différentes 8 et 12%. Une diminution de K est enregistrée juste après l'ajout du ciment ce qui explique l'effet du ciment sur les vides. Ces résultats sont concordance avec (Bellezza, I., &Fratalocchi, E.(2006), Ranaivomanana et al, 2018). Cela est expliqué par l'effet de cimentation a stabilisé la microstructure des matériaux traités grâce au développement de liaisons fortes et durables entre les agrégats initiaux (Ranaivomanana et al, 2018).

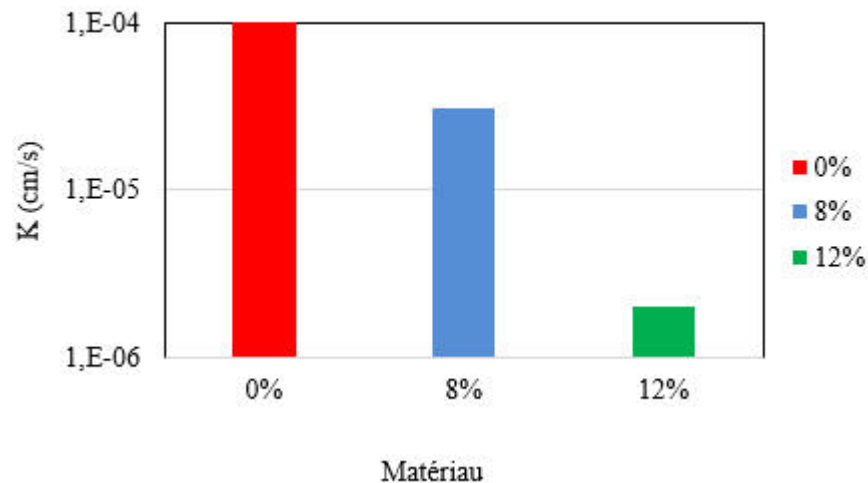


Figure IV-9:Influence de dosage en ciment sur lecoefficient K

La figure (IV.10) illustre la variation du coefficient de la perméabilité à l'eau en fonction de l'indice des vides et teneur en eau. L'augmentation de la perméabilité avec l'indice des vides s'explique par l'accroissement du volume et de la connectivité des pores dans le sol. Lorsque l'indice des vides est élevé, les espaces intergranulaires sont plus nombreux et plus grands, ce qui facilite la circulation de l'eau à travers la matrice du sol. À l'inverse, une diminution de l'indice des vides, résultant du compactage ou du traitement du matériau, réduit la taille et la continuité des pores, limitant ainsi les chemins d'écoulement et entraînant une baisse de la conductivité hydraulique.

De même, la teneur en eau est liée à l'état de compactage du sol. Les échantillons présentant une teneur en eau plus faible correspondent à une structure plus dense et moins poreuse, ce qui se traduit par des valeurs de perméabilité plus faibles. Les résultats montrent ainsi que le traitement appliqué réduit progressivement la perméabilité du sol, passant d'environ 3×10^{-3} pour l'échantillon non traité à près de 2×10^{-6} pour l'échantillon traité à 12 %. Cette diminution de près de deux ordres de grandeur témoigne d'une amélioration significative des propriétés hydrauliques du matériau grâce à la réduction de sa porosité.

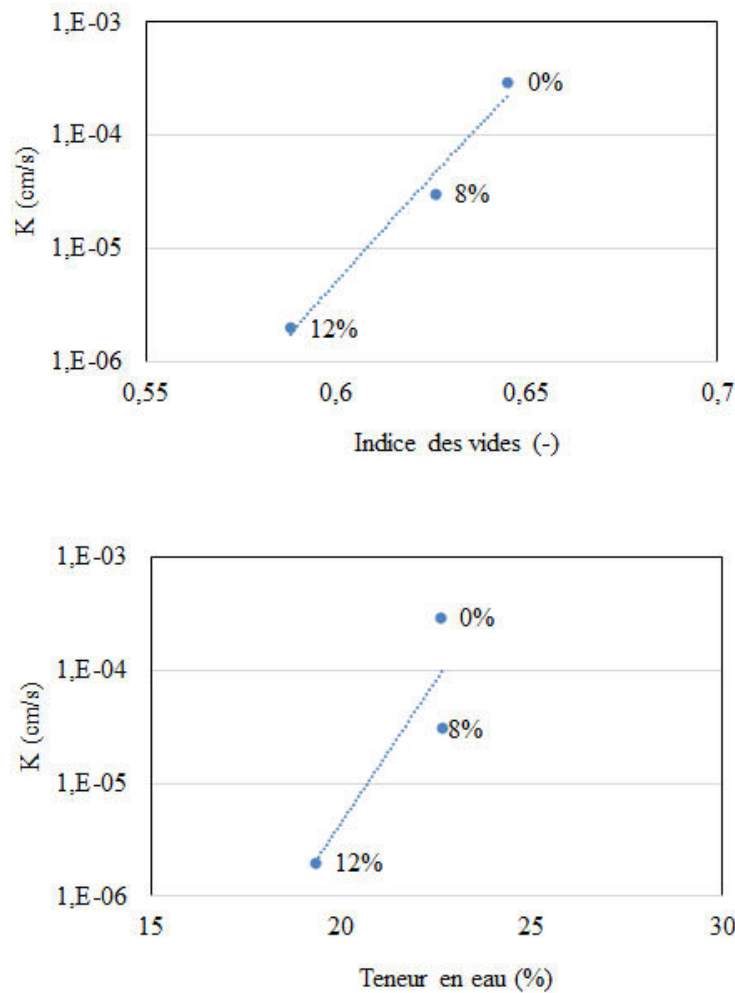


Figure IV-10: la variation du coefficient Ken fonction de teneurs en eau des échantillons.

4.4.6 Capillarité à l'eau :

Afin de comprendre l'influence de la teneur en eau initiale et la teneur en ciment sur le comportement hydrique des sols salins compactés lors de la mise en œuvre, des essais ont été réalisés pour déterminer la capillarité en particulier le coefficient d'absorption d'eau. La figure (IV.11) représente la variation du coefficient C_b à différentes dosage en ciment des échantillons séchés à 28 jours. Dans la même figure, une comparaison avec la littérature a été effectuée (Diallo et ; 2025, Brouard et al,2018 ,Ouedraogo et al,2017).

Chapitre 04 :Résultats et discussions

L'augmentation de la capillarité observée avec l'ajout de ciment dans des échantillons séchés à 28 jours. **À plus long terme**, la réaction chimique entre le sulfate de magnésium (MgSO_4) et l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) génère de l'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), provoque des microfissures et une dégradation de la matrice cimentaire. La connectivité du réseau poreux augmente alors, ce qui accroît la capillarité.

La figure (IV.12) illustre l'influence de la teneur en eau sur le coefficient C_b , lorsque la teneur en eau augmente le coefficient C_b croît.

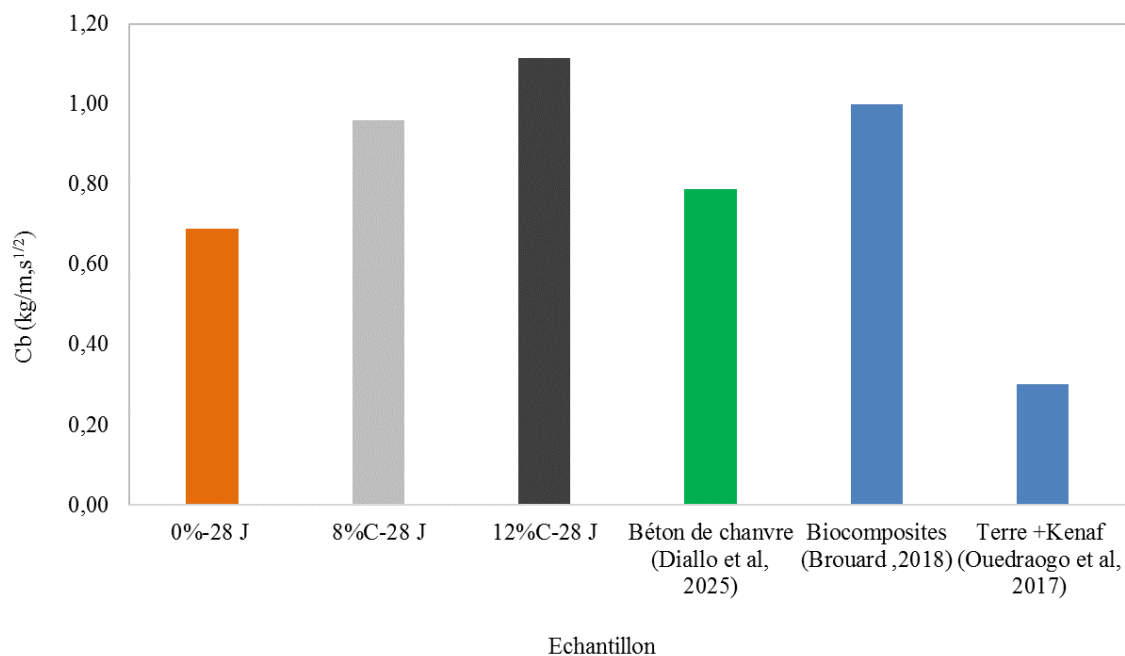


Figure IV-11: la variation du coefficient C_b à différentes teneurs en ciment des échantillons séchés à 28 jours

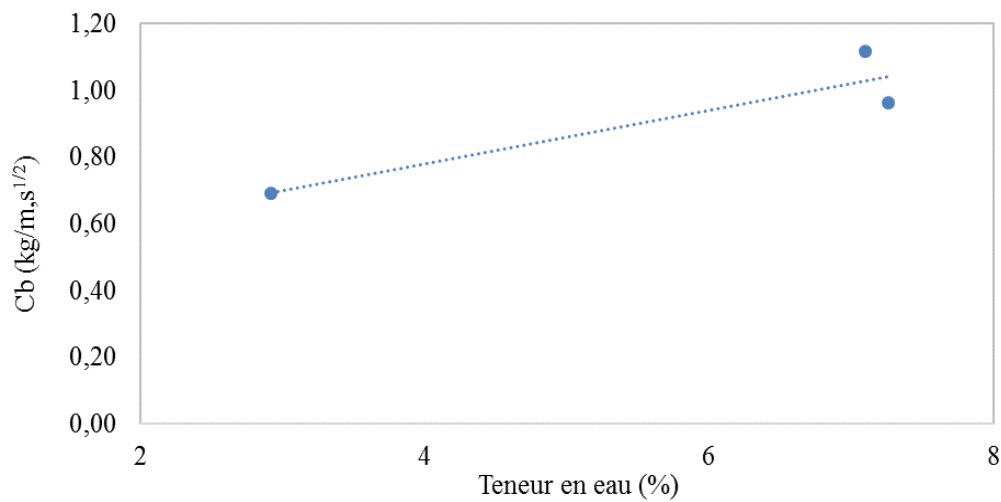


Figure IV-12: Influence de la teneur en eau sur le coefficient C_b .

Les résultats de hauteur capillaire sont présentés dans la figure (IV.13). On observe une variation significative de la hauteur capillaire en fonction de la nature du matériau et du dosage en ciment.

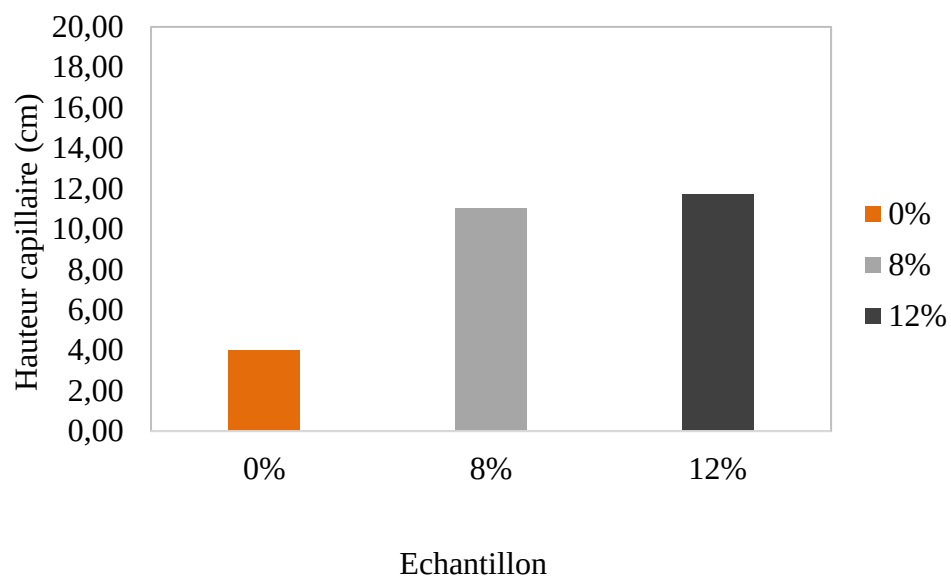


Figure IV-13: influence de dosage en ciment sur le coefficient C_b

Chapitre 04 :Résultats et discussions

4.5 : Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une identification du sol salin de Bordjia. L'analyse granulométrique montre que le sol étudié est essentiellement constitué de particules fines, avec une forte dominance d'argile ($\approx 55\%$) et de limon ($\approx 40\%$), tandis que la teneur en sable est très faible ($\approx 5\%$).

Par la suite, des échantillons compactés et traités à 8 et 12% de ciment expiré, sont séchées à l'air libre. Ces échantillons ont été testé lors des essais de retrait, de perméabilité à l'eau et de capillarité.

Conclusion générale

La terre crue est un matériau d'avenir, mais la compréhension de son comportement hydrique demeure un enjeu majeur pour son développement et son utilisation à grande échelle. De ce fait, cette étude porte sur une identification complète et caractérisation des propriétés hydriques d'un sol compactée destiné à la fabrication d'un matériau terre. Cette partie représente la clé on dans la définition des caractéristiques physiques de la terre crue.

Après la caractérisation du sol salin, un essai Proctor normal a été réalisé afin de déterminer sa densité sèche maximale et sa teneur en eau optimale. Sur la base de ces paramètres optimaux, trois séries d'échantillons ont été confectionnées : une série non stabilisée et deux séries stabilisées avec des teneurs en ciment de 8 % et 12 %. Ces échantillons ont servi à la réalisation de l'ensemble des essais expérimentaux.

La dernière partie de ce travail a été consacrée à l'analyse du comportement hydrique de ces matériaux. Dans un premier temps, nous avons étudié la limite de retrait, la perméabilité à l'eau ainsi que les propriétés de capillarité à l'eau. Les résultats ont mis en évidence une forte corrélation entre l'indice des vides, la teneur en eau et la teneur en ciment des échantillons. Cette étude ouvre des perspectives intéressantes en matière de simulation du comportement hydrique des matériaux en terre crue, afin d'améliorer la compréhension et la prédiction de leurs performances.

Références

- ALONSO, E. Effet des variations de teneur en eau dans les sols compactés. *Revue Française de Géotechnique*, 1993, no 62, p. 7-22.
- AZIZ, Mubashir, SHEIKH, FarooqNaveed, QURESHI, Mohsin Usman, *et al.* Experimental study on endurance performance of lime and cement-treated cohesive soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, vol. 25, no 9, p. 3306-3318.
- BELLEZZA, Ivo et FRATALOCCHI, Evelina. Effectiveness of cement on hydraulic conductivity of compacted soil–cement mixtures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2006, vol. 10, no 2, p. 77-90.
- Bocoum, M. 2004. Méthodes d’analyses des sols. Document de travail. Institut National de Pédologie, Dakar-Sénégal. 55p
- DE CHAZELLES, Claire-Anne. Terre modelée et terre moulée, deux conceptions de la construction en terre. *Edifice et artifice, Histoire constructive*. Picard. Paris, France, 2010, p. 411-419.
- DELAGE, Pierre, AUDIGUIER, Martine, CUI, Yu-Jun, *et al.* Microstructure of a compacted silt. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, vol. 33, no 1, p. 150-158.
- DERDOUR, H., LAVERDIÈRE, M. R., et ANGERS, D. A. Comportement mécanique d’un sol argileux. Effets de la taille des agrégats, de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Canadian journal of soil science*, 1994, vol. 74, no 2, p. 185-191.
- DIALLO, M. D., NDIAYE, O., MAHAMAT SALEH, M., *et al.* ETUDE COMPARATIVE DE LA SALINITE DE L'EAU ET DES SOLS DANS LA ZONE NORD DES NIAYES (SENEGAL). *AfricanCrop Science Journal*, 2015, vol. 23, no 2.
- DIBGOLONGO, PalingwendeAnicetRodrigue. Perfectionnement d'une méthode alternative de contrôle de compactage des sols (Méthode Sherbrooke). 2023.
- EL YOUSSEF, Rawan. *Comportement thermohydrique des sols fins compactés, application au stockage d'énergie*. 2026. Thèse de doctorat. Université de Lorraine.

ESTEOULE, Jacques et ISTVAN, Catherine. Evolution granulométrique des sols sablo-argileux soumis à des compactages dynamique et statique. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 1991, vol. 43, no 1, p. 41-46.

FARZANEH, Orang. *Compactage par vibration des matériaux granulaires. Etude sur le comportement de l'ensemble sol-rouleau vibrant*. 1981. Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

HUSSAIN, Sadam, *et al.* Effect of compaction energy on engineering properties of expansive soil. *Civil Engineering Journal*, 2017, vol. 3, no 8, p. 610-616.

LAIBI, Babatounde. *Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kénaf à des terres argileuses*. 2017. Thèse de doctorat. Normandie Université; Université d'Abomey-Calavi UAC (Bénin).

Mehenni, A., 2015. COMPORTEMENT HYDROMÉCANIQUE ET ÉROSION DES SOLS FINS TRAITÉS. Université de Lorraine.

MOUSSAI, B. Influence de la taille des mottes et du mode de compactage sur la perméabilité des sols. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 1993, vol. 48, no 1, p. 83-88.

MOUSSAI, Belkacem, DIDIER, Gérard, et ATLAN, Yves. Étude d'un appareillage de compactage statique et de mesure de la perméabilité des sols fins argileux. *BLPC-Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 1993, no 188, p. pp 15-22.

Mostefa (2023) : Étude de la salinité des sols et son impact sur les propriétés physico-chimiques des sols. Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.

OLIVIER, Myriam et MESBAH, Ali. Le matériau terre: Essai de compactage statique pour la fabrication de briques de terre compressées. *Bull. Liaison Lab. Ponts et Chaussées*, 1986, vol. 146, p. 37-43.

RANAIVOMANANA, Harifidy, RAZAKAMANANTSOA, Andry, et AMIRI, Ouali. Effects of cement treatment on microstructural, hydraulic, and mechanical properties of compacted soils: Characterization and modeling. *International Journal of Geomechanics*, 2018, vol. 18, no 9, p. 04018106.

Sariosseiri F, Muhunthan B (2009) Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils. *Engineering Geology* 104(1-2):119-125, DOI: [10.1016/j.enggeo.2008.09.003](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.09.003).

SECO, Andres, URMENETA, P., PRIETO, E., *et al.* Estimated and real durability of unfired clay bricks: Determining factors and representativeness of the laboratory tests. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 131, p. 600-605.

SERBAH, Boumediene, ABOU-BEKR, Nabil, BOUCHEMELLA, Salima, *et al.* Dredged sediments valorisation in compressed earth blocks: Suction and water content effect on their mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 158, p. 503-515.

SERRATRICE, Jean-François. Apport expérimental de la méthode de compactage statique des sols au laboratoire. *Revue Française de Géotechnique*, 2018, no 156, p.

SIDDQUY, Muhammad Ali Fardoush, HOSSAIN, Zakaria, et ISLAM, MdYachin. Thermo-responsive engineering of Greencrete blocks: a foundational study toward waste-based next-generation concrete. 2025.

TANG, Shengqiang, SHE, Dongli, et WANG, Hongde. Effect of salinity on soil structure and soil hydraulic characteristics. *Canadian Journal of Soil Science*, 2020, vol. 101, no 1, p. 62-73.

Tschebotarioff, 1973. *Soil Mechanics Foundations and Earth Structures*, McGraw Hill Book Co. Inc., New York

TSCHEBOTARIOFF, Gregory P., 1973. *Foundations: Retaining and Earth Structures: The Art of Design and Construction and Its Scientific Basis in Soil Mechanics*. 2e éd. New York : McGraw-Hill, 642 p. ISBN 0-07-065377-1.

YILMAZ, Yuksel, KHEIRJOUY, AhadBahari, et AKGUNGOR, Ali Payidar. Investigation of the effect of different saturation methods on the undrained shear strength of a clayey soil compacted with standard and modified proctor energies. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2016, vol. 60, no 3, p. 323-329

YING, Zi, CUI, Yu-Jun, BENAHMED, Nadia, *et al.* Salinity effect on the compaction behaviour, matric suction, stiffness and microstructure of a silty soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, vol. 13, no 4, p. 855-863.

Les Normes :

ASTM D422-63 : Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. The distribution of particle sizes larger than 75 μm (retained on No. 200 sieve) is determined by sieving, while the fraction finer than 75 μm is determined by sedimentation (hydrometer method). (1963, reapproved and revised editions through 2007). NF P94-051 Afnor-Standards NFP94-051: Soils investigation and testing. Determination of Atterberg's limits. Liquid limit test using Cassagrande apparatus. Plastic limit test on rolled thread. Mars (1993).

AFNOR XP P94-060 AFNOR XP P94-060-1 : Soils investigation and testing. Shrinkage test. Part 1: Determination of shrinkage characteristic on remoulded soil passing a 400 micrometers test sieve. December (1997).

AFNOR NF P94-056 : Soils investigation and testing. Granulometric analysis. Dry sieving method after washing. March (1996).

AFNOR NF P94-057 : Soils investigation and testing. Granulometric analysis. Hydrometer method (Sedimentation method). May (1992).

AFNOR NF P94-054 : Soils investigation and testing. Determination of particle density of soils. Water pycnometer method. October (1991). AFNOR NF P94-055

AFNOR NF X31-103 : Soil quality. Determination of pH value in water. Electrometric method. November (1988).NF X 31-113

AFNOR NF P94-093 : Soils investigation and testing. Determination of compaction characteristics of a soil. Standard Proctor test (normal energy) and modified Proctor test (high energy). December (1993).