



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة حسيبة بن بوعلي الشلف

UNIVERSITE HASSIBA BEN BOUALI – CHLEF

كلية الهندسة المدنية والمعمارية

FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

قسم الري

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

MEMOIRE

Pour obtenir le diplôme de

Master Hydraulique

Présentée par :

BELABED Ismail

YOUCEF ACHIRA Abdellah

**LA STABILISATION DES SOLS
ARGILEUX RENFORCES PAR DES
ADDITIFS MINERAUX**
**Application sur la vase du barrage de Sidi
Yacoub, W. Chlef**

Devant les membres de jury :

- Dr MESSOUL Abderrahmane
- Dr Chenaoui Bakhta
- Dr BENHADJZIANE F.
- Dr DRISS A.A.E.

Président
Examineur
Encadreur
Co-Encadreur

Année universitaire 2024-2025

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

À mon cher père

À ma chère mère

À mon frères Younes

À mes Sœurs

À tous les enfants Safa, Rassil, med assil, Dima, Roudaina, ahmed et rinad

À toute ma famille et à tous ceux qui m'ont encouragé.

À tous mes amis.

Youcef Achira Abdellah

DEDICACE

Je dédie ce projet :

À mes chers parents

À mes frères et mes sœurs

À tous mes amis.

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

BELABED Ismail

Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu de nous avoir permis de réaliser ce travail, en nous accordant la santé, la clarté d'esprit et la force nécessaires pour le mener à bien.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrante, Dr Benhadj Ziane Fouzia, Maître de conférences à l'Université de Chlef, pour ses conseils précieux, ses remarques constructives et sa disponibilité tout au long de ce travail, et Dr DRISS. A. A. E notre co-encadreur pour nous avoir suivis et aidé et conseillés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos remerciements sincères aux membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire. Nous vous remercions pour vos observations pertinentes et les échanges enrichissants que vous avez suscités.

Nos remerciements vont aussi à l'ensemble des enseignants du département d'Hydraulique, pour la qualité de leur enseignement et leur accompagnement tout au long de notre parcours universitaire.

Nous tenons à remercier chaleureusement Mr ROUICHED AEK. Directeur du barrage de Sidi Yacoub ainsi que le personnel chargé de l'exploitation et d'auscultation du barrage pour leur accueil, leur disponibilité et la facilitation de notre travail sur site.

Nos remerciements vont également à l'ensemble du personnel du Laboratoire National d'Habitat et de Construction (LNHC), Laboratoire des travaux Publiques de la wilaya de Chlef (LTPO), Nos techniciens au niveau des Laboratoires de l'Hydraulique (MDS), de Génie Civil (Matériaux) et (MDF) où nous avons réalisé nos expériences, pour leur assistance technique, leur patience et leur collaboration précieuse.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Que ce soit par leurs conseils, leurs encouragements ou simplement leur présence, leur contribution a été précieuse.

Résumé

La stabilisation des sols est une technique couramment utilisée depuis plusieurs années, consistant à incorporer divers additifs tels que le ciment, la chaux, les cendres volantes ou la pouzzolane, afin d'améliorer la résistance mécanique des sols. Toutefois, l'usage du laitier granulé de haut fourneau (GGBS : Ground Granulated Blastfurnace Slag), seul ou en combinaison avec la chaux, reste peu étudié dans le cadre de l'amélioration des sols, ce qui représente une lacune notable dans la recherche actuelle.

Dans le cadre de cette étude, et dans le but de contribuer à la valorisation des vases issues des barrages algériens, une approche expérimentale a été menée sur le traitement de la vase prélevée au niveau du barrage de Sidi Yacoub, situé sur l'Oued Lardjem, dans la wilaya de Chlef.

Cette étude repose sur l'évaluation des caractéristiques physiques, à travers les limites d'Atterberg, ainsi que des propriétés mécaniques, via les essais Proctor, de cisaillement rectiligne et de compression en flexion, réalisés à 1 jour et à 28 jours. Les essais ont été effectués au niveau du Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (LNHC) ainsi qu'au Laboratoire d'Hydraulique et de Génie Civil de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef.

De la chaux ou du Laitier granulé de haut Fourneau ont été ajoutées à la vase à des proportions de (2%, 4%) et (0%, 10, 20 et 30%) respectivement pour l'amélioration des facteurs mécaniques et géotechniques.

Par ailleurs, les spécimens ont été durcis pendant 1 et 28 jours, avant d'être soumis à des essais de cisaillement non drainé et de compression en flexion.

Les résultats de durabilité obtenus permettent de conclure que les vases stabilisées par l'action combinée de la chaux et du laitier présentent de très bonnes performances mécaniques.

En particulier, la résistance résiduelle au cisaillement rectiligne augmente de manière significative entre le 1er et le 28e jour, comparativement à la résistance initiale.

En outre, les essais démontrent que la combinaison chaux-laitier améliore efficacement la durabilité des vases, la faisant passer d'un niveau médiocre à un niveau excellent.

Donc notre objectif est de fournir des formules capables de rivaliser sur le plan économique et facile à mettre en œuvre dans des sites qui permettent la récupération de ces matériaux dans la géotechnique de la route.

Mots-clés :

Barrage, Laitier de haut fourneau, chaux, Limite d'Atterberg, Proctor, Cisaillement.

Abstract

Soil stabilization is a widely used technique that has been practiced for several years. It involves incorporating various additives such as cement, lime, fly ash, or pozzolana into the soil to improve its mechanical strength. However, the use of Granulated Blast Furnace Slag (GBFS), either alone or in combination with lime, remains insufficiently studied in the context of soil improvement, representing a significant gap in current research.

As part of this study, and with the aim of contributing to the valorization of sediments from Algerian dams, an experimental approach was carried out on the treatment of sediment collected from Sidi Yacoub Dam, located on Oued Lardjem, in the wilaya of Chlef.

This study is based on the evaluation of physical characteristics through Atterberg limits, as well as mechanical properties using Proctor tests, direct shear tests, and flexural compression tests, performed at both 1 day and 28 days. The tests were conducted at the National Laboratory for Housing and Construction (LNHC) and the Hydraulics and Civil Engineering Laboratory of Hassiba Benbouali University of Chlef.

Lime or Granulated Blast Furnace Slag (GBFS) was added to the sediment in proportions of (2%, 4%) and (0%, 10%, 20%, and 30%) respectively, in order to improve the mechanical and geotechnical performance.

Furthermore, the specimens were cured for 1 and 28 days before being subjected to undrained shear and flexural compression tests.

The obtained durability results show that sediments stabilized with the combined action of lime and slag exhibit very good mechanical performance.

In particular, the residual shear strength increased significantly between day 1 and day 28 compared to the initial strength.

Moreover, the tests demonstrate that the lime–slag combination effectively improves the durability of the sediments, enhancing them from poor to excellent quality.

Therefore, our objective is to provide economically competitive and easily applicable formulations on sites where these materials can be recovered and reused in road geotechnical engineering.

Keywords:

Dam, Blast Furnace Slag, Lime, Atterberg Limits, Proctor, Shear Strength.

المخلص

تُعد تثبيت التربة تقنية معروفة تُستخدم على نطاق واسع، وتعتمد على دمج إضافات مثل الإسمنت، والجير، والرماد المتطاير، أو البوزولان بهدف تحسين الخصائص الميكانيكية للتربة. ومع ذلك، فإن استخدام الخبث المحبب العالي الفرن (GBFS)، سواء بمفرده أو مع الجير، لا يزال قليل الدراسة في تطبيقات تحسين التربة، مما يُمثل نقصًا واضحًا في الأدبيات العلمية. تهدف هذه الدراسة إلى المساهمة في تثمين الأوحال الناتجة عن السدود الجزائرية من خلال مقارنة تجريبية تركز على معالجة الأوحال المأخوذة من سد سيدي يعقوب الواقع على وادي الأرجم في ولاية الشلف. وقد شملت الدراسة تقييم الخصائص الفيزيائية (حدود أتْرَبْرغ) والسلوك الميكانيكي (اختبارات بروكتور، القص المباشر، والانضغاط بالانحناء) بعد 1 و28 يومًا من المعالجة. أُجريت التجارب في المخبر الوطني للسكن والبناء (LNHC) ومخبر الهيدروليك والهندسة المدنية بجامعة حسيبة بن بوعلي بالشلف.

تمت إضافة الجير والخبث المحبب العالي الفرن إلى الأوحال بنسب مختلفة (2% و4% للجير؛ 0%، 10%، 20%، و30% للخبث) لتحسين الأداء الجيوتقني والميكانيكي. أظهرت النتائج أن الاستخدام المشترك للجير والخبث يُحسن بشكل ملحوظ متانة وقوة الأوحال المعالجة. وقد سُجلت زيادة ملحوظة في مقاومة القص المتبقية بين اليوم الأول واليوم الثامن والعشرين. تشير النتائج إلى أن مزيج الجير-الخبث يمكنه تحويل الأوحال ضعيفة الجودة إلى مواد ذات متانة عالية. تقترح الدراسة في النهاية تراكيب فعالة من حيث التكلفة وسهلة التطبيق في مشاريع الجيوتقنية الطرقية، خاصةً في المواقع التي تهدف إلى استرجاع المواد وإعادة استخدامها.

المفتاحية:

الكلمات

سد، خبث الفرن العالي، جير، حدود أتْرَبْرغ، بروكتور، مقاومة القص.

Table des matières

Titre	Page
Dédicace	i
Remerciement	iii
Abstract	iv
Résumé	v
ملخص	vi
Table des matières	vii
Liste des tableaux	x
Liste des figures	xi
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Accumulation des sédiments dans les barrages : problématique et pistes de valorisation	3
1.1. Introduction	4
1.2 Processus de l'envasement des barrages	4
1.2.1 Érosion des bassins versants	4
1.2.2 Transport solide	5
1.2.3 La sédimentation des retenues	6
1.3 Problèmes posés par l'envasement	6
1.4 Progression de l'envasement dans les réservoirs des barrages	7
1.5 Méthodes de lutte contre l'envasement	8
1.5.1 Méthodes préventives	8
1.5.2 Méthodes curatives	9
1.6 Valorisations des sédiments	10
1.6.1 Optimisation d'utilisation des vase comme amendements agricoles dans les sols sahariens – AASS	10
1.6.2 Valorisation des sédiments en technique routière	11
1.6.2 Valorisation des sédiments dans l'industrie des matériaux rouges	11
1.7 Conclusion	12
Chapitre 2 : Synthèse bibliographique des travaux effectués sur l'effet de Chaux, Laitier et leur combinaison sur les sols argileux	13
2.1 Introduction	14
2.2 Amélioration des sols	14
2.3 Effets de la chaux	15
2.3.1 Effet de la chaux sur la plasticité	15
2.3.2 Effet de la chaux sur les caractéristiques du compactage	16
2.3.3 Effet de la chaux sur la résistance au cisaillement	16
2.4 Effet du Laitier granulé de haut fourneau la plasticité	17
2.5. Effets de la combinaison chaux/pouzzolane	18
2.5.1 Effet de la combinaison sur les caractéristiques du compactage	18
2.5.2 Effet de la combinaison sur la résistance	19
2.5.3 Effet de la combinaison sur la compression	19

2.6. Conclusion	20
Chapitre 3 : Présentation du barrage de Sidi Yacoub	21
3.1. Introduction	22
3.2 Description du Barrage Sidi –Yacoub	22
3.3 Situation géographique du barrage de Sidi-Yacoub	22
3.4 Destination du barrage de Sidi-Yacoub	23
3.5 Caractéristiques du barrage	24
3.6 Eléments constitutifs du barrage	24
3.6.1 La digue principale du barrage	24
3.6.2 Evacuateur de Crue	25
3.6.3 Tour de prise et vidange de Fond	26
3.6.3.1 Galerie d'accès inclinée	26
3.6.3.2 Tours de prise (Q = 18 à 33 m ³ /s)	27
3.6.3.3 Vidange de fond	27
3.6.4 Galerie d'injection et travaux d'injection	28
3.6.4.1 Galerie d'injection	28
3.6.4.2 Voile d'étanchéité	28
3.6.5 Equipement hydromécanique	28
3.6.5.1 Equipement de prise d'eau	28
3.6.5.2 Equipement de vidange de fond	28
3.7 Caractéristiques topographiques	28
3.8 Hydrologie	29
3.8.1 Climat	29
3.8.2 Pluviométrie	29
3.8.3 Température	30
3.8.4 Humidité	30
3.8.5 Le vent	30
3.8.6 Evaporation	30
3.9 Géologie	31
3.10 Evolution de l'envasement du barrage de Sidi Yacoub	31
3.10.1 Définition du levé	31
3.10.2 Objectif du levé	32
3.10.3 Matériels utilisés	32
3.10.4 Levé bathymétrique en 2019	33
3.11 Conclusion	34
Chapitre 4 : Matériaux et des méthodes utilisées	35
4.1 Introduction	36
4.2 Programme expérimental	36
4.3 Matériaux utilisés	37
4.3.1 La vase du barrage de Sidi Yacoub	37
4.3.2 Chaux	38
4.3.3 Laitier (Granulated Blast Furnace Slag: GBFS)	39
4.4 Propriétés étudiées	41
4.4.1 pH	41
4.4.2 Limites d'Atterberg	42
4.4.2.1 Définition	42
4.4.2.2 Mode opératoire	43
4.4.3 Compactage	44

4.4.4 Essai de cisaillement à la boîte de Casagrande	45
4.4.5 Essai de compression	47
4.5 Conclusion	48
Chapitre 5 : Résultats et Interprétations	49
5.1 Introduction	50
5.2 Variation du pH	50
5.3 Limites d'Atterberg	51
5.3.1 Echantillon C0L0	52
5.3.2 Echantillon C2L0	53
5.3.3 Echantillon C2L10	54
5.3.4 Echantillon C2L20	55
5.3.5 Echantillon C2L30	56
5.3.6 Echantillon C4L0	57
5.3.7 Echantillon C4L10	58
5.3.8 Echantillon C4L20	59
5.3.9 Echantillon C4L30	60
5.3.10 Interprétation	61
5.4 Compactage	63
5.5 Variation du paramètre de résistance au cisaillement	66
5.5.1 Evolution de l'angle de frottement et la cohésion	66
5.5.2 Comportement de la résistance au cisaillement en fonction des conditions de traitement et durée de cure	70
5.6 Essais de Compression	75
5.7 Conclusion	77
Conclusion générale	79
Références	83

Liste des tableaux

N° du tableau	Titre	Page
Tableau 1.1	La situation des barrages dans les pays de l'Afrique du nord (Remini et Hallouche, 2004).	7
Tableau 1.2	Evolution de l'envasement (ANBT, 2023).	7
Tableau 1.3	Evolution de l'envasement dans les barrages Algériens (ANBT, 2023).	8
Tableau 2.1	Techniques d'amélioration des sols et leurs méthodes (Chu et al. (2009).	14
Tableau 2.2	Limites d'Atterberg des sols de coton noir (BCS) non stabilisé et stabilisé à différents pourcentages de chaux (Cheng and Huang 2018).	15
Tableau 3.1	Caractéristiques du barrage de Sidi Yacoub (ANBT, 2019).	24
Tableau 3.2	Comparaison des levés bathymétriques (2004 vs 2019).	34
Tableau 4.1	Les combinaisons étudiées.	37
Tableau 4.2	Propriétés de base de la vase étudiée (Chemani, Lahmer, 2024).	38
Tableau 4.3	Caractéristiques physiques et chimiques de la chaux utilisée.	39
Tableau 4.4	Composition chimique du laitier (%).	40
Tableau 5.1	Résultats de l'essai Proctor de la vase traitée à la chaux et du Laitier Granulé.	62
Tableau 5.2	Cohésion et l'angle de frottement des différentes combinaisons à 1 jour de cure.	66
Tableau 5.3	Cohésion et l'angle de frottement des différentes combinaisons à 28 jours de cure.	69

Liste des figures

N° de figure	Titre	Page
Fig. 1.1	Processus de l'envasement des barrages (Kabir et al., 2011).	4
Fig. 1.2	les différents types de l'érosion (Ouidir, 2012).	5
Fig. 1.3	Phénomène d'érosion dans le bassin versant Chélif (ANBT,2014).	5
Fig. 1.4	Modes de transport solide (Kacim et al, 2017).	6
Fig. 1.5	Mécanisme de la sédimentation des retenues (Remini, 2016).	6
Fig. 1.6	Problèmes posés par la sédimentation (Remini, 2011).	7
Fig. 1.7	État d'envasement des barrages Fergoug et Bakhadda en 2008.	8
Fig. 1.8	Gabionnage contre l'érosion.	9
Fig. 1.9	Une série de seuils réalisée sur une ravine dans un bassin versant (Remini, 2014).	9
Fig. 1.10	Reboisement d'un versant de montagne.	9
Fig. 1.11	Banquettes réalisées au niveau d'un bassin versant à Lakhdaria (Bouira).	9
Fig. 1.12	Surélévation du barrage Ghrib par des hausses fusibles (Remini, 2018).	10
Fig. 1.13	Schéma du soutirage d'un courant de densité par les pertuis de vidange d'un barrage (Bensafiaet Remini, 2016).	10
Fig. 1.14	Suspension soutirée par les pertuis de vidange du barrage de Beni Haroun émanant d'un courant de densité (ANBT, 2014).	10
Fig. 1.15	Variation du coefficient de perméabilité pour les formulations étudiées (Belahout, 2021).	11
Fig. 1.16	Briques et tuiles comparables (Benasla, 2015).	11
Fig. 2.1	Variation de la limite de liquidité et de la limite de plastique en présence de différents pourcentages de chaux (Islam et al. 2019).	15
Fig. 2.2	Courbes de compactage des limons traités avec différents teneurs en chaux (Liu et al. 2019).	16
Fig. 2.3	Courbes contrainte-déformation d'argiles molles traitées à la chaux a 7 jours et 60 jours de durcissement (Sakr et al. 2009).	16
Fig. 2.4	Évolution avec le temps de cure de la résistance maximale au cisaillement (Rosone et al. 2018).	17
Fig. 2.5	Variation des limites de consistance avec ajout de GGBS % (Padmaraj et al., 2017).	17
Fig. 2.6	Effet de la teneur de GGBS sur les limites d'Atterberg (Diaf N. et al. 2022).	18
Fig. 2.7	Effet de la teneur en GGBS sur la densité sèche (Diaf N. et al. 2022).	18
Fig. 2.8	L'évolution de la résistance à la compression simple (UCS) en fonction de la teneur en GGBS (Diaf N. et al. 2022).	19
Fig. 2.9	Rupture de l'échantillon optimisé après 28 jours de cure (Khushbu S.	19

	et al. 2019)	
Fig. 2.10	Variation de la résistance à la compression simple (UCS) en fonction de la période de cure pour différents mélanges (Khushbu S. et al. 2019).	19
Fig. 3.1	Barrage Sidi Yacoub	22
Fig. 3.2	Situation géographique du Barrage Sidi Yacoub (ANBT, 2019).	22
Fig. 3.3	Plan géodésique du barrage de Sidi Yacoub (ANBT,2019).	23
Fig. 3.4	Situation du Barrage Sidi Yacoub (ANBT, 2019).	23
Fig. 3.5	Digue en terre du barrage de Sidi Yacoub, (ANBT,2019).	25
Fig. 3.6	Evacuateur de crue, (ANBT,2019).	25
Fig. 3.7	Vue en plan + coupe en évacuateur de crue, (ANBT,2004).	26
Fig. 3.8	Galerie d'accès inclinée du Barrage de Sidi-Yacoub, (ANBT,2004).	26
Fig. 3.9	Ouvrages des prises, (ANBT,2004).	27
Fig. 3.10	La topographie du barrage Sidi Yakoub (Google Earth).	29
Fig. 3.11	Evaporation annuelles de la station Sidi -Yacoub (2023/2024).	30
Fig. 3.12	Levé topographique (ANBT,2019).	32
Fig. 3.13	Matériels utilisés en levé bathymétrique (ANBT,2019).	33
Fig. 3.14	Comparaison entre les deux levés bathymétrique 2004 et 2019.	34
Fig. 4.1	Présentation des matériaux utilisés : (a) Vase broyée, (b) Chaux hydratée et (c) Laitier broyé.	37
Fig. 4.2	Préparation de la chaux. (a) Conditionnement de la chaux de Saïda, (b) Tamisage avec un tamis de 0,4mm.	39
Fig. 4.3	Laitier granulé de haut fourneau (Granulated Blast Furnace Slag : GBFS)	40
Fig. 4.4	Tests de détermination du pH. (a) Préparation des échantillons, (b) pH-mètre utilisé.	41
Fig. 4.5	Limites d'Atterberg.	42
Fig. 4.6	Dispositif utilisé dans le test limite d'Atterberg selon ASTM D 4318-17.	43
Fig. 4.7	Détermination de la limite de liquidité du sol avant et après traitement. (a) étalement de la pâte et remplissage de la coupelle, (b) pratiqué la rainure et créer une serré de chocs jusqu'à la fermeture des lèvres à 10 mm, (c) prélèvement d'échantillon, (d) séchage à l'étuve 105°.	43
Fig. 4.8	Détermination de la limite de plasticité. (a) formation d'une boulette de pâte et la rouler à la main pour former un rouleau, (b) amincissement du rouleau jusqu'à ce qu'il se fissure à 3 mm de diamètre, (c) prélèvement d'échantillon, (d) séchage à l'étuve 105°.	44
Fig. 4.9	Essais de compactage Proctor normal. (a) l'équipement utilisé, (b) pesage de la masse d'échantillon, (d) étuve.	45
Fig. 4.10	Principe de l'essai de cisaillement direct	45
Fig. 4.11	Essais de cisaillement non consolidés non drainés. (a) moule de préparation d'échantillon, (b) échantillon cisailé, (c) appareil de Casagrande.	46
Fig. 4.12	Courbe contraintes déformations	46
Fig. 4.13	Courbe intrinsèque	46
Fig. 4.14	Essais de cisaillement non consolidés non drainés. (a) moule de préparation d'échantillon, (b) échantillon 35mm × 70mm, (c) appareil de compression.	47
Fig. 4.15	Allure du faciès de rupture des éprouvettes cylindriques	47

Fig. 4.16	Fissures des surfaces latérales des éprouvettes après essais de compression	47
Fig. 4.17	Étapes de rupture des sols.	48
Fig. 4.18	Classification des modes de défaillance des éprouvettes chargées dans un appareil de compression triaxiale. (A) Colonne fragile ; (B) Plaque fragile ; (C) Défaillance fragile ; (D) Défaillance cataclastique ; (E) Faille de cisaillement ; (F) Défaillance ductile ; (G) Écoulement ductile. (Hatibu et Hettiaratchi 1993)	48
Fig. 5.1	Callibrage du pH-mètre.	50
Fig. 5.2	Mélanges préparer pour fixation du % d'ajout de la chaux.	50
Fig. 5.3	Influence des stabilisants sur la variation du pH.	51
Fig. 5.4	Limite de liquidité d'échantillon 1 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.	52
Fig. 5.5	Classification de la vase du barrage de Sidi Yacoub d'après l'abaque de Casagrande.	52
Fig. 5.6	Limite de liquidité d'échantillon C2L0 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.	53
Fig. 5.7	Classification de l'échantillon C2L0 d'après l'abaque de Casagrande.	53
Fig. 5.8	Limite de liquidité d'échantillon C2L10 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.	54
Fig. 5.9	Classification de l'échantillon C2L10 d'après l'abaque de Casagrande.	54
Fig. 5.10	Limite de liquidité d'échantillon C2L20 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.	55
Fig. 5.11	Classification de l'échantillon C2L20 d'après l'abaque de Casagrande.	55
Fig. 5.12	Limite de liquidité d'échantillon C2L30 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.	56
Fig. 5.13	Classification de l'échantillon C2L30 d'après l'abaque de Casagrande.	56
Fig. 5.14	Limite de liquidité d'échantillon C4L0 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.	57
Fig. 5.15	Classification de l'échantillon C4L0 d'après l'abaque de Casagrande.	57
Fig. 5.16	Limite de liquidité d'échantillon C4L10 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.	58
Fig. 5.17	Classification de l'échantillon C4L10 d'après l'abaque de Casagrande	58
Fig. 5.18	Limite de liquidité d'échantillon C4L20 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.	59
Fig. 5.19	Classification de l'échantillon C4L20 d'après l'abaque de Casagrande.	59
Fig. 5.20	Limite de liquidité d'échantillon C4L30 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.	60
Fig. 5.21	Classification de l'échantillon C4L30 d'après l'abaque de Casagrande.	60
Fig. 5.22	Effet des stabilisants sur les limites d'Atterberg.	62
Fig. 5.23	Courbes de compactage de la vase de Sidi Yacoub avant et après traitement avec 2% de chaux.	64
Fig. 5.24	Courbes de compactage de la vase de Sidi Yacoub avant et après traitement avec 4% de chaux.	65
Fig. 5.25	Variation des paramètres de cisaillement par traitement à 2% de chaux à 1jr de cure.	66
Fig. 5.26	Variation des paramètres de cisaillement par traitement à 4% de chaux à 1jr de cure.	66
Fig. 5.27	Diagramme contrainte Résistance au cisaillement de la vase du	67

	barrage de Sidi Yacoub.	
Fig. 5.28	Variation de la résistance au cisaillement de la vase traitée avec 2 % de chaux, en fonction des pourcentages d'ajout de laitier.	68
Fig. 5.29	Variation de la résistance au cisaillement de la vase traitée avec 4 % de chaux, en fonction des pourcentages d'ajout de laitier.	68
Fig. 5.30	Variation des paramètres de cisaillement par traitement à 2% de chaux à 28jrs de cure.	69
Fig. 5.31	Variation des paramètres de cisaillement par traitement à 4% de chaux à 28jrs de cure.	69
Fig. 5.32	Evolution de la résistance au cisaillement de la vase traitée à 2% de chaux en fonction de % d'ajout du Laitier Granulé de haut fourneau à 1 jour de cure.	71
Fig. 5.33	Evolution de la résistance au cisaillement de la vase traitée à 4% de chaux en fonction de % d'ajout du Laitier Granulé de haut fourneau à 1 jour de cure.	72
Fig. 5.34	Evolution de la résistance au cisaillement de la vase traitée à 2% de chaux en fonction de % d'ajout du Laitier Granulé de haut fourneau à 28 jours de cure.	73
Fig. 5.35	Evolution de la résistance au cisaillement de la vase traitée à 4% de chaux en fonction de % d'ajout du Laitier Granulé de haut fourneau à 28 jours de cure.	74
Fig. 5.36	Résistance à la compression de la combinaison C0L0 à 1jour de durcissement.	75
Fig. 5.37	Fissures des surfaces latérales des éprouvettes après essais de compression.	76
Fig. 5.38	Résistance à la compression de la combinaison C4L0 à 1jour de durcissement.	76

Introduction Générale

Introduction Générale

En Algérie, le phénomène d'envasement des barrages progresse à un rythme alarmant. Ses effets néfastes sont multiples, notamment la diminution significative de la capacité de stockage, la dégradation de la qualité de l'eau, ainsi que l'obstruction des organes de vidange et des canaux d'irrigation.

Avec une érosion spécifique annuelle moyenne oscillant entre 2000 et 4000 tonnes par kilomètre carré, les apports solides dans les barrages sont estimés à environ 48 hm³ par an. Cela entraîne un taux d'envasement de plus de 12 %, correspondant à une perte de capacité de stockage avoisinant les 958 hm³. Ce phénomène est particulièrement marqué dans l'ouest du pays, où le taux atteint 47 %, contre 27 % dans le centre et 26 % dans l'est (Demmak, 1982).

La réduction de la capacité de stockage des barrages représente aujourd'hui l'un des enjeux majeurs pour les concepteurs et les exploitants. L'accumulation progressive de sédiments au fond des retenues d'eau réduit leur volume utile, rendant la gestion des ressources hydriques de plus en plus complexe.

Face à ce problème, diverses méthodes curatives sont mises en œuvre en Algérie. Parmi celles-ci figurent : la surélévation des barrages, la technique de chasse, le soutirage des courants de densité, ainsi que le dragage, qui consiste à extraire les sédiments vers une zone de décharge. Cette dernière solution devient incontournable lorsque la stabilité de l'ouvrage est menacée ou que les possibilités de construire de nouveaux barrages se raréfient, en dépit de son coût élevé.

Les barrages du bassin Chéelif-Zahrez sont parmi les plus touchés, en raison de l'érosion accrue due à la nature friable des sols et à l'absence de couverture végétale. Chaque année, une quantité importante de sédiments est piégée dans les réservoirs, réduisant leur durée de vie. En 2002, le taux de comblement était évalué à 16 % de la capacité totale (ANBT, 2004).

Le barrage de Sid Yacoub, situé à 28 km au sud de la wilaya de Chlef, est implanté sur Oued Lardjem. D'une capacité de 248 millions de m³, il assure l'irrigation du périmètre moyen et bas du bassin de Chéelif ainsi que l'alimentation en eau potable (AEP) les agglomérations de Chlef chef-lieu et les villes d'Ouled Ben Abdelkader, Sendjas et Couloir Chlef -Ténès - El Guelta. Il reçoit annuellement environ 4,6 millions de m³ de vase, ce qui équivaut à un taux d'envasement de 2,5 % par an. Un levé bathymétrique réalisé en 2004 estimait ce taux à 11.6 %, l'évaluation actuellement est estimée à plus de 40 % (ANBT, 2019).

Afin de faire face à cette problématique, plusieurs pistes de valorisation des sédiments ont été explorées dans le domaine du génie civil, notamment pour des applications en techniques routières ou en matériaux de construction. Les résultats obtenus ont démontré le potentiel d'utilisation des sédiments traités.

L'objectif de cette étude est de valoriser la vase issue du barrage de Sid Yacoub par un traitement combinant chaux et Laitier granulé de haut fourneau (GGBS : Ground Granulated Blastfurnace Slag) et d'évaluer l'influence de l'ajout du Laitier sur le traitement à la chaux.

Cette étude va nous permettre de :

- Analyser les résultats des tests effectués afin d'interpréter l'effet de la chaux, du Laitier et de leur combinaison ;
- Etudier l'effet de durée de cure et de dosage de la chaux et le Laitier sur les propriétés physiques et mécaniques du sol étudié afin de sélectionner la combinaison optimale pour laquelle le sol est plus stable ;
- Etudier l'influence de la combinaison du Laitier granulé de haut fourneau avec la chaux et la comparer aux résultats obtenus à partir de l'utilisation de la chaux seule ;
- Comprendre le comportement du sol traité avec les différentes teneurs en additifs et décrire les mécanismes de stabilisation.

Cette recherche se divise en deux grandes parties :

- Une partie bibliographique,
- Une partie expérimentale.

La première partie explore le phénomène de sédimentation, en se concentrant sur les causes et origines de l'envasement ainsi que sur les moyens de lutte disponibles. Elle inclut un aperçu des retenues de barrages en Algérie, des matériaux extraits par dragage, des techniques de dévasement et des voies de valorisation, notamment dans le génie civil. Le barrage de Sidi Yacoub y est également présenté.

La deuxième partie décrit la méthodologie de valorisation envisagée, en mettant l'accent sur des préparations et formulations simples, adaptées aux conditions du terrain. Elle est consacrée à la caractérisation géotechnique des sédiments avant et après traitement, ainsi qu'à l'analyse, l'interprétation et la formulation des résultats obtenus.

Enfin, ce travail se conclut par une synthèse des résultats principaux et propose des perspectives pour de futures recherches dans ce domaine.

Partie Théorique
Chapitre 1

**ACCUMULATION DES SÉDIMENTS DANS LES BARRAGES
: PROBLÉMATIQUE ET PISTES DE VALORISATION**

Partie Théorique

Chapitre 1 Accumulation des sédiments dans les barrages : problématique et pistes de valorisation

1.1 Introduction

L'envasement des barrages est un enjeu majeur en matière de gestion hydraulique en Algérie, menaçant directement la durabilité des infrastructures. Ce phénomène est principalement causé par l'érosion hydrique intense dans les bassins versants, entraînant le transport massif de sédiments vers les retenues. Dans la région du Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie), plus de 230 barrages stockent environ 23 km³ d'eau. Chaque année, 125 hm³ de sédiments s'y déposent, dont 32 hm³ en Algérie. Ce sont plus de 30 millions de m³ de sédiments qui s'accumulent annuellement dans les grandes retenues algériennes, affectant gravement une quinzaine de barrages (Remini et al., 2018).

En Algérie, l'envasement des barrages touche principalement les zones arides et semi-arides, où les crues soudaines succèdent à de longues périodes de sécheresse, favorisant fortement l'érosion des sols. D'après les données de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT), le pays compte 81 grands barrages en service en 2019, représentant une capacité totale de 8 milliards de m³. Ce chiffre devrait s'élever à 139 barrages d'ici 2030, portant la capacité nationale à environ 12 milliards de m³ (ANBT, 2020).

1.2 Processus de l'envasement des barrages

La dynamique des sédiments résulte de l'érosion, influencée par le climat, la nature des sols, la topographie et d'autres facteurs. Dans le cas des barrages, l'envasement débute par l'érosion des particules fines par ruissellement, leur transport via les cours d'eau, puis leur dépôt et tassement au fond du réservoir (Fig.1.1).

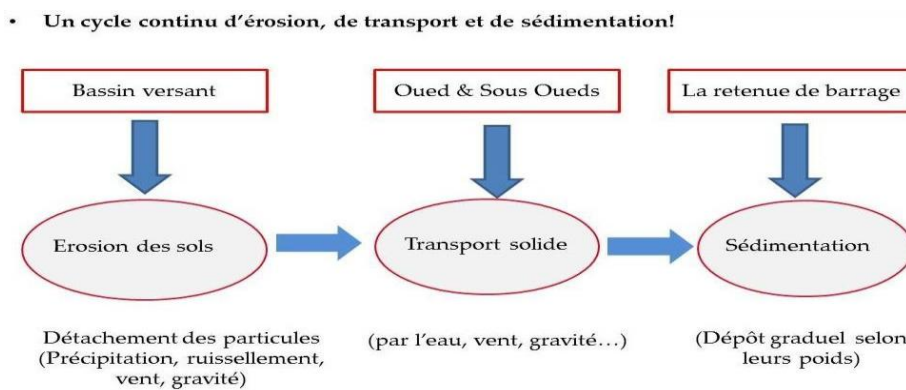


Fig. 1.1 — Processus de l'envasement des barrages (Kabir et al., 2011).

1.2.1 Érosion des bassins versants

L'érosion des sols est un processus naturel complexe qui entraîne le déplacement des matériaux en surface, principalement sous l'effet de la pluie (érosion hydrique) ou du vent (érosion éolienne) (Fig.1.2).. Dans les bassins versants, les particules détachées sont transportées vers les cours d'eau à des vitesses variables, sous forme de sédiments fins ou grossiers (Ouidir, 2012).

Partie Théorique

Chapitre 1 Accumulation des sédiments dans les barrages : problématique et pistes de valorisation

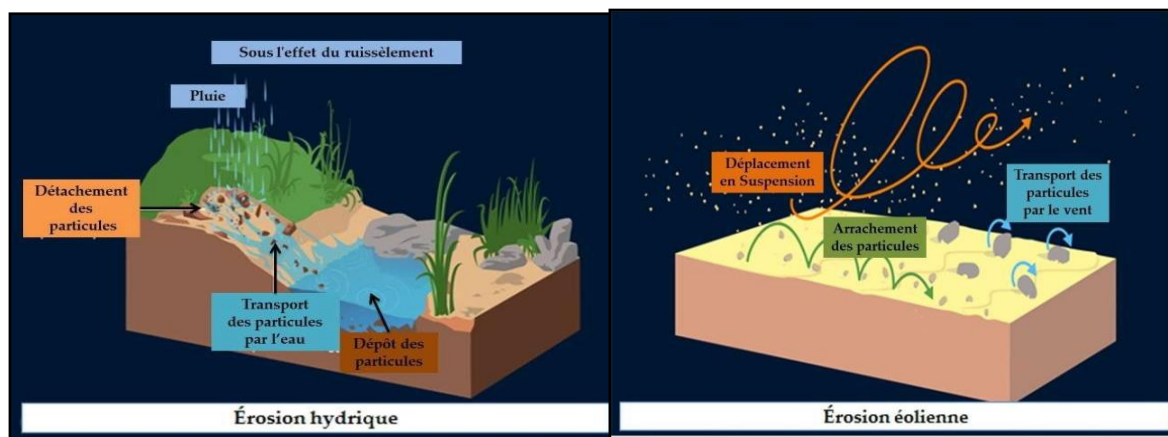


Fig. 1.2 — les différents types de l'érosion (Ouidir, 2012).

L'érosion des sols constitue l'un des principaux défis pour l'aménagement des bassins versants, notamment en zones arides et semi-arides (Fig.1.3). Ce phénomène est particulièrement marqué au Maghreb, où la rareté des ressources en eau est aggravée par des taux d'érosion pouvant atteindre 5000 t/km²/an, contre seulement 30 à 50 t/km²/an en Europe (Roose, 2004).



Fig. 1.3 — Phénomène d'érosion dans le bassin versant Chélif (ANBT,2014).

1.2.2 Transport solide

Le transport solide constitue la seconde phase de l'érosion, représentant le déplacement des particules solides dans un cours d'eau. Ce processus, influencé par la topographie, la géologie du bassin versant et le régime climatique, varie dans le temps et l'espace. Il relie les sols érodés du bassin versant à la retenue du barrage, contribuant à son envasement (Fig.1.4). Le transport solide se manifeste selon deux modes :

- **Le charriage**, où les particules lourdes (sables, graviers) roulent au fond avec une vitesse inférieure à celle de l'eau.
- **La suspension**, où les matériaux fins (limons, argiles) sont transportés à la vitesse du courant.

Partie Théorique

Chapitre 1 Accumulation des sédiments dans les barrages : problématique et pistes de valorisation

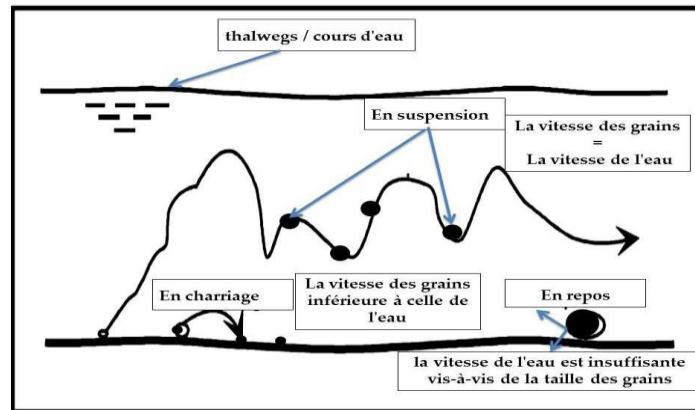


Fig. 1.4 — Modes de transport solide (Kacim et al, 2017).

I.2.3 La sédimentation des retenues

L'accumulation progressive des matières solides dans les réservoirs des barrages, depuis l'amont vers l'aval, résulte d'un processus de sédimentation influencé par plusieurs facteurs (Frémion et al., 2016) (Fig. 1.5).

- La quantité et la nature des dépôts dépendent de l'origine géologique des sédiments,
- De l'intensité des précipitations,
- De la topographie du cours d'eau,
- De la couverture végétale du bassin versant, qui conditionne la teneur en matières organiques.

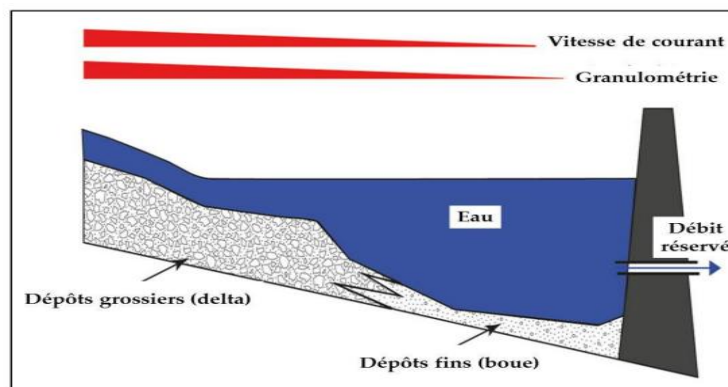


Fig. 1.5 — Mécanisme de la sédimentation des retenues (Remini, 2016).

1.3 Problèmes posés par l'envasement

Parmi les problèmes que pose l'envasement des retenues de barrages (Fig. 1.6), on peut retenir quatre Inconvénients majeurs qui sont :

- La réduction de la capacité d'emmagasinement.
- L'obturation des organes de vidange.
- La remise en cause de la sécurité de l'ouvrage.
- L'envasement des canaux d'irrigation.
- La dégradation de la qualité de l'eau.
- L'obturation des pompes.

Partie Théorique

Chapitre 1 Accumulation des sédiments dans les barrages : problématique et pistes de valorisation

La fig. 1. 6 illustre les problèmes engendrés par l’envasement :

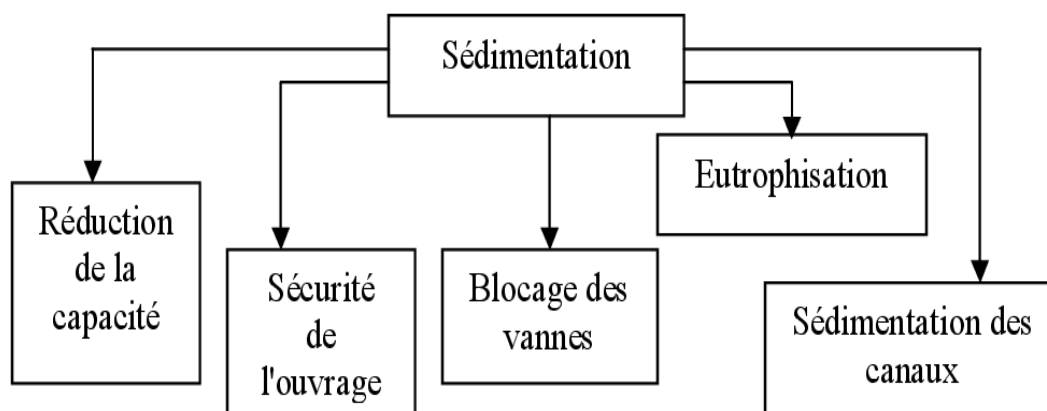


Fig. 1.6 — Problèmes posés par la sédimentation (Remini, 2011).

1.4 Progression de l’envasement dans les réservoirs des barrages

La sédimentation dans les barrages d’Afrique du Nord atteint des volumes importants. Sur plus de 230 barrages totalisant une capacité d’environ 23 milliards de m³, près de 122 millions de m³ de sédiments s’y déposent chaque année, principalement au Maroc, en Algérie et en Tunisie (voir Tableau 1.1).

Tableau 1.1 — La situation des barrages dans les pays de l’Afrique du nord (Remini et Hallouche, 2004).

Pays	Capacité de stockage (Milliards m ³)	Envasement annuel (Mm ³)
Algérie	5.2	32
Maroc	14	65
Tunisie	3.5	25
Total	22.7	122

À l’échelle nationale, le phénomène d’envasement touche une grande majorité des infrastructures. L’Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) assure aujourd’hui la gestion de 80 grands barrages. Les prévisions indiquent une évolution continue de l’envasement selon les tendances suivantes:

Tableau 1.2— Evolution de l’envasement (ANBT, 2023).

Année	1957	1962	2000	2006	2010	2020	2030
Quantité de vase (Mm ³)	200	240	800	898	950	1280	1 400

Partie Théorique

Chapitre 1 Accumulation des sédiments dans les barrages : problématique et pistes de valorisation

Le tableau 1.3 ci-dessous aussi résume l'ampleur de l'envasement des barrages en Algérie.

Tableau 1.3 — Evolution de l'envasement dans les barrages Algériens (ANBT, 2023).

Période	Nbre de barrages	Capacité de stockage initiale (Mm ³)	Volume régularisé (Mm ³)	Capacité estimée 2004 (Mm ³)	Volume de vase actuel (Mm ³)	Taux d'envasement (%)
1962	14	826	376	530	296	35,8
1962 à 2000	34	3.939	1.572,8	3452	487	12,3
2000 à 2020	32	4269.09	2690.2	3772,83	496,26	11,62

Selon les prévisions de l'ANBT (2023), l'envasement des barrages existants en Algérie pourrait atteindre 1 400 Mm³ d'ici 2030, soit 15,4 % de leur capacité totale. Ce phénomène concerne principalement les ouvrages en service depuis plus de 50 ans (ANBT, 2023).



Fig. 1.7 — État d'envasement des barrages Fergoug et Bakhadda en 2008.

1.5 Méthodes de lutte contre l'envasement

En Algérie, l'envasement des barrages représente un enjeu majeur, menaçant leur capacité de stockage et leur stabilité. Face à la rareté des sites pour de nouveaux ouvrages et aux risques de pénurie d'eau attendus au Maghreb d'ici 2025, l'entretien des barrages existants est devenu essentiel. Pour limiter l'envasement des barrages, deux approches principales sont mises en œuvre en Algérie :

1.5.1 Méthodes préventives

Elles visent à réduire la formation des sédiments en traitant les bassins versants. Parmi les techniques utilisées :

- Reboisement massif (plus de 2,6 millions d'arbres plantés depuis 2016) (Fig. 1.8)
- Défense et restauration des sols ;

Partie Théorique

Chapitre 1 Accumulation des sédiments dans les barrages : problématique et pistes de valorisation

- Aménagements antiérosifs comme les banquettes, barrages en gabions, plages d'épandage (Fig. 1.9) ;
- La création de petits barrages en gabions dans les petits thalwegs (Fig. 1.10) ;
- La création de plages d'épandage (Fig. 1.11) ;
- Plantation suivant les courbes de niveau et dans les oueds (ex. tamaris comme pièges à sédiments)

Ces actions s'inscrivent dans un programme national piloté par l'ANBT, accompagné d'études globales sur la protection des bassins versants ([ANBT, 2023](#)).



Fig. 1.8 — Gabionnage contre l'érosion.



Fig. 1.9 — Une série de seuils réalisée sur une ravine dans un bassin versant ([Remini, 2014](#)).



Fig. 1.10 — Reboisement d'un versant de montagne.



Fig. 1.11 — Banquettes réalisées au niveau d'un bassin versant à Lakhdaria (Bouira).

1.5.2 Méthodes curatives

- Surélévation des digues des barrages (Fig. 1.12) ;
- Les Chasses (dites à l'Espagnole) (Fig. 1.13) ;
- Soutirage des courants de densité (Fig. 1.14) ;
- La technique de dragage des barrages.

Partie Théorique

Chapitre 1 Accumulation des sédiments dans les barrages : problématique et pistes de valorisation



Fig. 1.12 — Surélévation du barrage Ghrib par des hausses fusibles (Remini, 2018).

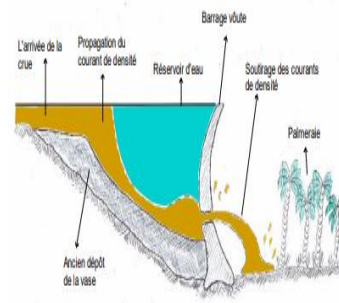


Fig. 1.13 — Schéma du soutirage d'un courant de densité par les pertuis de vidange d'un barrage (Bensafiaet Remini, 2016).

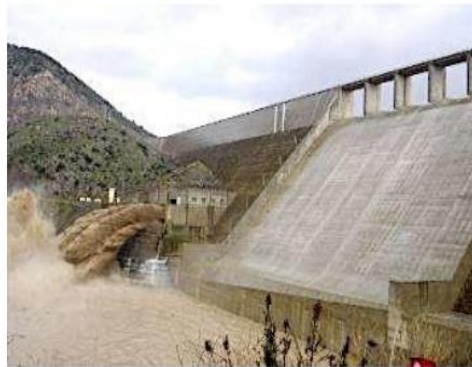


Fig. 1.14 — Suspension soustraite par les pertuis de vidange du barrage de Beni Haroun émanant d'un courant de densité (ANBT, 2014).

1.6 Valorisations des sédiments

La question de la réutilisation des vases, encore peu exploitée, exige une actualisation réglementaire cohérente avec les enjeux écologiques et les objectifs du développement durable.

1.6.1 Optimisation d'utilisation les vase comme amendements agricoles dans les sols sahariens – AASS

Belahout (2021) a conduit une étude portant sur l'utilisation des sédiments du barrage de Djorf Torba (wilaya de Béchar) comme amendement agricole dans la plaine d'Abadla, sur une surface de 5400 hectares. Les résultats ont révélé une corrélation directe entre la perméabilité du sol et sa capacité à retenir l'eau (Fig. 1.15).

Partie Théorique

Chapitre 1 Accumulation des sédiments dans les barrages : problématique et pistes de valorisation

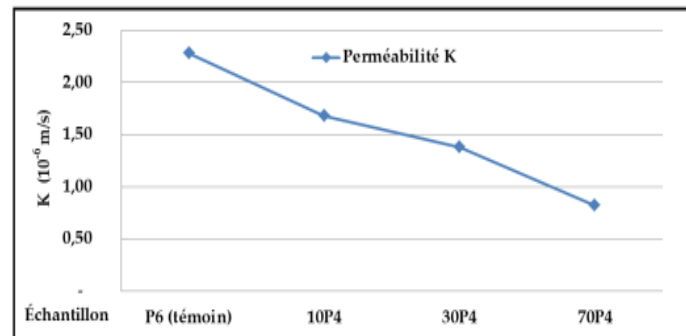


Fig. 1.15 — Variation du coefficient de perméabilité pour les formulations étudiées (Belahout, 2021).

1.6.2 Valorisation des sédiments en technique routière

Face à la demande croissante de granulats bon marché, les entreprises de travaux routiers se tournent vers les matériaux recyclés, notamment les sédiments. De nombreuses études ont confirmé leur potentiel dans la construction routière, à condition qu'ils soient préalablement traités. En effet, leur forte teneur en eau, en argile, en matières organiques, en sels (dans le cas des sédiments marins) et parfois en métaux lourds constitue un frein à leur utilisation directe, car ces éléments altèrent leurs propriétés géotechniques (Belara et al., 2016).

1.6.2 Valorisation des sédiments dans l'industrie des matériaux rouges

Cette analogie de composition a orienté les recherches vers la valorisation des sédiments comme matière première dans les briques. La confection des briques a été réalisée au sein même de la briqueterie Al Andalous de Tanger (Maroc). La fig. 1.16 montre l'aspect des briques obtenues en substituant 70% de l'argile utilisée par les sédiments de dragage du barrage d'Oued Fodda.



Fig. 1.16 — Briques et tuiles comparables (Benasla, 2015).

Partie Théorique
**Chapitre 1 Accumulation des sédiments dans les barrages : problématique
et pistes de valorisation**

1.7 Conclusion:

L'envasement des barrages est un processus naturel complexe qui menace sérieusement les infrastructures hydrauliques en Algérie, réduisant la capacité de stockage et compromettant la sécurité des ouvrages. La durée de vie moyenne des barrages algériens est estimée à seulement 30 ans, principalement à cause de l'accumulation rapide des sédiments.

Face à cette situation critique, les experts appellent à l'élaboration d'un plan national de lutte contre l'envasement, axé sur des mesures préventives dans les bassins versants. Toutefois, cette démarche nécessite des moyens techniques importants, dont la création de bases de données et des études détaillées du terrain.

Selon l'ANBT, le phénomène est amplifié par les effets du changement climatique, qui accentue l'érosion des sols via des épisodes météorologiques extrêmes.

Pour y faire face, une campagne nationale de dévasement est en cours (2019-2024), visant à extraire 38 millions de m³ de vase de neuf barrages. En parallèle, un programme de reboisement lancé en 2021 prévoit la plantation de plus de 300 000 arbres autour des bassins afin de réduire l'érosion.

Partie théorique
Chapitre 2

**SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DES TRAVAUX
EFFECTUÉS SUR L'EFFET DE CHAUX, LAITIER ET LEUR
COMBINAISON SUR LES SOLS ARGILEUX**

Partie théorique
Chapitre 2 Synthèse bibliographique des travaux effectués sur l'effet de Chaux, Laitier et leur combinaison sur les sols argileux

2.1 Introduction

Les sols argileux, en raison de leur forte plasticité, compressibilité et faible portance, posent de nombreux problèmes en génie civil. Pour améliorer leurs propriétés géotechniques, diverses techniques de stabilisation sont utilisées, notamment par l'ajout de liants minéraux comme la chaux, le ciment, les cendres volantes, la pouzzolane ou le laitier. Ce chapitre vise à synthétiser les recherches sur l'effet de la chaux et de la pouzzolane, seules ou combinées, sur la stabilisation des sols argileux.

2.2 Amélioration des sols

Le sol de chantier de construction peut ne pas toujours convenir parfaitement aux structures de support dans son état naturel. Dans un tel cas ; le sol doit être amélioré pour augmenter sa capacité portante et diminuer le tassement, alors se donne un aperçu des techniques et leurs méthodes couramment utilisées pour améliorer le sol (Islam et al. 2019).

Ces méthodes sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 2.1 — Techniques d'amélioration des sols et leurs méthodes (Chu et al. (2009)).

Techniques d'amélioration des sols	Méthodes d'amélioration des sols
Amélioration des sols sans adjuvants	Remplacement de sol
	Prés compression où rechargement
	Drains verticaux (drains de sable /Drain verticaux préfabriqués
	Compactage d'impact rapide
	Compactage dynamique
	Vibrocompactage où vibroflottation
Amélioration des sols par adjuvants où inclusions	Colonnes en pierre
	Colonnes ballastées sèches
	Les colonnes ballastées
	Induction hydrauliques
	Inclusions rigides insert
	Colonnes à modules mixte CMM
	Les micropieux
	Pieux élitaire
Pieux sécants	
Amélioration des sols par stabilisation avec additifs et méthodes de jointoiment	Stabilisation chimique (ciment/chaux /cendres volantes)
	Malaxage du sol
	Jet Grouting
	Injection de compensation
Amélioration des sols par des méthodes thermiques	Chauffage du sol
	La congélation du sol

2.3 Effets de la chaux

La stabilisation des sols cohésifs à la chaux est largement utilisée en raison de son faible coût et de son efficacité. Elle améliore les propriétés des sols argileux en réduisant leur gonflement, leur retrait, ainsi qu'en modifiant leurs caractéristiques de compactage et en augmentant leur résistance mécanique (Al-Mokhtar et al., 2010 ; Garzon et al., 2016).

2.3.1 Effet de la chaux sur la plasticité

Selon plusieurs études, deux tendances principales ont été observées concernant l'évolution de la limite de liquidité des sols cohésifs traités à la chaux. Dans certains cas, comme ceux rapportés par Islam et al. (2019) et Harichane et al. (2018), l'augmentation de la teneur en chaux (jusqu'à 12 %) entraîne une diminution progressive de la limite de liquidité. De même, Jha et Sivapullaiah (2015) ont observé cette baisse sur une argile fortement compressible (Fig.2.1).

Cependant, d'autres recherches, comme celles de Cheng et Huang (2018), montrent une première augmentation de la limite de liquidité avec une faible teneur en chaux (jusqu'à 3 %), suivie d'une diminution au-delà de cette dose. Ce comportement mixte a également été confirmé par Sakr et al. (2009) et Harichane et al. (2018).

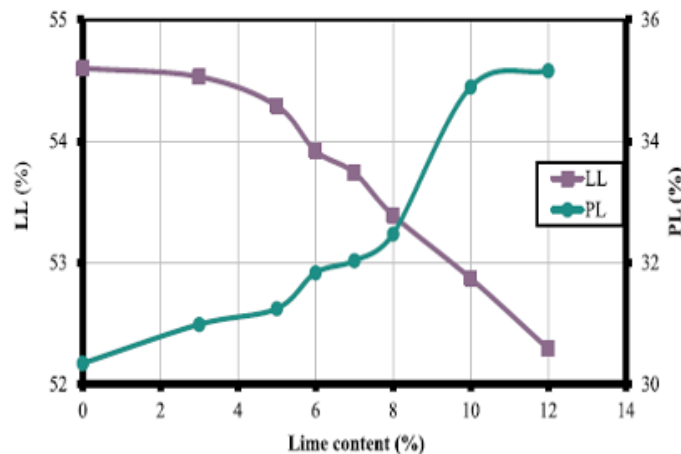


Fig. 2.1 — Variation de la limite de liquidité et de la limite de plasticité en présence de différents pourcentages de chaux (Islam et al. 2019).

Tableau 2.2 — Limites d'Atterberg des sols de coton noir (BCS) non stabilisé et stabilisé à différents pourcentages de chaux (Cheng and Huang 2018).

	Limite de liquidité (%)	Limite de plasticité (%)	Indice de liquidité (%)
Sol non traité	64.3	33.6	30.7
1% Chaux	65.6	35.7	29.9
3% Chaux	68.1	41.9	26.2
6% Chaux	63.4	45.8	17.6
9% Chaux	58.3	50.0	8.3

Partie théorique

Chapitre 2

Synthèse bibliographique des travaux effectués sur l'effet de Chaux, Laitier et leur combinaison sur les sols argileux

La diminution de la limite de liquidité dans les sols argileux traités à la chaux résulte de la réduction de l'épaisseur de la double couche diffuse et de la floculation des particules, causées par l'élévation du pH et l'échange ionique avec les minéraux argileux.

2.3.2 Effet de la chaux sur les caractéristiques du compactage

Selon [Liu et al. \(2019\)](#), l'augmentation de la teneur en chaux entraîne un déplacement de la courbe de compactage vers le bas et la droite. Cela reflète une diminution progressive de la densité sèche maximale ainsi qu'une augmentation de la teneur en eau optimale. De plus, la courbe de compactage des sols stabilisés à la chaux devient plus aplatie comparée à celle des sols naturels (Fig.2.2). Des observations similaires ont été rapportées par [Garzón et al. \(2016\)](#), [Islam et al. \(2019\)](#) et [Driss et al. \(2021\)](#), qui ont tous conclu que la réponse du sol traité dépend directement de la quantité de chaux ajoutée : plus la proportion de chaux est élevée, plus la densité sèche maximale diminue, tandis que la teneur en eau optimale augmente.

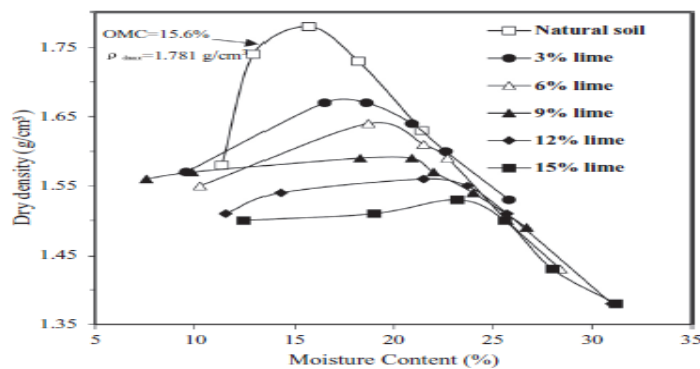


Fig. 2.2 — Courbes de compactage des limons traités avec différentes teneurs en chaux ([Liu et al. 2019](#)).

2.3.3 Effet de la chaux sur la résistance au cisaillement

Généralement, un gain considérable de la résistance du sol est observé après traitement du sol à la chaux (Fig. 2.3). L'augmentation de la teneur en chaux et de temps de cure développe la résistance à la compression non confinée (UCS) ([Islam et al. 2019](#), [Driss et al. 2023](#)).

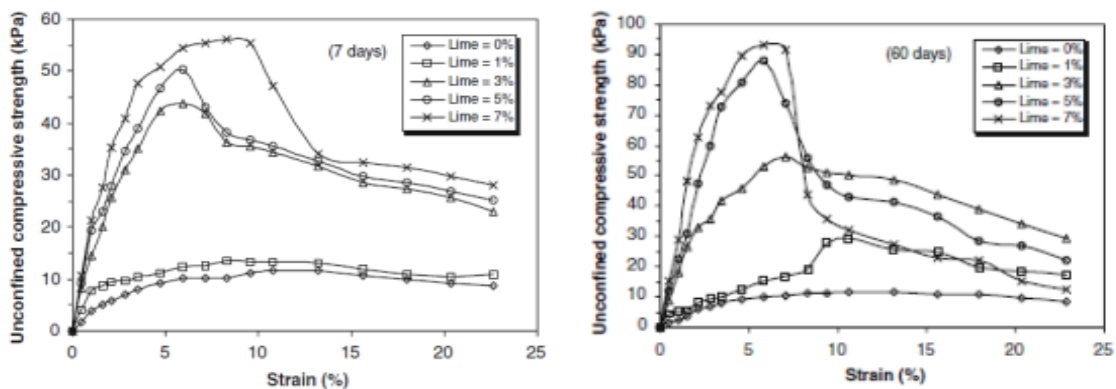


Fig. 2.3 — Courbes contrainte-déformation d'argiles molles traitées à la chaux à 7 jours et 60 jours de durcissement ([Sakr et al. 2009](#)).

Partie théorique

Chapitre 2 Synthèse bibliographique des travaux effectués sur l'effet de Chaux, Laitier et leur combinaison sur les sols argileux

L'augmentation de la résistance au cisaillement à court terme résulte principalement de la floculation des particules, tandis qu'à long terme, elle est attribuée aux réactions pouzzolaniques entre la chaux et les minéraux argileux (Vitale et al., 2017). Ce constat a été confirmé par de nombreuses autres études menées par différents chercheurs.

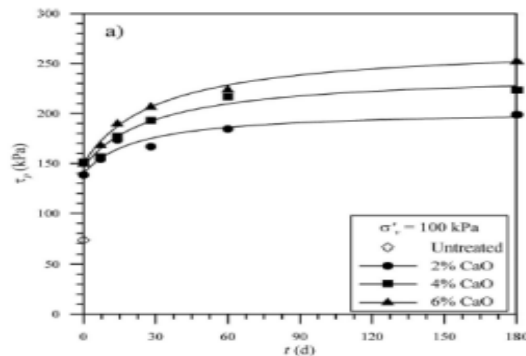


Fig. 2.4 — Évolution avec le temps de cure de la résistance maximale au cisaillement (Rosone et al. 2018).

Rosone et al. (2018) ont observé que la résistance au cisaillement de l'argile traitée augmente significativement avec le temps et la teneur en chaux (Fig. 2.4). Cette amélioration s'explique, à court terme, par la floculation des particules de sol induite par la chaux, ce qui accroît l'angle de frottement interne. À long terme, la hausse de la cohésion résulte de la formation de produits de cimentation issus des réactions pouzzolaniques.

2.4. Effet du Laitier granulé de haut fourneau la plasticité

L'étude menée par (Padmaraj et al., 2017) a montré que l'ajout de laitier de haut fourneau granulé et broyé (GGBS) au sol naturel d'une argile meuble qui provienne des zones vallonnées de la région de Kakkaya, Inde, entraîne une diminution notable des limites de consistance, notamment de la limite de liquidité, de la limite de plasticité et de l'indice de plasticité. Cette baisse est particulièrement marquée jusqu'à 10 % de liant ajouté. Ce phénomène s'explique par la désintégration de la double couche diffuse, provoquant la floculation des particules, ce qui réduit le comportement plastique du sol.

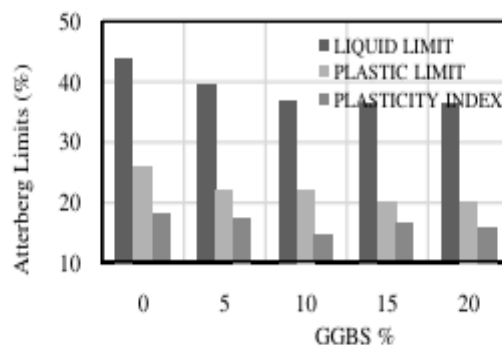


Fig. 2.5 — Variation des limites de consistance avec ajout de GGBS % (Padmaraj et al., 2017).

Même comportement observé par (Diaf N. et al. 2022) d'après son étude menée sur les sols argileux extraites de la région Laghdir localisée à 30 km Est de Skikda (Algeria), stabilisé avec 3, 6, 9, and 12 % of Laitier (GGBS), respectivement, combiné à 1 % de chaux activée (Fig. 2.6).

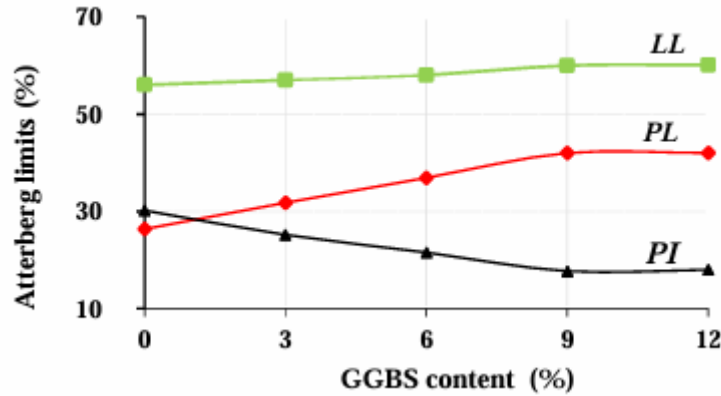


Fig. 2.6 — Effet de la teneur de GGBS sur les limites d'Atterberg (Diaf N. et al. 2022).

2.5 Effets de la combinaison chaux/pouzzolane

2.5.1 Effet de la combinaison sur les caractéristiques du compactage

En raison du phénomène de floculation, la modification granulométrique permet aux agrégats d'occuper un espace plus important, ce qui entraîne une augmentation du volume de la structure du composite. Par conséquent, le traitement de l'argile limoneuse par l'ajout de GGBS (laitier de haut fourneau granulé et broyé) réduit la densité sèche maximale et augmente la teneur en eau optimale du composite, (Fig.2.7) (chaux vive – GGBS – sol). Ce qui a été prouvé par (Diaf N. et al. 2022).

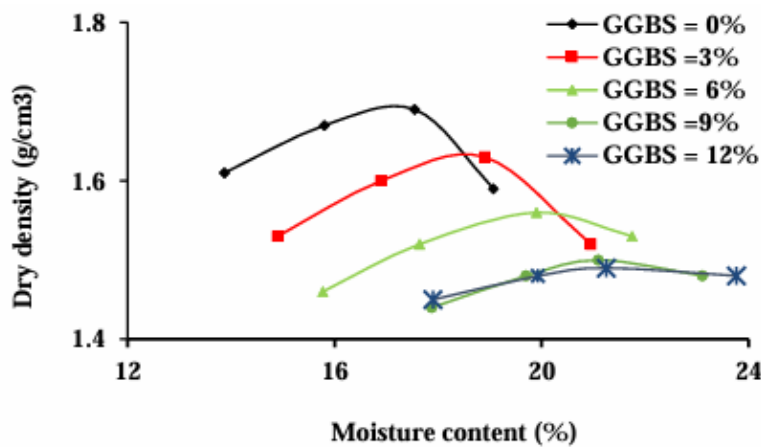


Fig. 2.7 — Effet de la teneur en GGBS sur la densité sèche (Diaf N. et al. 2022).

Partie théorique

Chapitre 2

Synthèse bibliographique des travaux effectués sur l'effet de Chaux, Laitier et leur combinaison sur les sols argileux

2.5.2 Effet de la combinaison sur la résistance

Diaf N. et al. (2022) a montré que la résistance à la compression simple (UCS) augmente progressivement avec l'âge de maturation du composite (Sol + 3 % GGBS + 1 % chaux vive), vérifiant ainsi le critère de portance pour la circulation (1 MPa à 28 jours) voir Fig. 2.8.

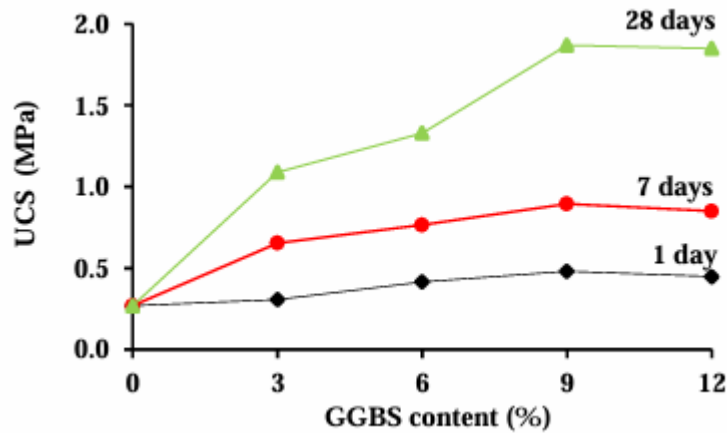


Fig. 2.8 — L'évolution de la résistance à la compression simple (UCS) en fonction de la teneur en GGBS (Diaf N. et al. 2022).

2.5.3 Effet de la combinaison sur la compression

D'après Khushbu S. (2019), la résistance à la compression simple (UCS) du sol traité s'est améliorée avec l'augmentation de la teneur en GGBS ainsi qu'avec la prolongation de la période de cure (Fig 2.10). L'essai UCS a été réalisé sur des échantillons de tous les mélanges, après 0, 7, 14 et 28 jours de cure (Fig 2.9).



Fig. 2.9 — Rupture de l'échantillon optimisé après 28 jours de cure (Khushbu S. et al. 2019)

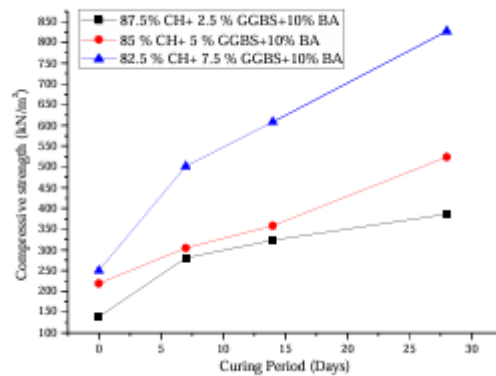


Fig. 2.10 — Variation de la résistance à la compression simple (UCS) en fonction de la période de cure pour différents mélanges (Khushbu S. et al. 2019).

Partie Théorique
Chapitre 3

PRÉSENTATION DU BARRAGE DE SIDI YACOUB

3.1. Introduction

Le présent chapitre a pour but de présenter les caractéristiques de la zone d'étude du barrage, à travers sa localisation, la taille du bassin versant et les propriétés hydrologiques et géologiques et climatiques de ce bassin versant.

3.2 Description du Barrage Sidi –Yacoub

Le barrage de Sidi-Yacoub est un ouvrage en remblai comportant un noyau central argileux assurant son étanchéité. Il a été construit entre 1981 et 1986. Sa hauteur atteint 95 m, avec une altitude de crête de 272 m. Le barrage est équipé de quatre prises d'eau, espacées de 8,5 m. Il est alimenté par deux cours d'eau, dont le plus important est l'Oued Lardjem, un affluent majeur de la rive gauche du fleuve Chéllif. La capacité de stockage maximale du barrage est de 280 Mm³, et un apport moyen annuel de l'oued est de 98 hm³/an. Son coût initial du projet de réalisation était de 500 millions de dinars, mais après réévaluation, il a été porté à 700 millions de dinars.



Fig.3.1— Barrage Sidi Yacoub.

3.3 Situation géographique du barrage de Sidi-Yacoub

Le barrage Sidi Yacoub est situé sur l'Oued Ardjem à 20 km au Sud de la ville d'Oued Fodda dans la Wilaya de Chlef (Fig.3.2).

L'accès au barrage se fait principalement via le chemin de wilaya CW2. Le barrage de Sidi Yacoub est situé à la latitude 33°98 Nord et à la longitude 1°32. Le site a été choisi à la suite d'études morphologiques visant à identifier l'emplacement le plus adapté. Les gorges présentent une largeur de 60 à 90 m et une longueur d'environ 430 m. L'axe du barrage a été placé de manière à permettre l'aménagement de batardeaux en amont et en aval. Le flanc droit des gorges est de forme concave, tandis que le flanc gauche présente une forme convexe.



Fig.3.2— Situation géographique du Barrage Sidi Yacoub (ANBT, 2019).



Fig. 3.3 — Plan géodésique du barrage de Sidi Yacoub (ANBT,2019).

Le barrage de Sidi Yacoub est limité géographiquement par :

- La mer Méditerranée au Nord.
- La wilaya de Tissemsilt au Sud.
- Les wilayas de Mostaganem et de Relizane à l'Ouest.
- Les wilayas d'Ain Defla et de Tipaza à l'Est.



Fig. 3.4 — Situation du Barrage Sidi Yacoub (ANBT, 2019).

3.4 Destination du barrage de Sidi-Yacoub

Le Barrage de Sidi Yacoub a permis de mobiliser un volume total de 224,064 Hm³ selon le dernier levé bathymétrique du mois de Septembre 2019. Il a Une Double Destination :

- L'irrigation du périmètre moyen et bas du bassin de Chéllif.
- L'alimentation en eau potable (AEP) les agglomérations de Chlef chef-lieu et les villes d'Ouled Ben Abdelkader, Sendjas et Couloir Chlef -Ténès - El Guelta.

Dans le même volet irrigation, ce barrage a contribué à l'irrigation du périmètre du Bas Chelif en 1988 avec un volume lâché de 24 Hm³ /an pour irriguer une superficie de 2684 ha.

Et durant la période 1996/2000 avec un volume moyen lâché de 27 Hm³ /an et cela pour une superficie moyenne irriguée de 2414 ha.

3.5 Caractéristiques du barrage

D'après la fiche technique élaborée par l'ANBT en 2019, les caractéristiques du barrage de Sidi Yacoub sont bien résumées en tableau suivant :

Tableau 3.1— Caractéristiques du barrage de Sidi Yacoub (ANBT, 2019).

Désignations	Unité	Valeur
Cote de la crête du Barrage	m	272.00
Hauteur du Barrage	m	95.00
Largeur de la crête	m	12.00
Longueur du Barrage	m	395.00
Niveau de la retenue normale	m	264.00
Niveau d'exploitation minimale	m	224.00
Superficie du bassin versant	Km ²	915.,00
Superficie de la cuvette	ha	925
Volume de la retenue normale	m ³	286 x 10 ⁶
Volume régularisé	m ³	88 x 10 ⁶
Volume mort	m ³	53 x 10 ⁶
Volume total de remblai	m ³	3.6 x 10 ⁶

3.6 Eléments constitutifs du barrage

3.6.1 La digue principale du barrage

Le barrage de Sidi-Yacoub est constitué de :

1. Une digue en terre intégrant un noyau central étanche en argile de 95m de hauteur avec une crête à la cote 272 m, composée d'un noyau étanche, des filtre et drains de protection ainsi que des recharges amont et aval ;
2. Le noyau étanche est construit en argile Pour des raisons d'une plus grande sécurité sismique, il est implanté verticalement dans une partie centrale de la digue ;
3. La protection du noyau en argile consiste en filtres amont et aval composés des matériaux répondant à des cratères granulométriques bien précis ;
4. Des tapis de drainage sont disposés l'intérieur de la recharge amont ;
5. Les recharges sont constituées de matériaux semi -perméable de granulométrie étalée, elle se divisent en plusieurs sous zones par la hauteur et pare la largeur ;
6. Une protection en rip-rap tapisse les parements amont et aval.



Fig. 3.5 — Digue en terre du barrage de Sidi Yacoub, (ANBT,2019).

3.6.2 Evacuateur de Crue

Le déversoir avec une capacité de $1700\text{m}^3/\text{s}$ et de couronnement à la cote 264 m est situé sur la rive gauche de l'oued Il a une longueur de 93m.



Fig. 3.6 — Evacuateur de crue, (ANBT,2019).

L'évacuateur de crue comprend :

1. Un déversoir circulaire de 40m de diamètre ;
2. Un puit vertical qui atteint graduellement un diamètre de 10m ;
3. Un reniflard ;
4. Une galerie de 10m de diamètre et de 350m de longueur ;
5. Un coude ;
6. Un coursier de 89 m de longueur ;
7. Une cuillère de type « saut de ski » munie de dents de dissipation.

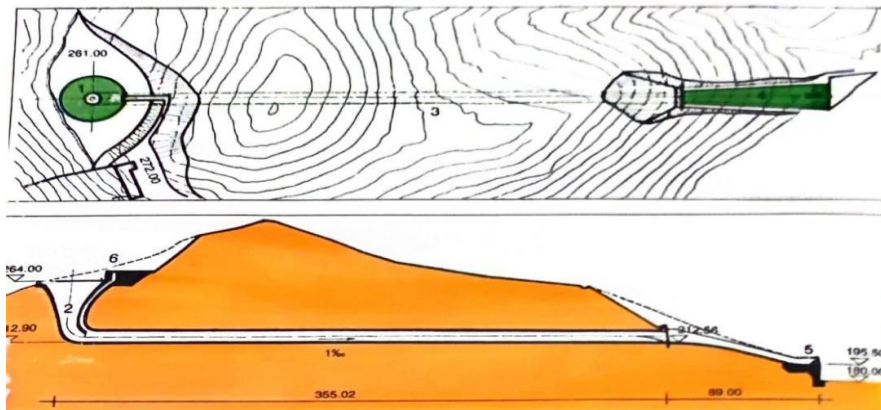


Fig. 3.7 — Vue en plan + coupe en évacuateur de crue, (ANBT,2004).

3.6.3 Tour de prise et vidange de Fond

3.6.3.1 Galerie d'accès inclinée

Une galerie, épousant la pente naturelle du terrain, est étroitement intégrée à la tour de prise, formant un ensemble compact. Elle permet l'accès aux pertuis et à la chambre des servomoteurs des vannes de vidange de fond, situés à la cote 193 mètres. Cette galerie comprend également un escalier, un chemin de roulement destiné au chariot de transport des équipements, ainsi qu'un espace prévu pour l'installation future d'un ascenseur.

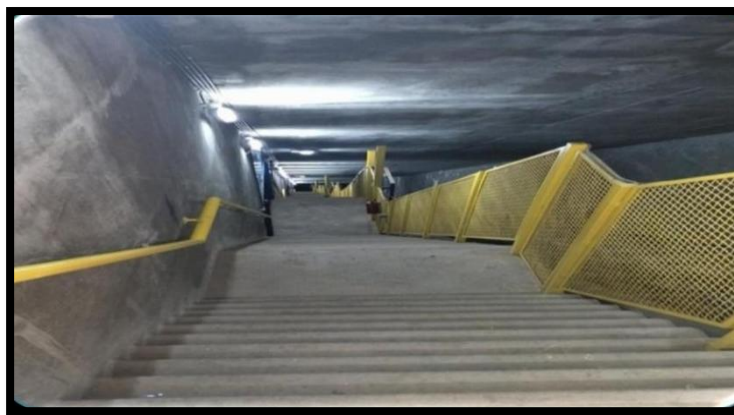


Fig. 3.8 — Galerie d'accès inclinée du Barrage de Sidi-Yacoub, (ANBT,2004).

Elle intègre en outre une gaine de ventilation et un chemin de câbles. À son entrée, située à la cote 270 mètres, se trouve un bâtiment du personnel d'une superficie totale de 300 m². Ce bâtiment comprend plusieurs espaces fonctionnels, à savoir :

- Une salle de contrôle et de commande,
- Un atelier,
- Une salle pour le générateur électrique de secours,
- La machinerie de l'ascenseur et l'accès à la galerie,
- Une salle d'observation des installations,
- Une salle de repos,
- Des sanitaires.

3.6.3.2 Tours de prise ($Q = 18$ à $33 \text{ m}^3/\text{s}$)

La partie inférieure de la galerie abrite quatre prises d'eau étagées, équipées des vannes de garde, un puis unique de 03m de diamètre, les tuyaux d'aération ainsi qu'un puits d'accès avec un chariot ascenseur et un escalier.

La tour de prise d'eau est équipée d'une conduite de 3 mètres de diamètre et de 110 mètres de long, suivant la pente du terrain. Elle comporte quatre ouvertures situées aux altitudes de 210 m, 225 m, 240 m et 255 m, avec des vannes wagon de 2 m x 2 m pour permettre une prise sélective de l'eau.



Fig. 3.9 — Ouvrages des prises, (ANBT,2004).

La structure est fondée sur des couches géologiques inclinées à 30° . À sa base, elle devient un ouvrage vertical de 7 m x 7 m et de 13 m de haut, qui reçoit une réduction, un coude, puis une conduite d'acier menant à une vanne à jet creux, dirigeant l'eau vers l'aval. Cette partie sert aussi de fondation au puits situé à 210 m.

Le bâtiment de commande est implanté au sommet de la tour inclinée (cote 272m), la prise d'eau a une capacité maximale de $28 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.6.3.3 Vidange de fond

La vidange de fond comprend trois ouvrages :

1. Un ouvrage d'entrée abritant les vannes de garde pour le tuyau de 2,5 m de diamètre.
2. Une galerie de 8m de diamètre et de 444m de longueur, le tuyau de $\varnothing 1,5$ m de restitution et le tuyau $\varnothing 2,5$ m de vidange de fond sont situés dans cette galerie. Au cours de la construction du barrage elle a été utilisée comme dérivation provisoire dont la capacité maximale a été $700 \text{ m}^3/\text{s}$.

3. Un ouvrage de sortie, où sont placées les vannes de réglage. Une bifurcation se trouve à l'extrémité du tuyau \varnothing 1,5 m, destinées à divers usagers. La capacité maximale de la vidange de fons est de 110m³/s.

3.6.4 Galerie d'injection et travaux d'injection

3.6.4.1 Galerie d'injection

La galerie d'injection est située dans les fondations du barrage, à l'axe du noyau en argile. Démontions internes de la galerie sont 2x3,5 m, et sa longueur totale est de 480 m. Elle est construite en béton non armé de 80 à 100m d'épaisseur, représentant un volume total de 10150 m³ de béton.

3.6.4.2 Voile d'étanchéité

Le voile d'étanchéité est réalisé en partie en deux rangées et en partie en seule rangée, ces caractéristiques sont :

- Longueur totale de forage.....35800 m.
- Profondeur maximale.....90 m.
- Ciment.....1340 t.
- Bentonite.....50 t.

Pour l'injection dans les galeries

- Longueur totale de forage.....4550 m.
- Ciment.....555 t.

3.6.5 Equipement hydromécanique

3.6.5.1 Equipement de prise d'eau

- Deux vannes wagons de garde sur les deux prises d'eau inférieures et une vanne wagon de garde sur les deux prises d'eau supérieures. Dimensions des vannes : 2x2m.
- Une vanne de réglage à jet creux de 1,5 m de diamètre est placée à l'extrémité du tuyau de 1,5m de diamètre et de 466m de longueur.

3.6.5.2 Equipement de vidange de fond

Deux vannes wagons de garde mesurant 2m de large sur 2,5m de haut sont installées l'entrée. Le tuyau de 2,5m de diamètre et de 463m de longueur est muni à son extrémité d'une vanne segment mesurant 1,83m de large sur 2,4m de haut, servant au réglage des débits. Toutes les vannes sont manœuvrées depuis le bâtiment commande. L'équipement hydromécanique a une masse totale de 993t.

3.7 Caractéristiques topographiques

Il se caractérise généralement par l'imperméabilité de ses sous-sols sur l'ensemble de sa surface, ainsi que par sa séparation naturelle des zones avoisinantes par une ligne de partage des eaux. Ainsi, l'écoulement de l'eau y est principalement régi par la topographie. Le bassin versant est alors délimité par les lignes de crête et les lignes de plus forte pente, qui orientent naturellement le ruissellement vers les exutoires.



Fig. 3.10 — La topographie du barrage Sidi Yacoub ([Google Earth](#)).

3.8 Hydrologie

Le Bassin versant du barrage de Sidi Yacoub couvre une surface du bassin versant est de 920 km², Il se caractérise généralement par l'imperméabilité de ses sous-sols sur l'ensemble de sa surface, ainsi que par sa séparation naturelle des zones avoisinantes par une ligne de partage des eaux. Ainsi, l'écoulement de l'eau y est principalement régi par la topographie. Le bassin versant est alors délimité par les lignes de crête et les lignes de plus forte pente, qui orientent naturellement le ruissellement vers les exutoires.

L'oued Lardjem présente un apport moyen annuel de 31,34 Hm³, avec des extrêmes enregistrés entre 8 et 72 millions de m³ selon les années. La crue la plus importante a eu lieu le 23 février 1987. Depuis la mise en service du barrage, l'érosion du bassin versant entraîne une sédimentation importante, réduisant progressivement la capacité de retenue. L'érosion spécifique est estimée à 2349 tonnes/km²/an, avec une concentration de sédiments de 18 g/l.

3.8.1 Climat

Le climat de la zone d'étude est de type méditerranéen, caractérisé par un été long, chaud et sec, suivi d'un hiver froid et pluvieux. Les précipitations présentent une forte variabilité interannuelle, tant sur le plan quantitatif que dans leur répartition temporelle. En revanche, les régions thermiques de la zone restent relativement homogènes.

3.8.2 Pluviométrie

Le bassin versant du barrage de Sidi-Yacoub dispose de 7 postes pluviométriques, dont un est géré par l'ONM et les six autres sont gérés par l'ANRH : Sidi -Yacoub (ONM), Souk EL Haad, Bordj Bou Naâma, Loulou, Ouled Ben Abdelkader, Saâdia et Sidi -Yacoub BGE. Pour l'étude des précipitations, seules les données de la station météorologique située au barrage de Sidi-Yacoub seront utilisées ([ABH, 2019](#))

L'analyse des données pluviométriques mensuelles enregistrées sur 39 ans à la station météorologique du barrage de Sidi-Yacoub révèle une forte variabilité saisonnière. Le mois

d'avril est en moyenne le plus pluvieux, tandis que le mois d'août est systématiquement le moins arrosé.

Sur le plan saisonnier :

- L'hiver concentre la plus grande part des précipitations, avec 35,97 % du total annuel.
- L'été est la saison la plus sèche, avec seulement 2,9 % des précipitations.
- Les saisons intermédiaires (printemps et automne) présentent une variabilité plus marquée d'une année à l'autre.

3.8.3 Température

La température moyenne annuelle pour la période de 1985 à 2014 est de 20,38°C. La saison chaude s'étend de mai à octobre, avec des températures mensuelles supérieures à la moyenne annuelle, tandis que la saison froide correspond à la période de novembre à avril.

3.8.4 Humidité

À la station météorologique de Sidi-Yacoub, sur la période 1985–2009, les valeurs mensuelles moyennes d'humidité relative varient :

- D'un maximum de 66,43 % en décembre (hiver),
- À un minimum de 38,41 % en août (été).

La moyenne annuelle sur l'ensemble de la période est estimée à 53,87 %.

3.8.5 Le vent

Dans la région étudiée, les vents dominants présentent une vitesse relativement stable tout au long de l'année, variant entre 2,56 m/s et 3,23 m/s.

3.8.6 Evaporation

Le taux d'évaporation à un endroit donné est affecté par plusieurs facteurs tels que la température de l'air, la vitesse du vent, l'insolation et la saturation du sol.

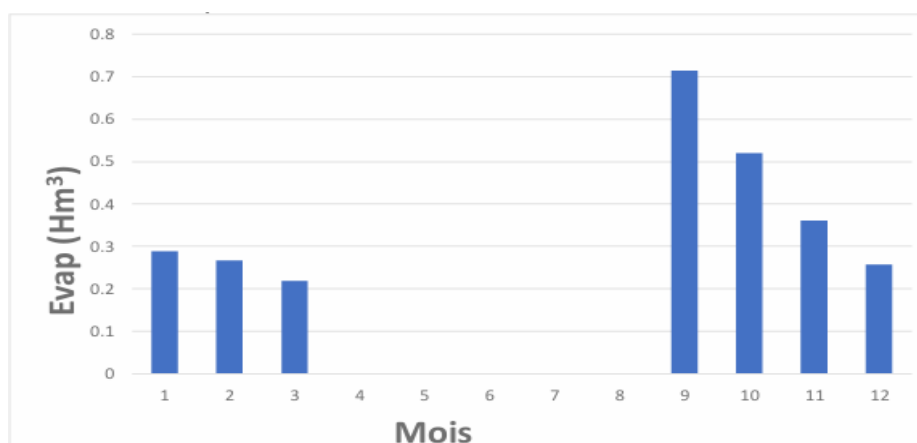


Fig. 3.11 — Evaporation annuelles de la station Sidi -Yacoub (2023/2024).

3.9 Géologie

Les roches du bassin versant sont majoritairement d'origine sédimentaire, avec des âges s'échelonnant entre le Trias et le Miocène. Les dépôts quaternaires, quant à eux, se trouvent principalement le long des oueds et dans les plaines alluviales, où ils présentent généralement une composition caillouteuse. Les alluvions récentes sont décrites comme étant limoneuses.

La répartition des formations géologiques identifiées est la suivante :

- Calcaires marneux : 44 %
- Formations marnocalcaires : 17 %
- Marnes : 16 %
- Grès calcaires ou marneux : 9 %
- Flyschs et molasses : 8 %
- Formations marno-gréseuses : 3 %
- Évaporites : 2 %
- Calcaires massifs : < 1 %
- Et des dépôts meubles à texture moyenne complètent l'ensemble.

3.10 Evolution de l'envasement du barrage de Sidi Yacoub

3.10.1 Définition du levé

L'Agence Nationale des Barrages (ANB) a mandaté un consortium d'études espagnol (*LIC : Levantina, Ingenieria y Construcccion*) pour réaliser des levés bathymétriques et topographiques sur 55 barrages algériens, dont celui de Sidi Yacoub (wilaya de Chlef), afin de mettre à jour la capacité de stockage et de suivre l'envasement.

Pour le barrage de Sidi Yacoub :

- Superficie à la cote normale (264,00 m) : 885,47 ha
- Superficie à la cote PHE (267,50 m) : 939,52 ha
- Capacité à la cote normale : 224,41 Hm³
- Capacité à la cote PHE : 256,00 Hm³

L'étude comprend également la délimitation des retenues aux plus hautes eaux exceptionnelles (PHE) et le calcul des volumes de stockage aux différentes cotes.

L'objectif de cette opération était de réaliser :

- Levés bathymétriques et topographiques de la cuvette du barrage en exploitation en vue de d'actualiser les capacités de stockage des retenues et de surveiller l'envasement ;
- Délimitation de la retenue du barrage par la réalisation de balises à la cote des plus hautes eaux.

Le levé complet de la retenue représente une surface totale de 939.52 ha (56.84 ha émergée et 882.68 ha immergée) (Fig.3.12).

Ce levé topographique, représentant une surface totale de 939.52 ha (56.84 ha émergée et 882.68 ha immergée), a été réalisé en 25 jours.

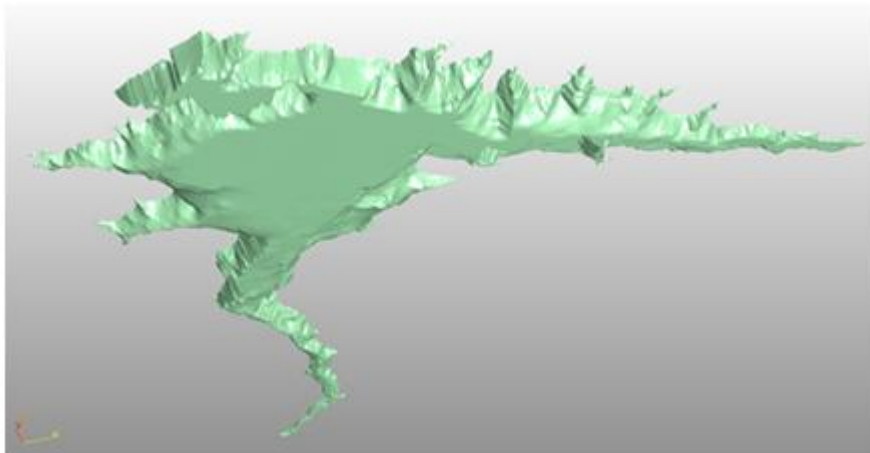


Fig. 3.12 — Levé topographique (ANBT,2019).

Selon la nature du terrain, deux techniques de levé complémentaires sont utilisées :

- Les profils réguliers, efficaces en zones peu accidentées,
- Relevé des éléments caractéristiques (thalwegs, crêtes, escarpements...) dans les zones plus complexes

3.10.2 Objectif du levé

Le levé bathymétrique vise à déterminer les coordonnées en 3D des points situés au fond des zones immergées, en se basant sur le système géodésique WGS84, à l'aide d'un GPS RTK (haute précision) et d'un échosondeur.

Ce système, piloté par le logiciel QUINSY, combine :

- Les coordonnées GPS de surface (plan d'eau)
- Les profondeurs mesurées par le transducteur de l'échosondeur

3.10.3 Matériels utilisés

L'équipement comprend :

- Une antenne GPS sur un point fixe (station de référence)
- Un récepteur mobile embarqué fonctionnant en temps réel (RTK)
- Une liaison radio UHF entre la station de référence et l'embarcation
- Un support vertical fixe sur le bateau, maintenant l'antenne GPS et le transducteur à une hauteur constante

Grâce à cette configuration, les mesures bathymétriques sont précises, stables et automatiquement référencées aux coordonnées géodésiques.

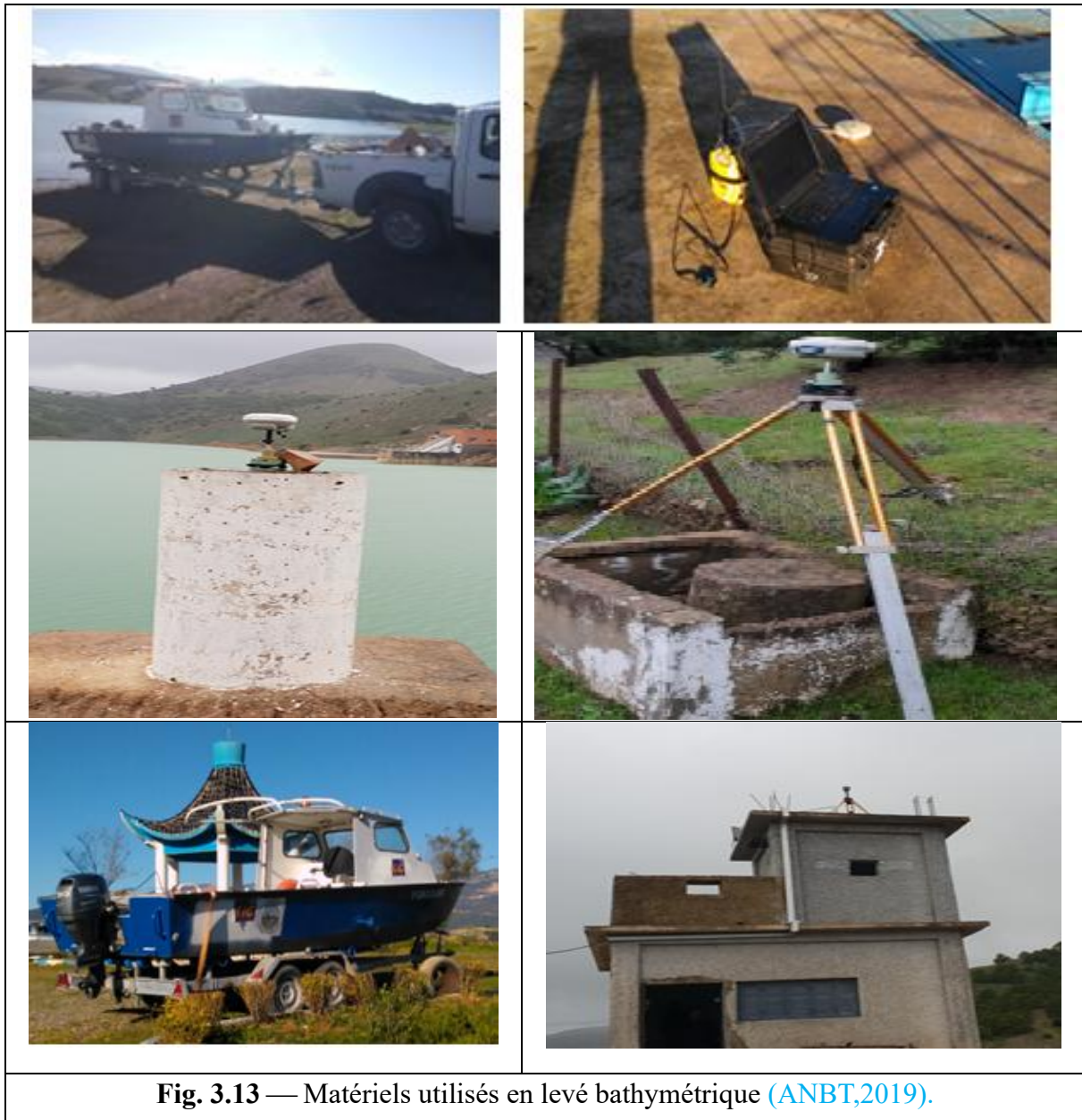


Fig. 3.13 — Matériels utilisés en levé bathymétrique (ANBT,2019).

3.10.4 Levé bathymétrique en 2019

Le levé bathymétrique réalisé en 2019 au niveau du barrage de Sidi-Yacoub a permis de mettre à jour les caractéristiques actuelles du réservoir :

- À la cote normale de retenue (264,00 m), la surface de la retenue a été estimée à 885,5 hectares, avec un volume stocké de 224,064 hm³.
- À la cote maximale (267,50 m), la surface atteint 932,52 hectares, pour un volume de 256,00 hm³.

Ces résultats témoignent d'une perte de capacité de stockage par rapport aux valeurs initiales, conséquence directe de l'envasement progressif du réservoir. Ce constat renforce la nécessité de valoriser les vases accumulées, dans une démarche de gestion durable des ressources en eau.

Partie Théorique

Chapitre 3 Présentation du barrage de Sidi Yacoub

Tableau 3.2— Comparaison des levés bathymétriques (2004 vs 2019).

Paramètre	Levé 2004	Levé 2019	Variation / Observation
Cote RN (niveau normal)	264,00 m	264,00 m	Aucune variation
Surface à la cote RN	879,18 ha	885,5 ha	6,32 ha (légère augmentation)
Volume à la cote RN	252,85 Hm ³	224,064 Hm ³	28,786 Hm ³ (perte importante de capacité)
Cote PHE (niveau max)	267,50 m	267,50 m	Aucune variation
Surface à la cote PHE	931,80 ha	932,52 ha	0,72 ha (variation négligeable)
Volume à la cote PHE	284,01 Hm ³	256,00 Hm ³	28,01 Hm ³ (perte de volume max)

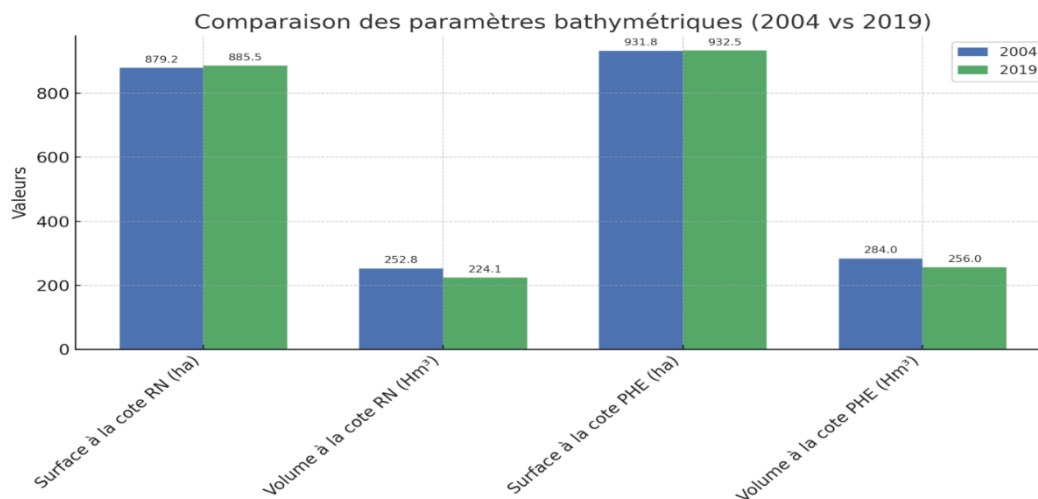


Fig. 3.14 — Comparaison entre les deux levés bathymétrique 2004 et 2019.

3.11 Conclusion

Le barrage de Sidi Yacoub est un ouvrage stratégique pour la gestion de l'eau dans la région de Chlef. Il est cependant confronté à une forte sédimentation due à l'érosion du bassin versant, ce qui réduit sa capacité de stockage. La variabilité climatique et la fragilité des sols aggravent cette situation. Une gestion durable du bassin, incluant la lutte contre l'érosion et la valorisation des sédiments, est essentielle pour préserver l'efficacité du barrage à long terme.

Partie
Expérimentale
Chapitre 4

MATÉRIAUX ET DES MÉTHODES UTILISÉES

4.1 Introduction

L'utilisation des vases de barrage dans divers domaines d'application requiert une analyse approfondie, fondée sur des caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques des échantillons prélevés in situ. Cette étape est essentielle pour évaluer les propriétés intrinsèques de la vase et déterminer ses possibilités de valorisation.

Un exemple illustratif de cette démarche est l'étude effectuée sur les sédiments de dragage du barrage de Sidi Yacoub, dans l'optique de leur valorisation en ingénierie routière. Cette recherche vise à caractériser les propriétés physiques de la vase, issue de la vidange de fond du barrage. Par ailleurs, afin de mieux comprendre l'effet de la chaux, du laitier granulé de haut fourneau (**GBFS**), ainsi que de leur combinaison, sur les sédiments du barrage de Sidi Yacoub, une série d'essais de laboratoire a été menée sur les échantillons avant et après traitement. Les résultats de ces essais sont présentés dans la suite de ce chapitre.

L'étude expérimentale de ce mémoire a été réalisée au sein des laboratoires suivants :

- Laboratoire de traitement des eaux d'Hydraulique de l'Université Hassiba Ben Bouali, Oulef Fares Chlef.
- Laboratoire LTPC (Laboratoire Central des Travaux Publics, Chlef),
- Laboratoire d'Hydraulique, de Génie Civil de l'Université Hassiba Benbouali (UHBC), Chlef.

4.2 Programme expérimental

Les sols argileux, notamment ceux présentant un indice de plasticité élevé, posent souvent des problèmes dans les travaux de construction en raison de la présence de minéraux argileux expansifs. Toutefois, leurs propriétés techniques peuvent être améliorées grâce à différentes méthodes de stabilisation.

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier l'effet de l'ajout du Laitier granulé de haut fourneau sur les propriétés géotechniques d'une vase d'un barrage traité à la chaux.

Plusieurs tests de laboratoire ont été réalisés tels que pH, limites d'Atterberg, compactage, Cisaillement à la boîte de Casagrande et la compression.

Plusieurs combinaisons du Laitier granulé de haut fourneau et de la chaux ont été utilisées pour la stabilisation du sol. Les teneurs du Laitier granulé de haut fourneau sont de 0, 10, 20 et 30% tandis que celles de la chaux sont de 0, 2, 4%. Le tableau 4.1 représente les combinaisons étudiées dans cette recherche.

Tableau — 4.1 Les combinaisons étudiées.

N°	Symbole	Vase (%)	Chaux (%)	Laitier (%)
01	C0L0	100	0	0
02	C2L0	98	2	0
03	C2L10	88	2	10
04	C2L20	78	2	20
05	C2L30	68	2	30
06	C4L0	96	4	0
07	C4L10	86	4	10
08	C4L20	76	4	20
09	C4L30	66	4	30

Légende :

C : Chaux (Lime) ———> Traitement
 L : Laitier (GBFS: Granulated Blast Furnace Slag) ———> Renforcement

4.3 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette étude sont : notre sol (vase du barrage Sidi Yacoub), la chaux hydratée et le Laitier de haut Fourneau (GBFS) voir Fig. 4.1.



Fig. 4.1— Présentation des matériaux utilisés : (a) Vase broyée, (b) Chaux hydratée et (c) Laitier broyé.

4.3.1 La vase du barrage de Sidi Yacoub

Le prélèvement d'échantillons a été réalisé à différents emplacements au niveau du barrage de Sidi Yacoub :

- Une première quantité a été prélevée au niveau de l'exutoire du barrage ;
- Une seconde quantité a été prélevée au niveau de la digue du barrage.

Les propriétés de base de la vase du barrage de Sidi Yacoub sont bien illustrées en tableau suivant :

Tableau 4.2 — Propriétés de base de la vase étudiée (Chemani, Lahmer, 2024).

Paramètres Geotechniques	Unité	Variation
Couleur		Grise
Teneur en eau	(%)	42 - 48.3
Poids spécifique des grains solides	(g/cm ³)	1.842 – 1.853
Granulométrie des grains	sable	(%) 4
	limon	(%) 61
	argile	(%) 35
Indice de classement	Etat normale	1.50
	Etat défloculé	3.25
Indice d'asymmetre	Etat normale	0.68
	Etat défloculé	0.41
Limite de liquidité (LL)	(%)	52.37
Limite de plasticité (PL)	(%)	19.18
Indice de plasticité (PI)	(%)	33.19
Valeur au bleu du Méthylène VP		2.7
pH		5.82 – 6.4
Activité (A _c)	(%)	0.22
Teneur en CaCO ₃ (%)	(%)	11.49 – 12.75
Conductivité	S/m	6.75 – 6.95
USCS Classification		CH

4.3.2 Chaux

La chaux examinée dans cette étude est une chaux hydratée (Ca(OH)₂) fabriquée par la société SARL-BSM, établie à Saïda, dans le Sud-Ouest de l'Algérie (Fig. 4.2).

Pour éviter la formation de grumeaux en cas d'humidité, la chaux a été tamisée à une granulométrie de 0,4 mm. Le tableau 4.3 répertorie les caractéristiques physiques et la composition chimique de cette chaux hydratée.

Tableau 4.3 — Caractéristiques physiques et chimiques de la chaux utilisée.

Paramètres géotechniques	Unités	Chaux
Couleur		Blanche
Densité spécifique	KN/m ³	2.24
Densité apparente	cm ² /g	7.20
La surface spécifique -Blaine-	(%)	11663
Finesse de des paticules à 45µm	(%)	64.87
Consistance normal- Vicat-(min)	<i>Initiale</i>	69.50
		80
Temps de prise - Vicat-(min)	<i>Final</i>	40
Oxyde de Calcium [CaO]	(%)	> 83.3
L'Oxyde de Magnésim	(%)	< 0.5
Oxyde de fer [Fe ₂ O ₃]	(%)	< 2
Alumine [Al ₂ O ₃]	(%)	< 1.5
Silice [SiO ₂]	(%)	< 2.5
Sulfite [SO ₃]	(%)	< 0.5
Oxyde de Sodium [Na ₂ O]	(%)	0.4 – 0.5
Dioxyde de carbone [CO ₂]	(%)	< 5
Calcite [CaCO ₃]	(%)	< 10



Fig. 4.2 — Préparation de la chaux. (a) Conditionnement de la chaux de Saïda, (b) Tamisage avec un tamis de 0,4mm.

4.3.3 Laitier (Granulated Blast Furnace Slag: GBFS)

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit issu de la fabrication de la fonte. Il résulte de la fusion des éléments non ferreux du minerai, des fondants et des cendres de coke. Sa composition chimique, principalement constituée de chaux (CaO), silice (SiO₂), alumine (Al₂O₃) et magnésie (MgO), est ajustée pour assurer une bonne fluidité à haute température et éliminer les impuretés nuisibles (Fig.4.3).



Fig. 4.3 — Laitier granulé de haut fourneau (Granulated Blast Furnace Slag : GBFS)

Selon le mode de refroidissement, le laitier peut se présenter sous deux formes :

- Laitier granulé (vitrifié), obtenu par trempe rapide,
- Laitier cristallisé, issu d'un refroidissement lent.

Le laitier granulé a une granulométrie de 0/5 mm, un module de finesse proche de 3, une masse volumique apparente de 900 à 1000 kg/m³, et une masse volumique absolue de 2800 à 3000 kg/m³. Sa composition minéralogique peut être déterminée à partir des teneurs en oxydes majeurs. Le tableau suivant résume les propriétés chimiques du GBFS.

Tableau 4.4 — Composition chimique du laitier (%).

Désignation	Teneur en %
CaO	40±2
Al ₂ O ₃	1±2
Fe ₂ O ₃	3.5±1.5
SiO ₂	38 à 43
MgO	3±2
Na ₂ O	0.4±0.2
K ₂ O	0.6±0.2
Cl	0.003 à 0.04
SO ₃	1.7 à 0.4
Humidité	20 ±2
TiO ₂	0.3±0.1
P ₂ O ₅	0.03±0.02
MnO	1±0.5

4.4 Propriétés étudiées

4.4.1 pH

Dans le cadre de cette étude, un pH-mètre a été utilisé afin de déterminer le caractère acide ou basique des matériaux du sol en suspension dans l'eau. L'eau utilisée lors des essais est une eau distillée. Deux procédures de mesure ont été appliquées pour évaluer la valeur du pH de la vase, à la fois avant et après traitement au sein du Laboratoire de traitement des eaux, UHBC Oulef Fares Chlef.

Concernant la vase ainsi que le mélange vase–Laitier, la méthode standard [ASTM D4972 \(2001\)](#) a été adoptée pour la détermination du pH. Le sol, préalablement séché à l'air, a été combiné à des pourcentages variables du Laitier (0, 10, 20 et 30 %, à l'état sec). Chaque mélange a été tamisé à travers un tamis N° 10 afin d'éliminer les particules supérieures à 2 mm.

Pour chaque échantillon, 10 g de matériau séché ont été pesés et placés dans un récipient en verre, puis 10 ml d'eau distillée y ont été ajoutés. Les suspensions ont été laissées au repos pendant une heure avant la mesure du pH (voir Fig. 4.4).

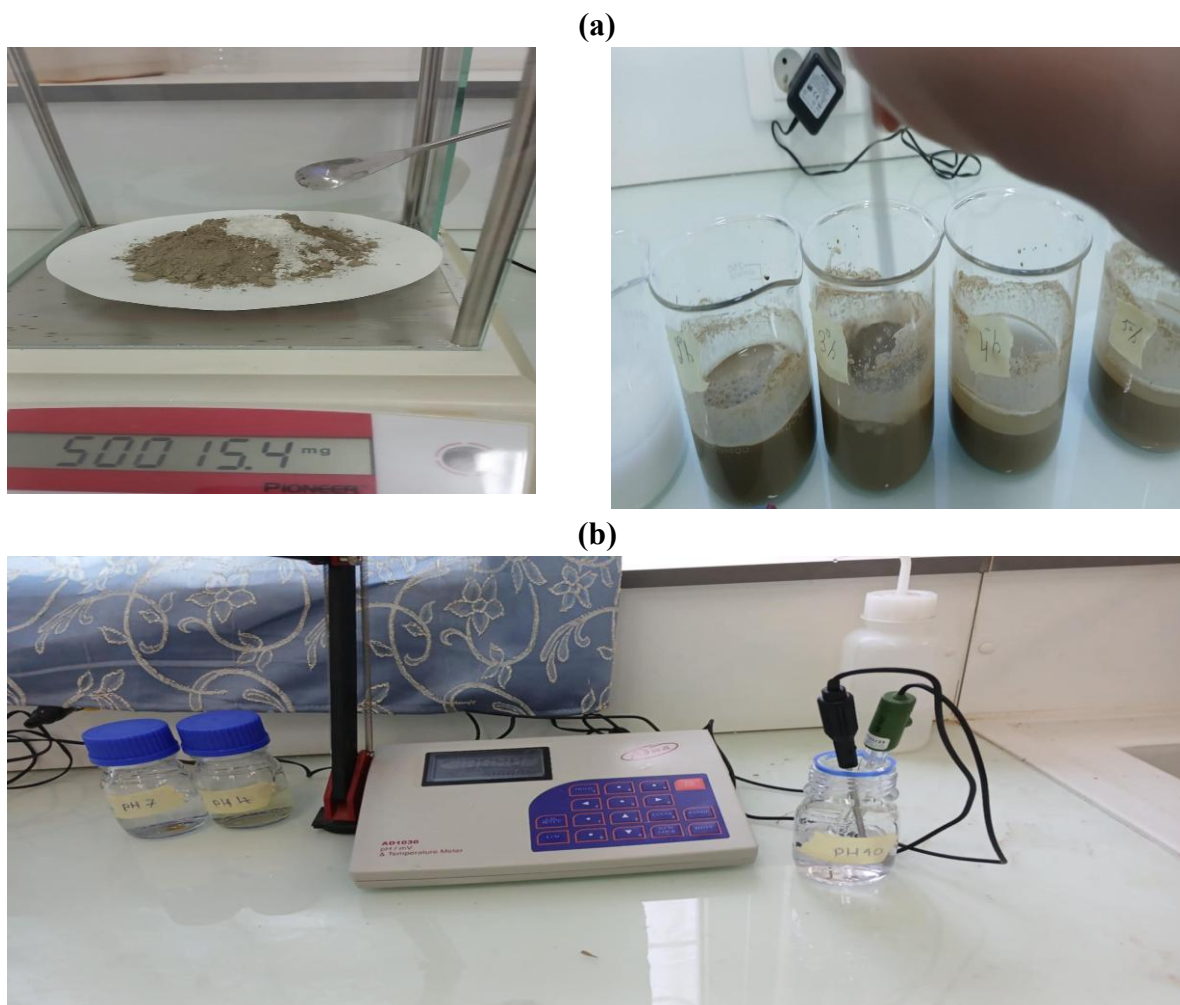


Fig. 4.4 — Tests de détermination du pH. (a) Préparation des échantillons, (b) pH-mètre utilisé.

Pour évaluer la variation du pH et déterminer la teneur minimale en chaux nécessaire à la stabilisation du sol et du mélange sol–Laitier granulé de haut Fourneau (GBFS), la méthode [ASTM D6276 \(1999\)](#) a été appliquée. Cette méthode consiste à identifier la proportion de chaux permettant d’atteindre un pH d’au moins 12,4, seuil requis pour déclencher les réactions chimiques immédiates sol–chaux ainsi que les réactions pouzzolaniques à long terme ([Eades & Grim, 1966](#)).

Les mélanges secs (sol ou sol-GBFS) ont été tamisés à 425 μm (tamis N°40). Étant donné que les mélanges sol-chaux-eau sont alcalins et peuvent réagir avec le verre ou le métal, les essais ont été réalisés dans des récipients en plastique.

Des dosages de 0 %, 2 % et 4 % de chaux ont été ajoutés à 25 g de sol (Vase ou Vase-L), avec 100 ml d’eau. Parallèlement, une solution saturée de chaux a été préparée en mélangeant 2 g de chaux avec 100 ml d’eau, afin de mesurer le pH de référence.

Les valeurs de pH ont été relevées toutes les 10 minutes, après 30 secondes d’agitation, pendant une heure. Les mesures ont été effectuées à une température contrôlée de 25 ± 1 °C, avec un pH-mètre de précision 0,01 unité, utilisant une électrode de verre et de référence, selon la concentration en ions H_3O^+ .

4.4.2 Limites d’Atterberg

4.4.2.1 Définition

Les limites d’Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles permettant de déterminer les seuils de consistance d’un sol fin en fonction de sa teneur en eau. Elles définissent les transitions entre différents états du sol (Fig.4.5) :

- Le passage de l’état liquide à l’état plastique, défini par la limite de liquidité (W_L).
- Le passage de l’état plastique à l’état solide, défini par la limite de plasticité (W_P).

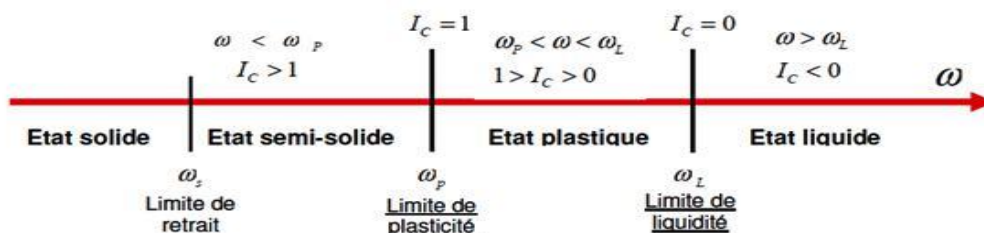


Fig. 4.5 — Limites d’Atterberg.

Ces limites déterminées selon les essais limites d’Atterberg ([ASTM D 4318-17](#)), sont exprimées en pourcentage de la teneur en eau par rapport à la masse du sol sec. Elles sont essentielles pour caractériser le comportement des sols fins, notamment leur plasticité et leur sensibilité à l’eau.

4.4.2.2 Mode opératoire

La limite de liquidité W_L (%) est déterminée par l'essai à la coupelle de Casagrande (Fig. 4.6). Elle correspond à la teneur en eau pour laquelle la rainure tracée dans l'échantillon se referme sur 1 cm après un nombre standard de coups (généralement 25), la valeur est calculée à partir de la relation :

$$W_L = W \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} \dots\dots\dots (4.1)$$

Avec :

- W_L : limite de liquidité (%)
- W : teneur en eau de l'échantillon lors de l'essai ;
- N : nombre de coups nécessaires pour fermer la rainure sur 1 cm



Fig. 4.6 — Dispositif utilisé dans le test limite d'Atterberg selon [ASTM D 4318-17](#).

Dans cette étude, la vase, préalablement séché à l'air libre, a été broyé puis tamisé à 425 μm . Les mélanges préparés ont été humidifiés avec de l'eau distillée, de manière à obtenir un nombre de chocs compris entre 15 et 35, correspondant à la fermeture de la rainure sur 10 mm dans la coupelle de l'appareil. Après préparation, les pâtes ont été conservées à l'abri de l'évaporation dans des récipients (Fig. 4.7). Des cures de 1 et 28 jours ont été appliquées avant les essais. Seuls les échantillons répondant au critère de chocs acceptables (15–35) ont été retenus. Pour l'évaluation de la teneur en eau, environ 5 g de pâte ont été prélevés.

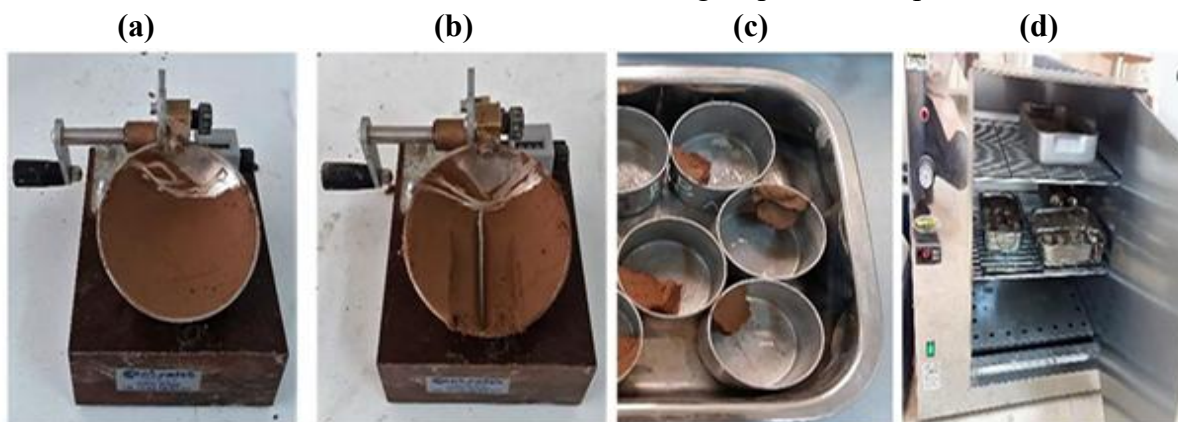


Fig. 4.7 — Détermination de la limite de liquidité du sol avant et après traitement. **(a)** étalement de la pâte et remplissage de la coupelle, **(b)** pratiqué la rainure et créer une serré de chocs jusqu'à la fermeture des lèvres à 10 mm, **(c)** prélèvement d'échantillon, **(d)** séchage à l'étuve 105°.

La limite de plasticité (LP) est définie comme la moyenne des trois teneurs en eau pour lesquelles un rouleau de sol commence à se fissurer lorsqu'il atteint un diamètre de 3,2 mm (Fig. 4.8). Cette valeur est exprimée en pourcentage et arrondie à l'entier le plus proche. Elle est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$W_p = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \dots\dots\dots (4.2)$$

Avec :

- **W_P** : limite de plasticité (%)
- **M₁** : masse de l'échantillon humide (g)
- **M₀** : masse de l'échantillon sec (g)

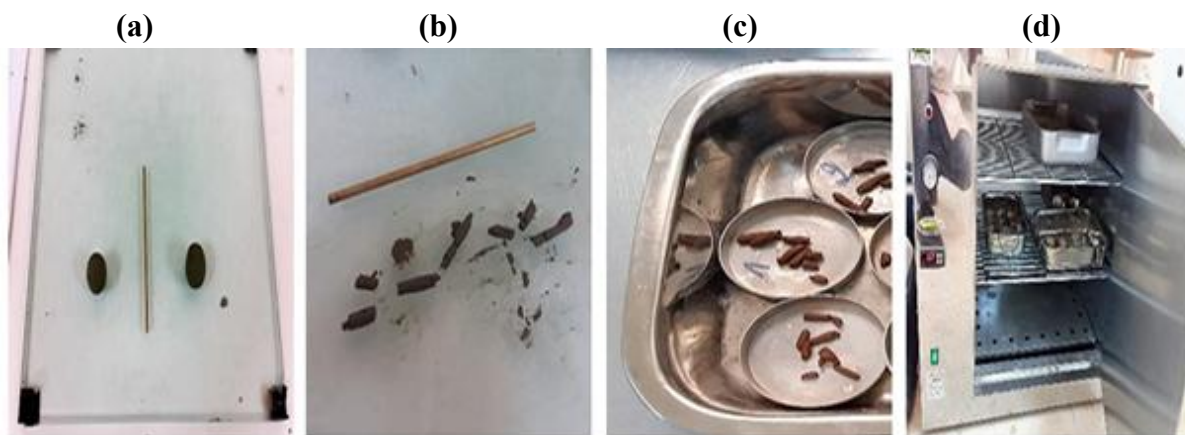


Fig. 4.8 — Détermination de la limite de plasticité. (a) formation d'une boulette de pâte et la rouler à la main pour former un rouleau, (b) amincissement du rouleau jusqu'à ce qu'il se fissure à 3 mm de diamètre, (c) prélèvement d'échantillon, (d) séchage à l'étuve 105°.

Selon Atterberg (1911), l'indice de plasticité (I_p) correspond à l'intervalle de teneurs en eau dans lequel le sol présente un comportement plastique. Il est calculé comme la différence entre la limite de liquidité (L_L) et la limite de plasticité (L_P).

$$I_p = W_L - W_P \dots\dots\dots (4.3)$$

4.4.3 Compactage

Le test de compactage Proctor standard conforme à la norme [ASTM D698](#) a été utilisé pour déterminer les paramètres de compactage tels que la teneur en eau optimale (OMC : Optimum Moisture Content) et la densité sèche maximale (MDD : Maximum Dry Density) pour les différentes combinaisons étudiées. Tous les matériaux utilisés dans cette étude présentent un diamètre inférieur à 4,75 mm (Cette méthode consiste à compacter le sol en trois couches, chacune recevant 25 coups de pilon (Fig. 4.9). Le compactage est réalisé à l'aide d'un moule normalisé de 953 cm³, d'un pilon de 2,5 kg, 50,8 mm de diamètre, tombant d'une hauteur de 310mm. Pour tracer la courbe de compactage de chaque combinaison, au moins quatre essais ont été effectués, chacun avec une teneur en eau différente, en augmentant cette dernière par paliers de 2 %.

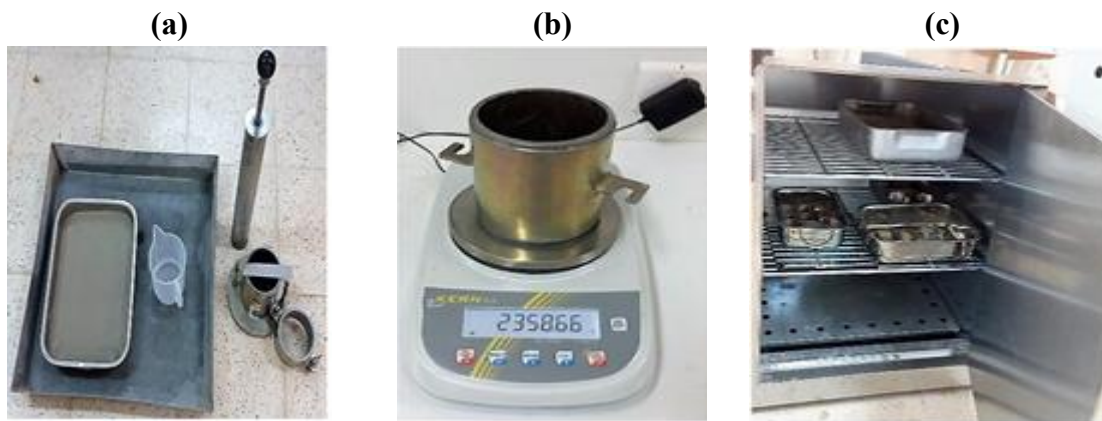


Fig. 4.9 — Essais de compactage Proctor normal. (a) l'équipement utilisé, (b) pesage de la masse d'échantillon, (d) étuve.

4.4.4 Essai de cisaillement à la boîte de Casagrande

L'essai de cisaillement direct est réalisé à l'aide d'un dispositif composé de deux demi-boîtes entre lesquelles est placée une éprouvette de sol (Fig. 4.10). Des plaques drainantes sont disposées à la base et au sommet de l'échantillon pour faciliter l'écoulement de l'eau. L'ensemble est installé dans un porte-boîte (non représenté sur le schéma).

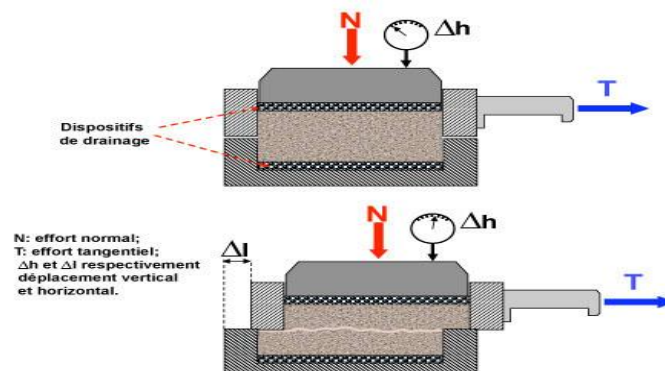


Fig. 4.10 — Principe de l'essai de cisaillement direct

Le principe de l'essai consiste à appliquer :

- Une force verticale (N) sur l'éprouvette afin de générer une contrainte normale sur un plan horizontal (Fig. 4.11) ;
- Puis, un effort horizontal sur la demi-boîte supérieure, entraînant un glissement relatif entre les deux demi-boîtes.

Les déplacements verticaux (Δh) et horizontaux (Δl) sont mesurés au cours du test. Ces données permettent de calculer :

- La contrainte normale (σ_n) ;
- La contrainte de cisaillement (τ) ;
- La déformation verticale ($\varepsilon_h = \Delta h/h$) ;
- La déformation horizontale ($\varepsilon_l = \Delta l/l$).

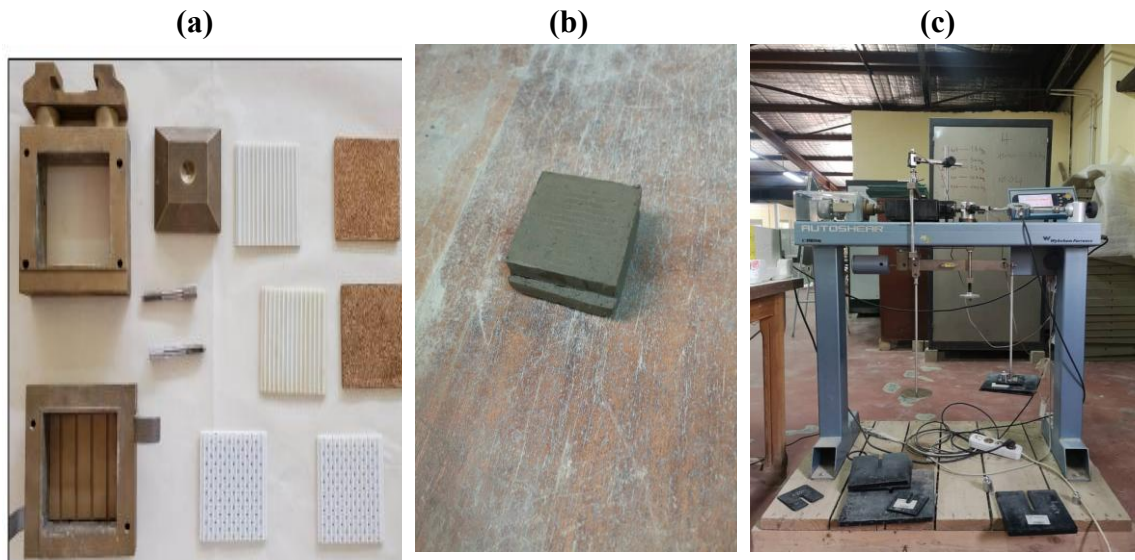


Fig. 4.11 — Essais de cisaillement non consolidés non drainés. (a) moule de préparation d'échantillon, (b) échantillon cisailé, (c) appareil de Casagrande.

Cet essai permet de :

- Caractériser le comportement mécanique du sol soumis à un cisaillement contrôlé ;
- Tracer la courbe contrainte/déformation (Fig 4.12) ;
- Dresser la courbe intrinsèque (Fig 4.13) ;
- Déduire les valeurs de l'angle de frottement et la cohésion

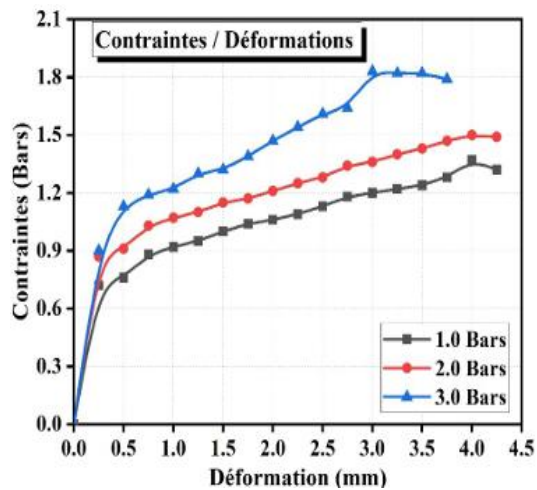


Fig. 4.12 — Courbe contraintes déformations

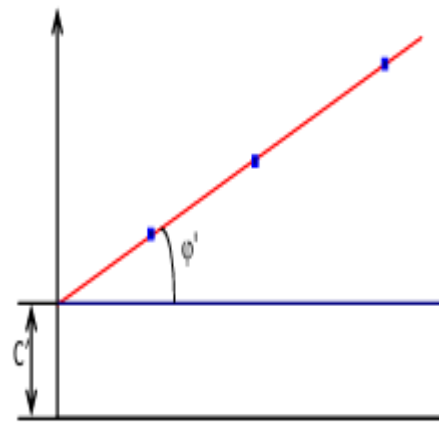


Fig. 4.13 — Courbe intrinsèque

4.4.5 Essai de compression

Des essais de compression ont été menés conformément à la norme ASTM D2850-03 pour évaluer la résistance au cisaillement et le comportement contrainte-déformation de cylindres de sol standard de 35 mm de diamètre et 70 mm de hauteur (Fig. 4.14).

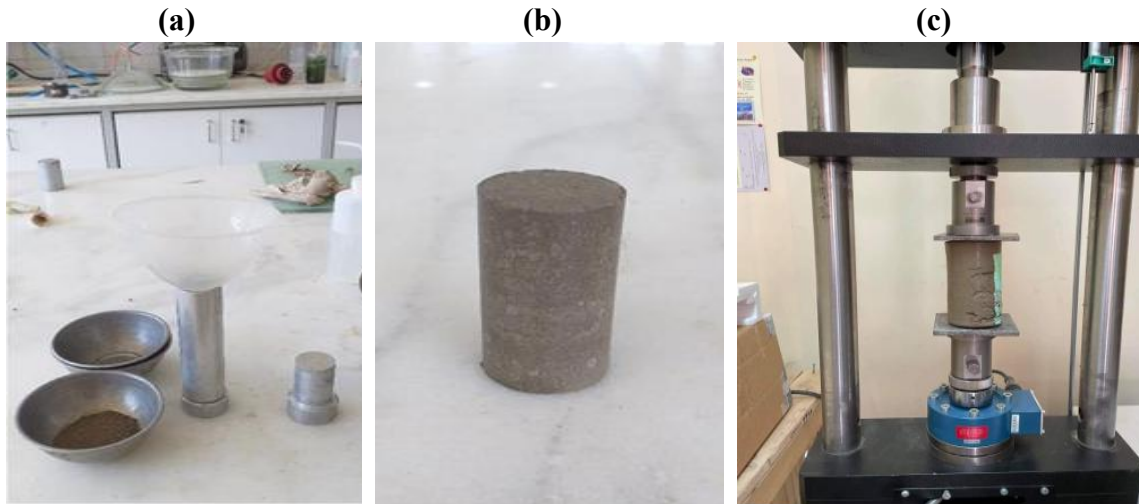


Fig. 4.14 — Essais de cisaillement non consolidés non drainés. (a) moule de préparation d'échantillon, (b) échantillon 35mm × 70mm, (c) appareil de compression.

Les échantillons traités et non traités ont été préparés selon les paramètres de compactage optimaux (OMC et MDD) issus des essais Proctor. Pour préserver l'humidité, ils ont été enveloppés dans un film plastique après démoulage, puis laissés en cure pendant 1, 7 et 28 jours. Après la période de durcissement, les éprouvettes ont été soumises à des essais sous trois niveaux de pression de confinement : 50, 100 et 200 kPa, afin d'étudier leur réponse mécanique sous contrainte. (Fig 4.15- 16)

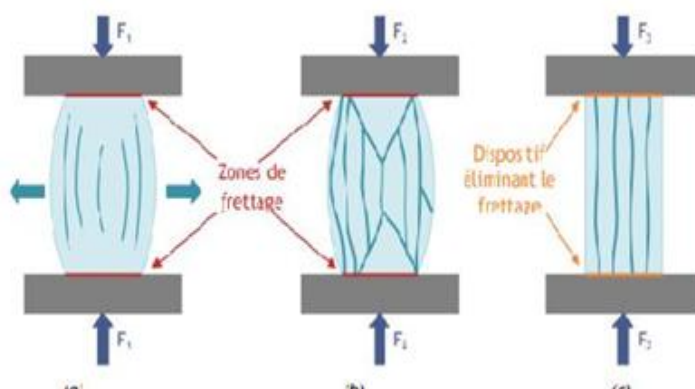


Fig. 4.15 — Allure du faciès de rupture des éprouvettes cylindriques



Fig. 4.16 — Fissures des surfaces latérales des éprouvettes après essais de compression

Les modes de défaillance des combinaisons étudiées ont été comparés à la classification des modes de défaillance proposée par [Hatibu et Hettiaratchi \(1993\)](#) comme le montre la (Fig. 4.17-18).

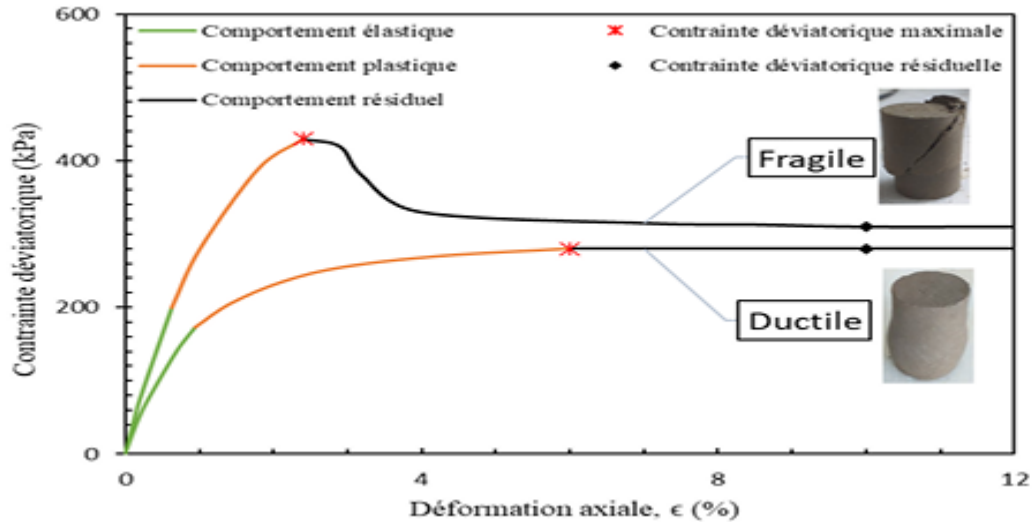


Fig. 4.17 — Étapes de rupture des sols.

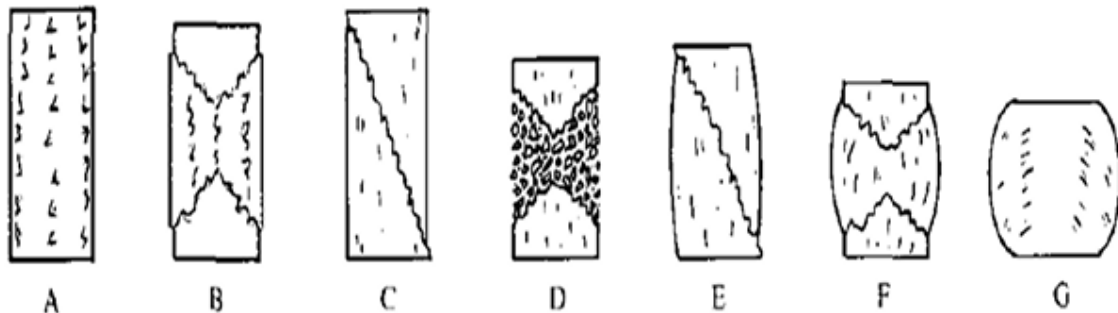


Fig. 4.18 — Classification des modes de défaillance des éprouvettes chargées dans un appareil de compression triaxiale. (A) Colonne fragile ; (B) Plaque fragile ; (C) Défaillance fragile ; (D) Défaillance cataclastique ; (E) Faille de cisaillement ; (F) Défaillance ductile ; (G) Écoulement ductile. ([Hatibu et Hettiaratchi 1993](#))

4.5 Conclusion

Les matériaux retenus dans le cadre de ce travail de thèse ont d'abord été identifiés et caractérisés afin de déterminer leurs propriétés physiques, mécaniques et chimiques. Ces données permettent de commenter, interpréter et comparer les résultats issus du programme expérimental. Les échantillons ont été préparés conformément aux normes ASTM, en fonction de la nature des essais à réaliser.

Les résultats des différents essais : pH, limites d'Atterberg, compactage, cisaillement direct (boîte de Casagrande) et compression seront présentés, analysés et discutés dans le chapitre suivant.

Partie
Expérimentale
Chapitre 5

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

5.1 Introduction

Les caractéristiques physiques essentielles influençant le comportement des sols comprennent la nature et la proportion des minéraux, la densité, la masse volumique, la teneur en eau, la granulométrie et le taux d'argilosité. Ce chapitre est consacré à l'analyse, la comparaison et l'interprétation des effets de la chaux, du Laitier granulé de haut Fourneau (GBFS), ainsi que de leur combinaison, sur plusieurs paramètres du sol. Il s'agit notamment de l'évolution du pH, des limites d'Atterberg, des paramètres de compactage, du cisaillement et de la compression, en tenant compte de la durée de cure.

5.2 Variation du pH

La valeur du pH reflète le degré d'acidité ou d'alcalinité d'un sol. Avant de procéder à la détermination du pourcentage optimal d'ajout de chaux, un étalonnage préalable du pH-mètre a été effectué au pH 4 et 7 (Fig. 5.1). Plusieurs mélanges ont été stabilisés à la chaux, avec des dosages variant de 2 %, 3 %, 4 % à 5 % (Fig.5.2)



Fig. 5.1— Callibrage du pH-mètre.



Fig. 5.2 — Mélanges préparer pour fixation du % d'ajout de la chaux.

Le sol argileux étudié présente une forte réactivité à la chaux. Comme l'illustre la Fig. 5.3, l'ajout entre 2 et 4 % de chaux entraîne une élévation marquée du pH, atteignant 13,15 pour le sol stabilisé 4% de chaux et 12,75. Cette augmentation notable résulte des réactions immédiates entre la chaux et l'argile, où la libération d'ions OH^- crée un milieu fortement alcalin, favorisant la dissolution progressive de la silice et de l'alumine des particules argileuses.

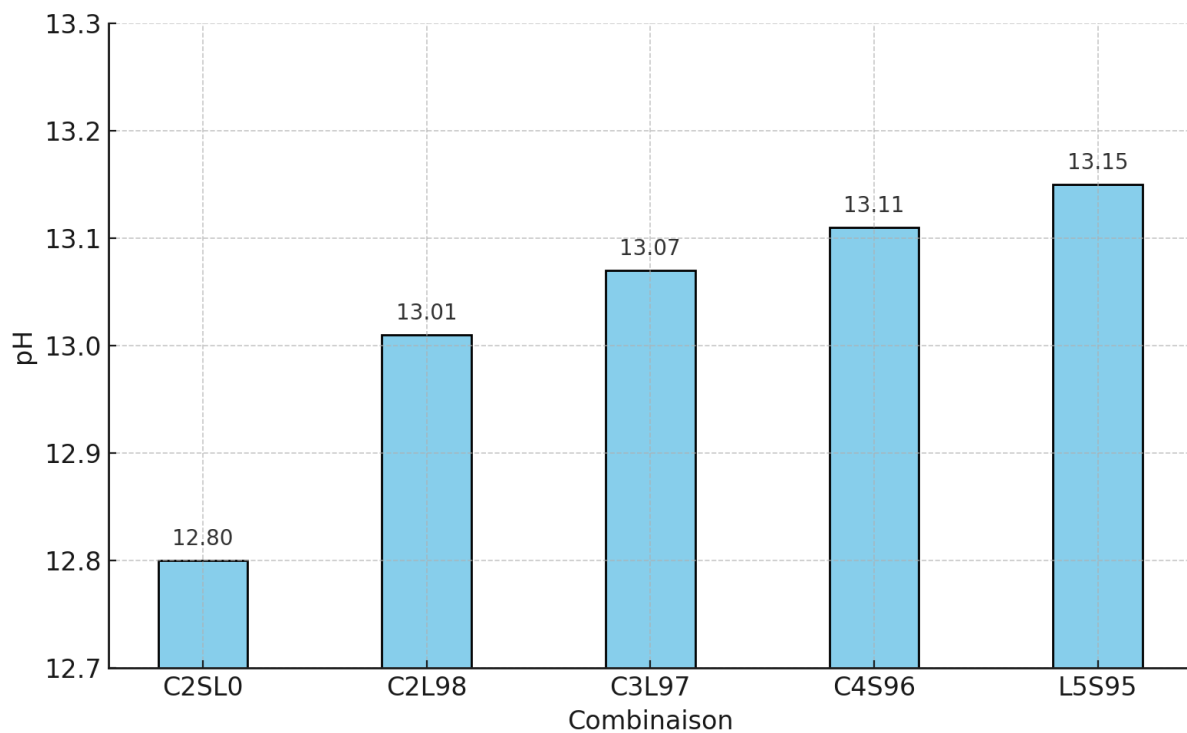


Fig. 5.3 — Influence des stabilisants sur la variation du pH.

5.3 Limites d'Atterberg

Les figures 5.4 à 5.21 montrent l'effet de la stabilisation à la chaux sur la variation des limites d'Atterberg de la vase du barrage de Sidi Yacoub. On peut observer que l'ajout de chaux augmente à la fois la limite de liquidité (LL) et la limite de plasticité (LP). Mais le taux d'augmentation de LL est inférieur à celui de LP, ce qui entraîne une diminution de l'indice de plasticité (IP).

5.3.1 Echantillon C0L0

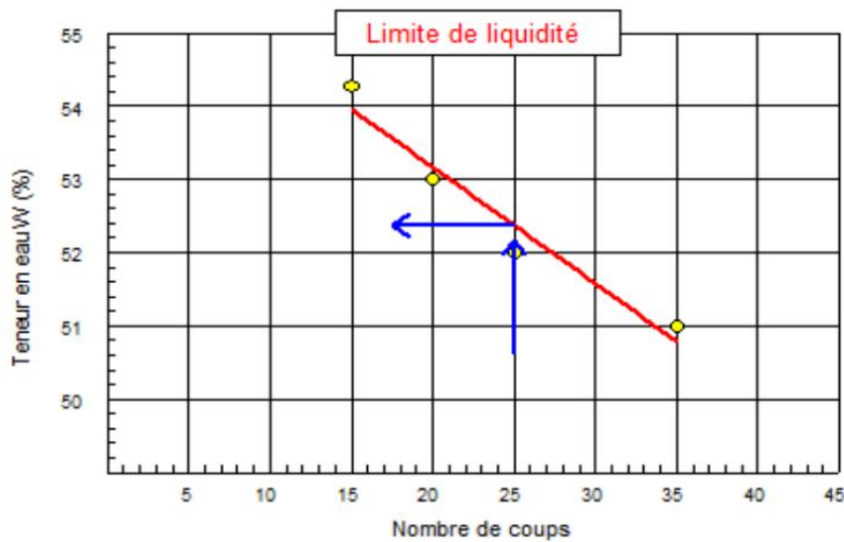


Fig. 5.4 — Limite de liquidité d'échantillon 1 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.

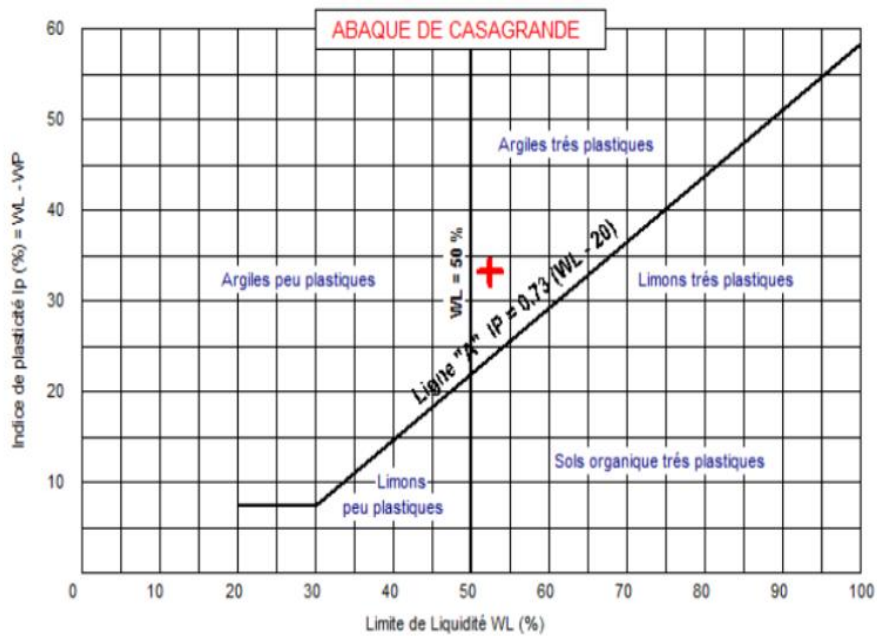


Fig. 5.5 — Classification de la vase du barrage de Sidi Yacoub d'après l'abaque de Casagrande.

Commentaire :

D'après la figure ci-dessus, on remarque que la limite de liquidité de notre échantillon est de 52.37%, celle de plasticité est de 19.18% ainsi que notre indice de plasticité I_p est de 33.19%.

5.3.2 Echantillon C2L0

Composition : 98% de la vase du barrage de Sidi Yacoub et 2% de la chaux.

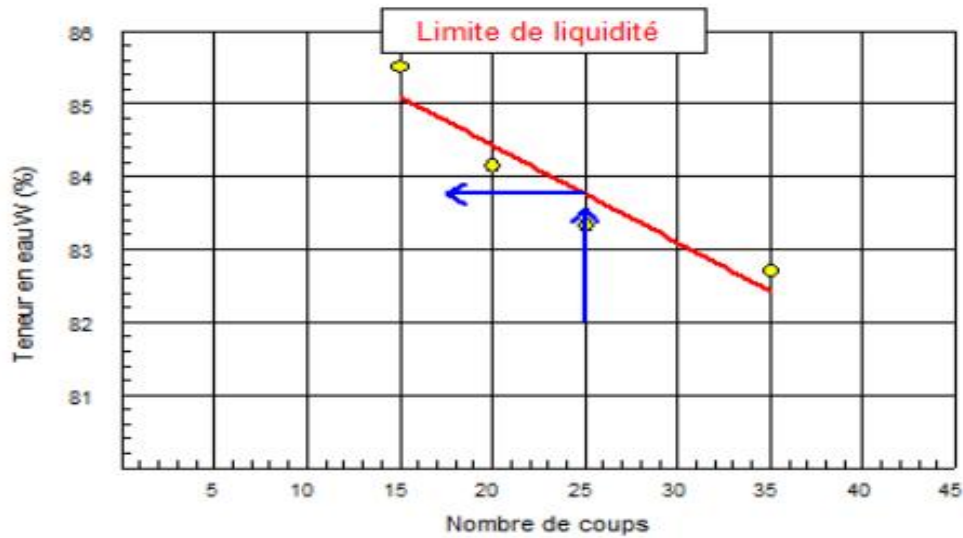


Fig. 5.6 — Limite de liquidité d'échantillon C2L0 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.

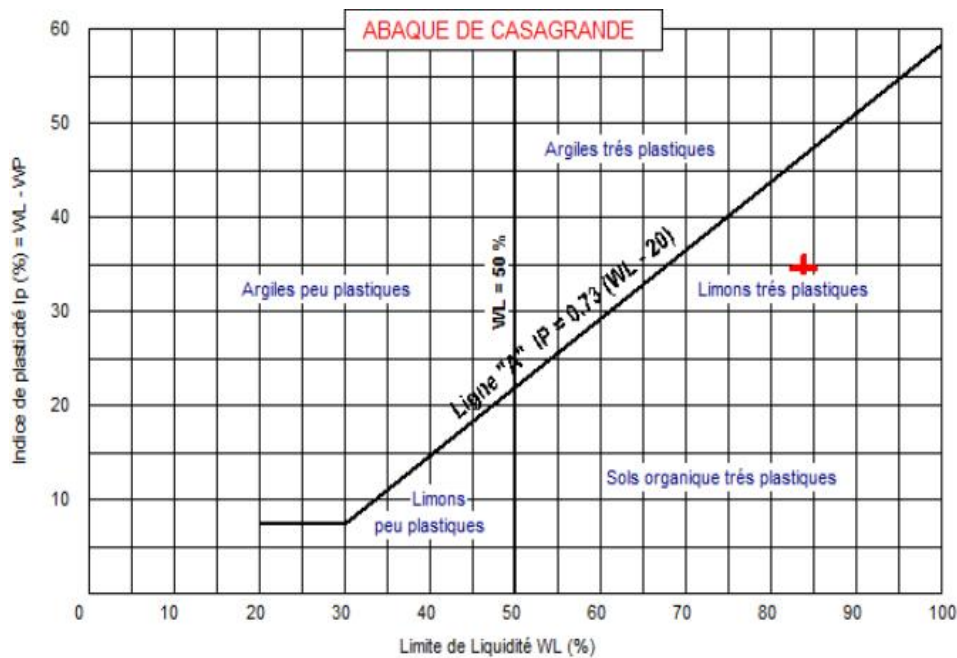


Fig. 5.7 — Classification de l'échantillon C2L0 d'après l'abaque de Casagrande.

Commentaire :

D'après la figure ci-dessus, on remarque que la limite de liquidité de notre échantillon est de 83.76%, celle de plasticité est de 49.23% ainsi que notre indice de plasticité I_p est de 34.53%.

5.3.3 Echantillon C2L10

Composition : 88% de la vase du barrage de Sidi Yacoub et 2% de la chaux et 10% de Laitier.

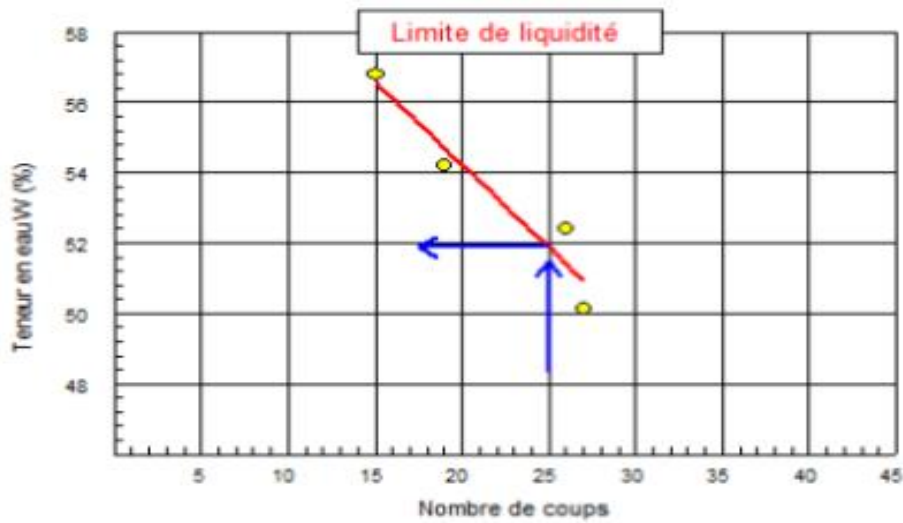


Fig. 5.8 — Limite de liquidité d'échantillon C2L10 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.

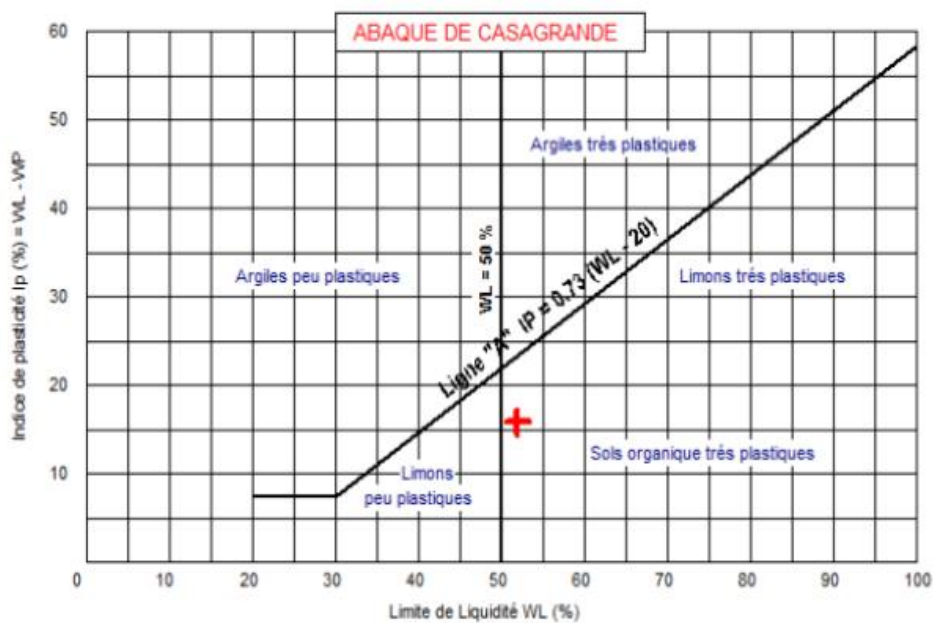


Fig. 5.9 — Classification de l'échantillon C2L10 d'après l'abaque de Casagrande.

Commentaire :

D'après la figure ci-dessus, on remarque que la limite de liquidité de notre échantillon est de 51.88%, celle de plasticité est de 36.08% ainsi que notre indice de plasticité I_p est de 15.80%.

5.3.4 Echantillon C2L20

Composition : 78% de la vase du barrage de Sidi Yacoub et 2% de la chaux et 20% de Laitier.

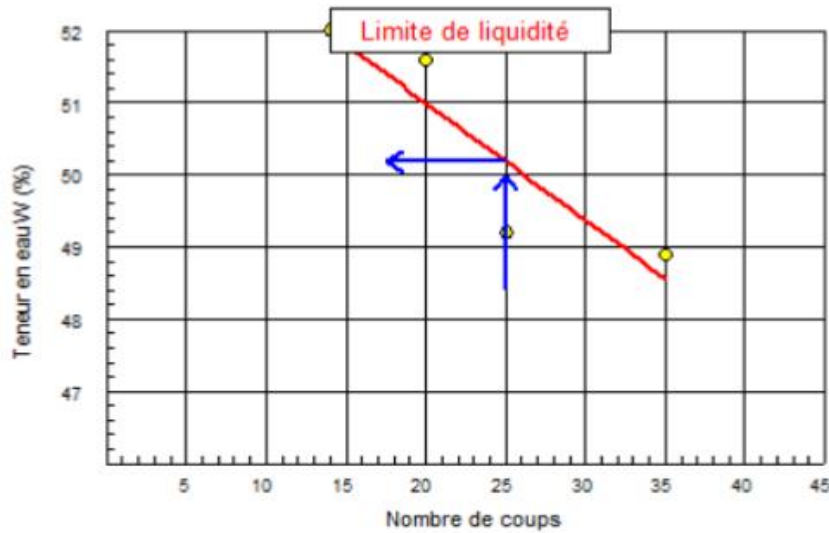


Fig. 5.10 — Limite de liquidité d'échantillon C2L20 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.

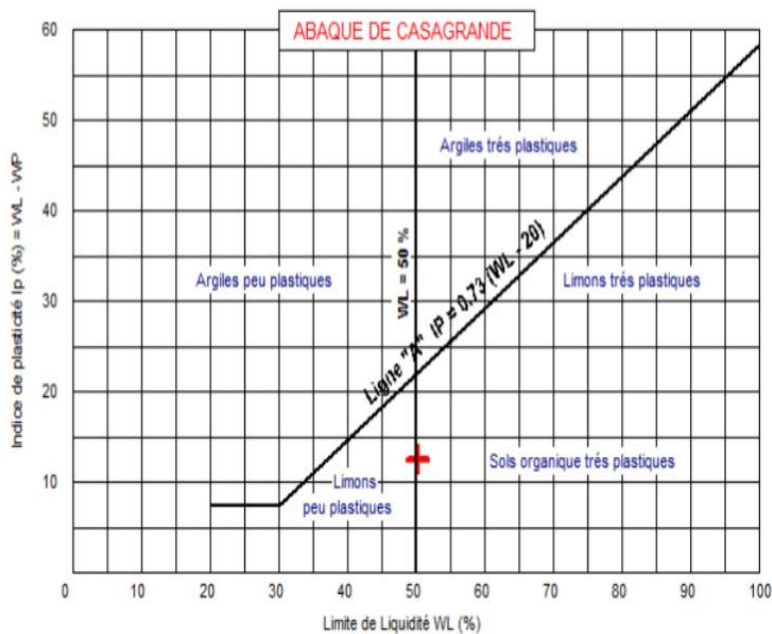


Fig. 5.11 — Classification de l'échantillon C2L20 d'après l'abaque de Casagrande.

Commentaire :

D'après la figure ci-dessus, on remarque que la limite de liquidité de notre échantillon est de 50.18%, celle de plasticité est de 37.65% ainsi que notre indice de plasticité I_p est 12.53%.

5.3.5 Echantillon C2L30

Composition : 68% de la vase du barrage de Sidi Yacoub et 2% de la chaux et 30% de Laitier.

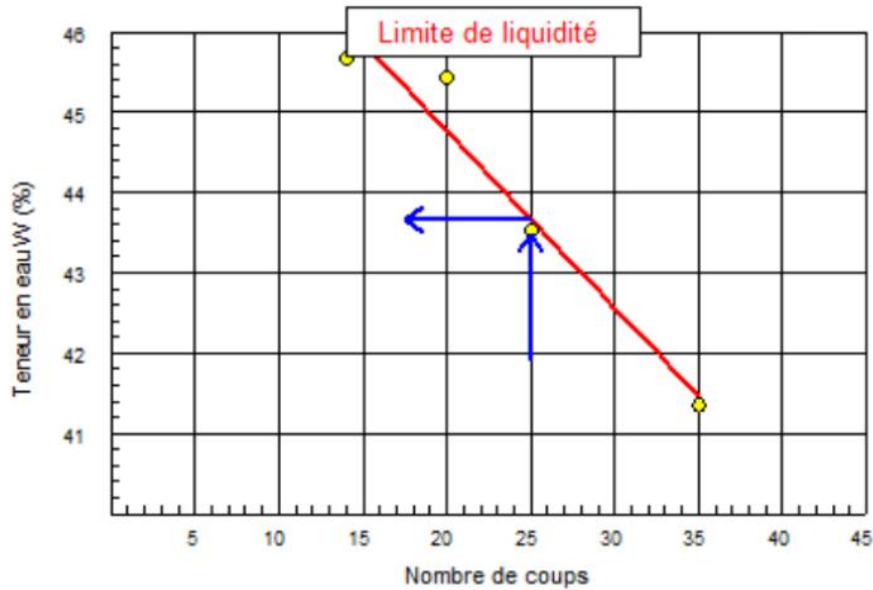


Fig. 5.12 — Limite de liquidité d'échantillon C2L30 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.

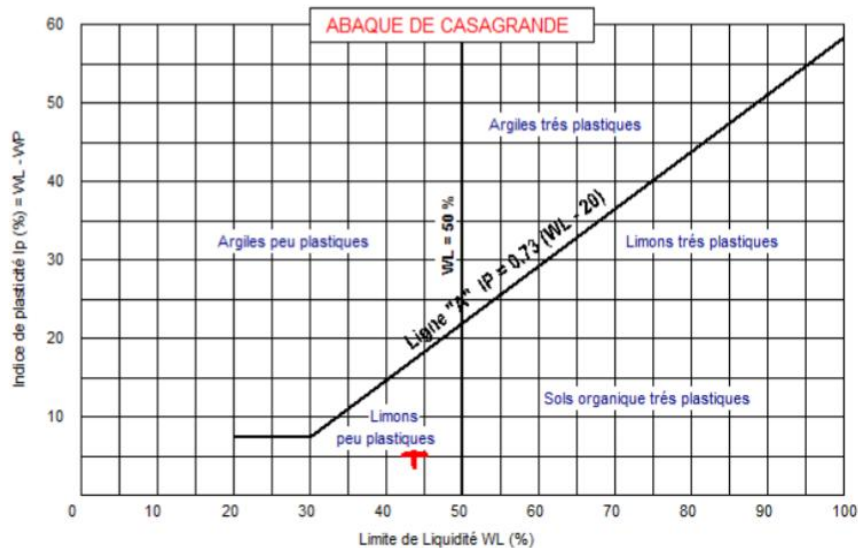


Fig. 5.13 — Classification de l'échantillon C2L30 d'après l'abaque de Casagrande.

Commentaire :

D'après la figure ci-dessus, on remarque que la limite de liquidité de notre échantillon est de 43.66%, celle de plasticité est de 38.65% ainsi que notre indice de plasticité I_p est 5.01%.

5.3.6 Echantillon C4L0

Composition : 96% de la vase du barrage de Sidi Yacoub et 4% de la chaux.

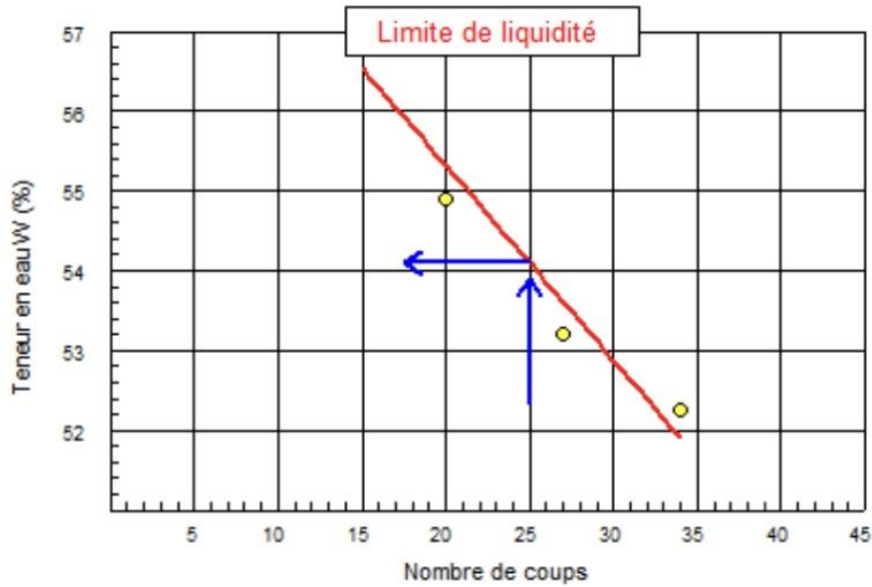


Fig. 5.14 —Limite de liquidité d'échantillon C4L0 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.

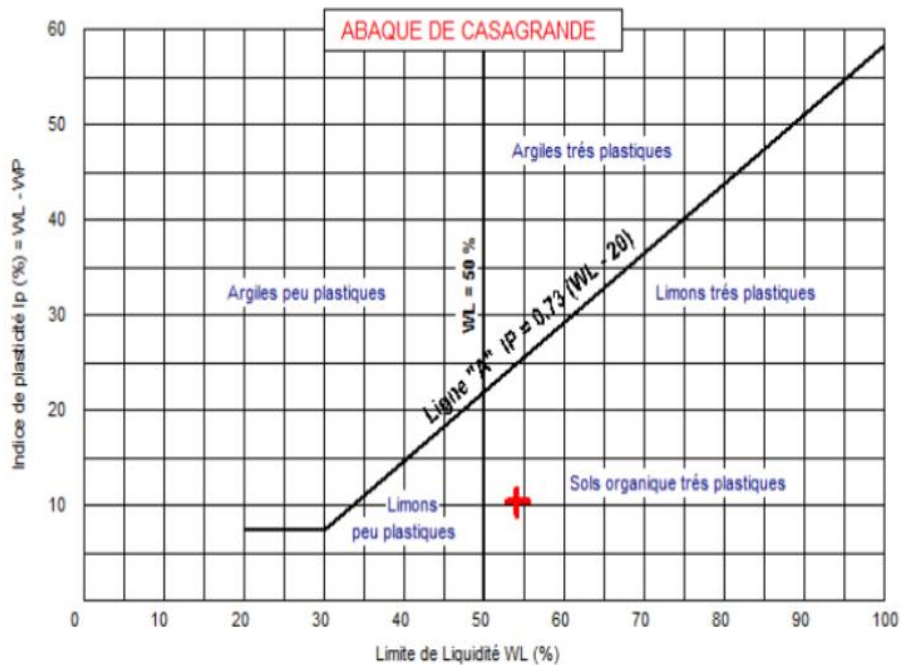


Fig. 5.15 —Classification de l'échantillon C4L0 d'après l'abaque de Casagrande.

Commentaire :

D'après la figure ci-dessus, on remarque que la limite de liquidité de notre échantillon est de 54.10%, celle de plasticité est de 43.77% ainsi que notre indice de plasticité I_p est 10.33%.

5.3.7 Echantillon C4L10

Composition : 86% de la vase du barrage de Sidi Yacoub et 4% de la chaux et 10% de Laitier.

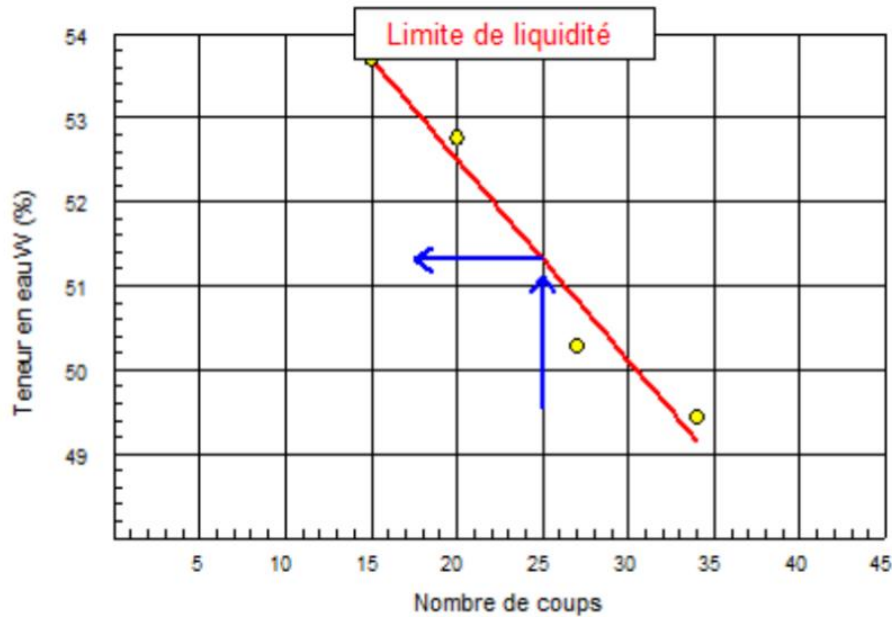


Fig. 5.16 — Limite de liquidité d'échantillon C4L10 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.

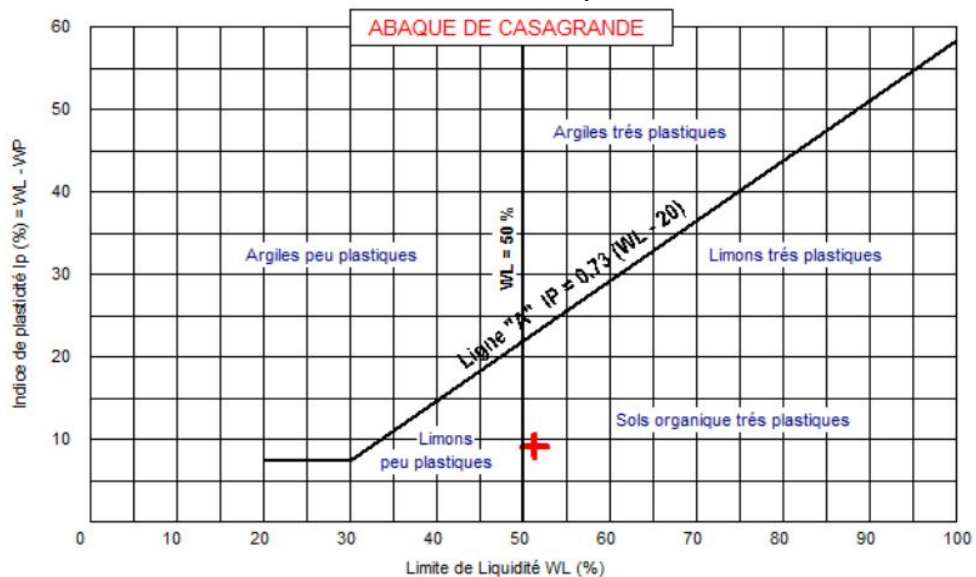


Fig. 5.17 — Classification de l'échantillon C4L10 d'après l'abaque de Casagrande

Commentaire :

D'après la figure ci-dessus, on remarque que la limite de liquidité de notre échantillon est de 51.31%, celle de plasticité est de 42.15% ainsi que notre indice de plasticité I_p est 9.16%.

5.3.8 Echantillon C4L20

Composition : 76% de la vase du barrage de Sidi Yacoub et 4% de la chaux et 20% de Laitier.

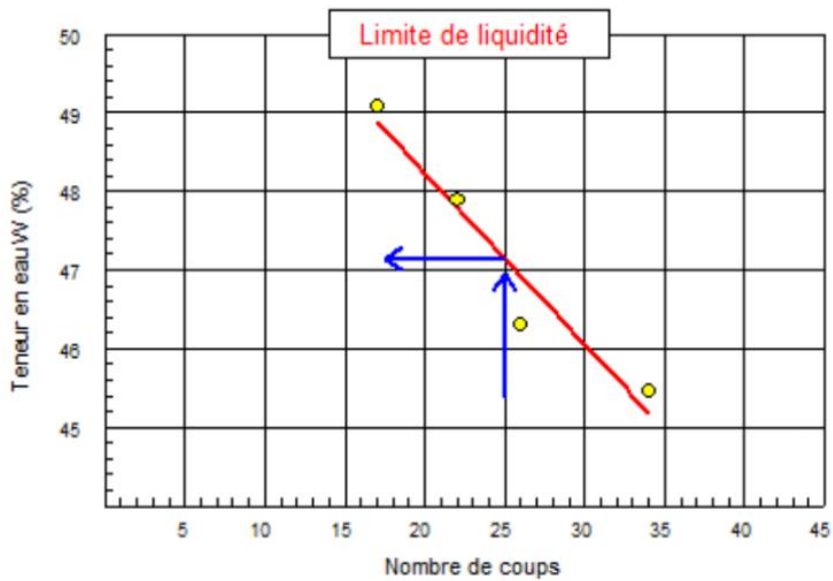


Fig. 5.18 —Limite de liquidité d'échantillon C4L20 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.

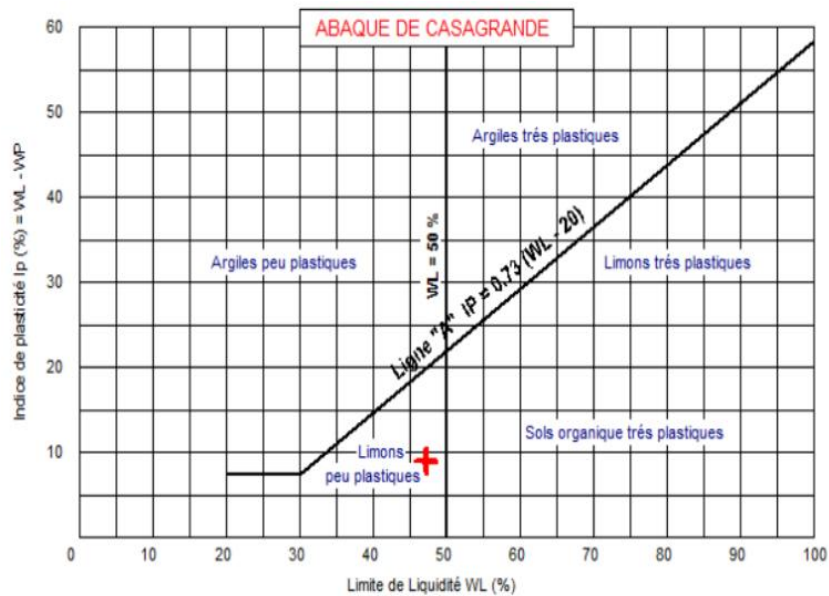


Fig. 5.19 —Classification de l'échantillon C4L20 d'après l'abaque de Casagrande.

Commentaire :

D'après la figure ci-dessus, on remarque que la limite de liquidité de notre échantillon est de 47.14%, celle de plasticité est de 38.20% ainsi que notre indice de plasticité I_p est 8.94%.

5.3.9 Echantillon C4L30

Composition : 66% de la vase du barrage de Sidi Yacoub et 4% de la chaux et 30% de Laitier.

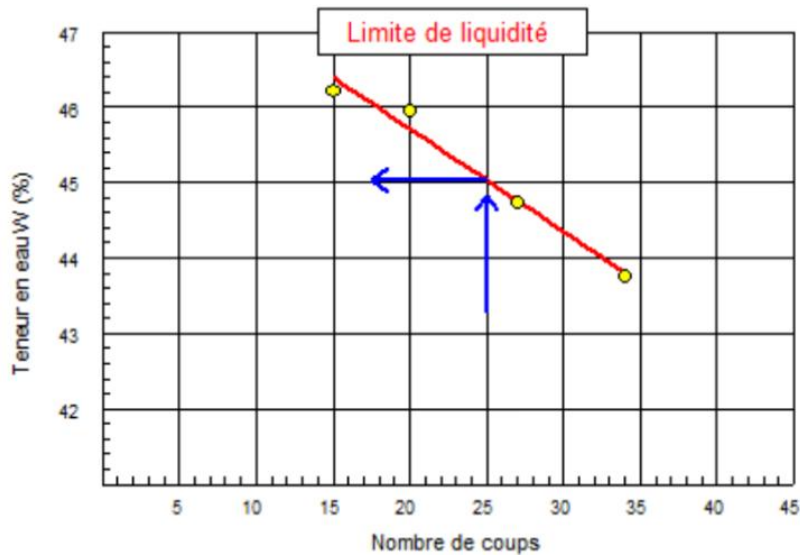


Fig. 5.20 — Limite de liquidité d'échantillon C4L30 étudié, teneur en eau en fonction du nombre des coups.

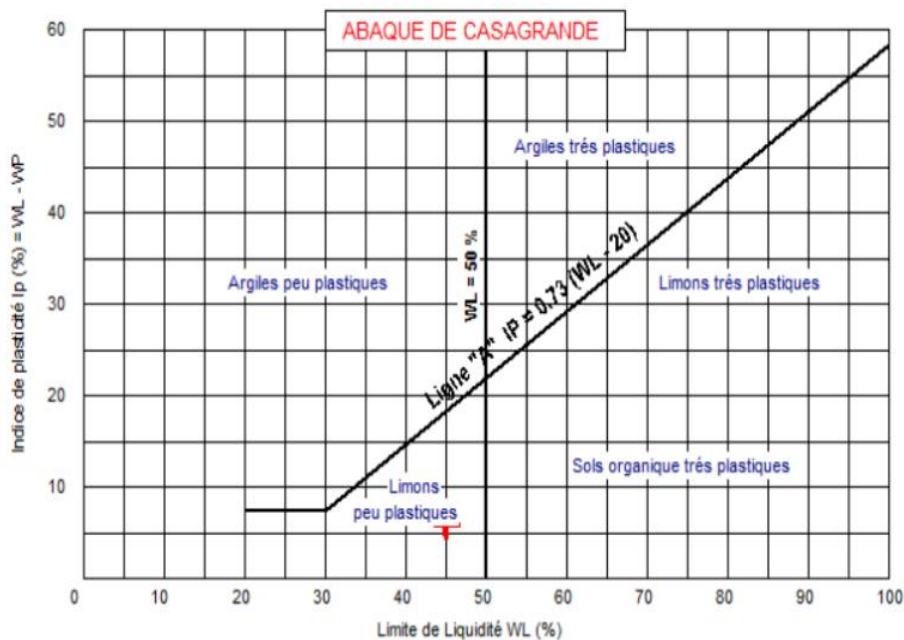


Fig. 5.21 — Classification de l'échantillon C4L30 d'après l'abaque de Casagrande.

Commentaire :

D'après la figure ci-dessus, on remarque que la limite de liquidité de notre échantillon est de 45.03%, celle de plasticité est de 39.13% ainsi que notre indice de plasticité I_p est 5.90%.

5.3.10 Interprétation

Cette étude montre l'effet de la stabilisation à la chaux sur la variation des limites d'Atterberg d'une vase d'un barrage. On peut observer que l'ajout de chaux augmente à la fois la limite de liquidité (LL) et la limite de plasticité (LP). Mais le taux d'augmentation de LL est inférieur à celui de LP, ce qui entraîne une diminution de l'indice de plasticité (IP).

L'augmentation de LL et LP à 1 jour de cure peut être expliquée par les réactions à court terme (échange cationique et agglomération), qui rendent le sol plus granuleux et friable. Les changements dans la structure des particules de sol relativement dispersées à floculées provoquant un développement de la résistance au cisaillement au niveau des particules qui augmente LL et LP.

Depuis la classification des échantillons étudiés selon le système de classification unifiée des sols (USCS), On voit clairement que le sol étudié est classé en tant qu'argile très plastique (CH), tombe dans la classe de limon très plastique (MH) après l'ajout de la chaux. Après l'ajout du laitier, ils changent cette classe en une argile à faible plasticité (CL). Pour sol traité 30% du laitier change de classe d'un argile très plastique (CH) à un limon à faible plasticité (ML). Les changements des classes des sols sont attribués à la floculation des argiles stabilisées avec la chaux et échange de cations [Al-Swadani et al., 2016 ; Harichan et al., 2018]. À partir de ces résultats, on peut conclure que le sol traité devient plus friable avec une faible plasticité.

Après 28 jours de cure

La figure 5.22 illustre les changements de limite de liquidité, limite plasticité et d'indice de plasticité de la vase du barrage de Sidi Yacoub stabilisée par la chaux, Laitier granulé de haut fourneau et leur combinaison à 1 jour et 28 jours de durcissement. D'après la figure 5.22 (a), l'ajout de 10% de Laitier à la vase traitée à 2% de chaux a réduit sa limite de liquidité de 83.76 à 34.6%. La limite de plasticité diminue de 36.08% à 27.82% Le même comportement a été observé par Harichane et al. (2011a).

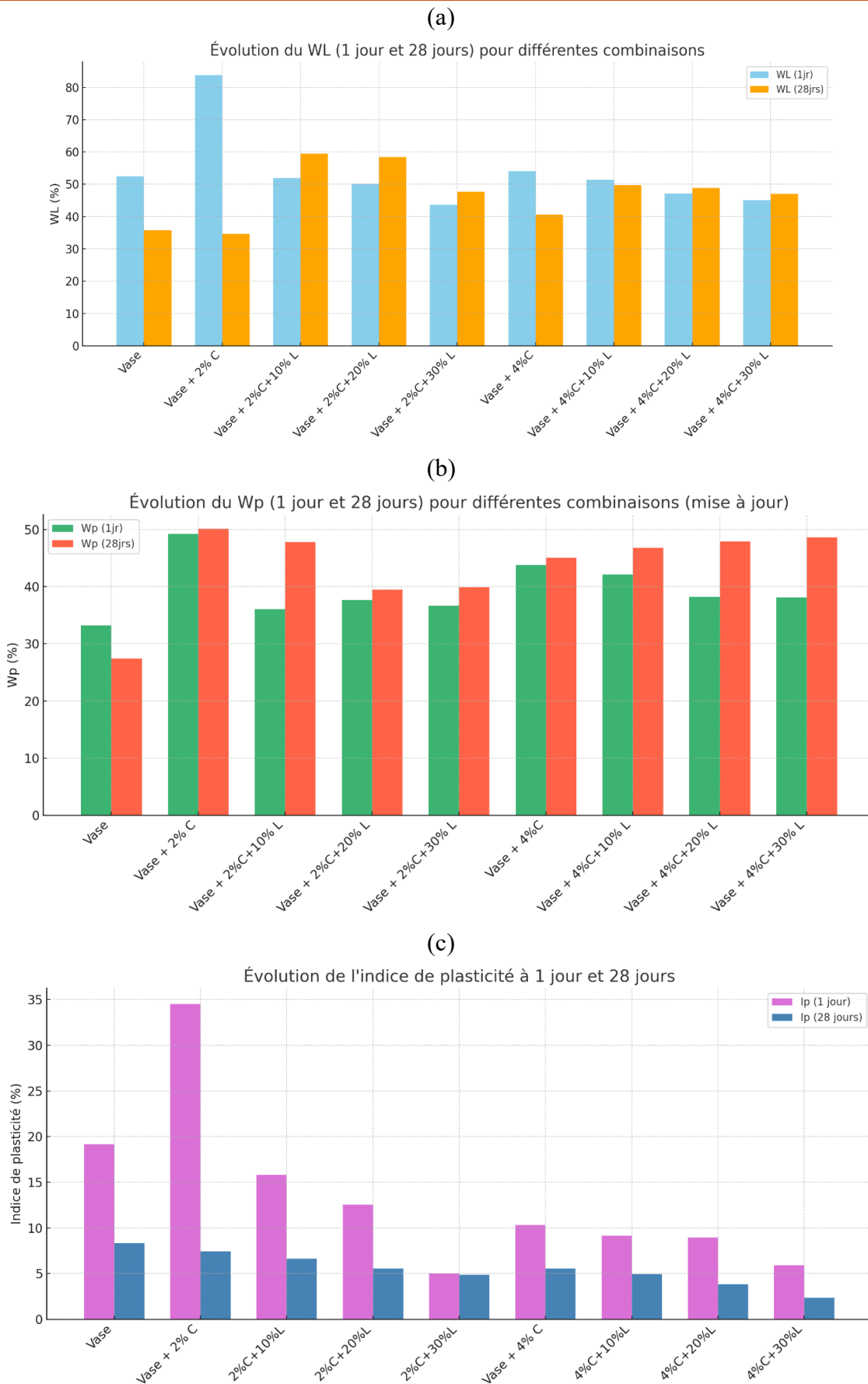


Fig. 5.22 — Effet des stabilisants sur les limites d'Atterberg.

Selon la Fig. 5.22, on peut observer que la limite de liquidité des échantillons stabilisés avec une combinaison chaux-Laitier augmente avec l'ajout de la teneur en chaux.

L'ajout du Laitier dans la vase du barrage de Sidi Yacoub traitée à la chaux entraîne une légère augmentation de la limite de plasticité. Par exemple, l'introduction de 20 % de Laitier dans la vase stabilisée avec 4 % de chaux fait passer la limite de plasticité de 43.77% à 45.08%. Parallèlement, une diminution de l'indice de plasticité a été constatée, rendant le sol plus friable et donc plus facile à compacter.

Cette variation des limites d'Atterberg s'explique principalement par deux mécanismes :

1. **La floculation des particules d'argile** induite par les réactions entre le sol, la chaux et le laitier, qui augmente la résistance au cisaillement intergranulaire, contribuant ainsi à une élévation des limites de liquidité et de plasticité.
2. **La faible limite de liquidité propre au Laitier**, qui réduit la limite de liquidité globale du mélange lorsqu'elle est incorporée au sol.

L'évolution du temps de cure augmente la limite de liquidité et de plasticité du sol stabilisé avec de la chaux et du Laitier en raison des réactions pouzzolaniques entre les particules d'argile et la chaux et entre la chaux et le Laitier granulé de haut fourneau.

5.4 Compactage

Des essais de compactage ont été réalisés afin d'évaluer l'effet de la chaux, du laitier, ainsi que de leur combinaison, sur les paramètres de compactage du sol traité, à savoir la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale.

Le tableau 5.1 représente les différents résultats obtenus de l'essai Proctor sur les vases du barrage de Sidi Yacoub avant et après traitement à la chaux à 2 et 4% et renforcement par ajout du Laitier avec 0- 10 -20 et 30%.

Tableau 5.1 — Résultats de l'essai Proctor de la vase traitée à la chaux et du Laitier Granulé.

							OMC	MDD	
1	C0L0	TENEUR EN EAUX	14.00	16.00	18.00	20.00	22.00	20.00	16.60
		Yd [g/cm ³]	15.000	15.900	16.400	16.600	16.400		
2	C2L0	TENEUR EN EAUX	20.00	21.80	23.70	25.60	27.70	24.00	14.60
		Yd [g/cm ³]	13.700	14.100	14.600	14.300	13.600		
3	C2L10	TENEUR EN EAUX	17.60	19.70	21.70	24.00	25.30	22.00	14.90
		Yd [g/cm ³]	14.300	14.600	14.900	14.700	14.4		
4	C2L20	TENEUR EN EAUX	16.60	18.60	21.60	22.50	24.50	21.60	15.20
		Yd [g/cm ³]	14.300	14.700	15.200	15.000	14.600		
5	C2L30	TENEUR EN EAUX	17.9	19.7	21.6	23.50	25.6	21.60	16.00
		Yd [g/cm ³]	14.9	15.6	16	15.20	13.9		
6	C4L0	TENEUR EN EAUX	23	24.3	26.3	28.50	30	26.00	14.80
		Yd [g/cm ³]	13.6	14.3	14.8	14.400	14		
7	C4L10	TENEUR EN EAUX	24.3	26.4	29.5	31.90	33.7	28.50	14.95
		Yd [g/cm ³]	14.5	14.9	14.9	14.400	14		
8	C4L20	TENEUR EN EAUX	23	25	26.6	31.00	32.80	28.00	15.20
		Yd [g/cm ³]	14	14.8	15.2	14.600	14.100		
9	C4L30	TENEUR EN EAUX	23	25	27	31.00	32	27.00	15.30
		Yd [g/cm ³]	14.5	15	15.3	14.700	14.5		

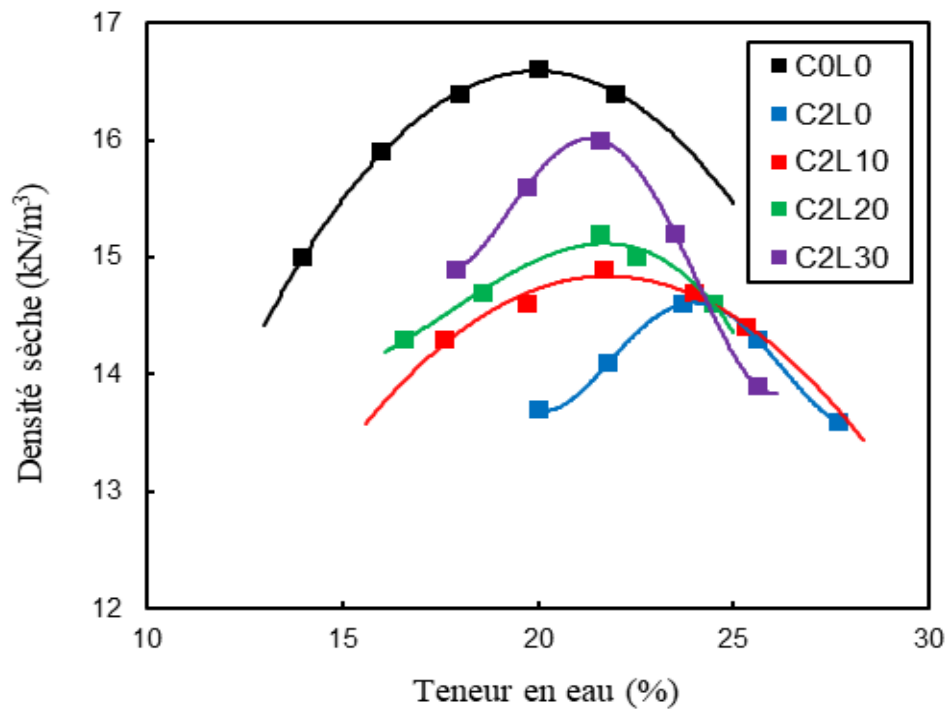


Fig. 5.23 — Courbes de compactage de la vase de Sidi Yacoub avant et après traitement avec 2% de chaux.

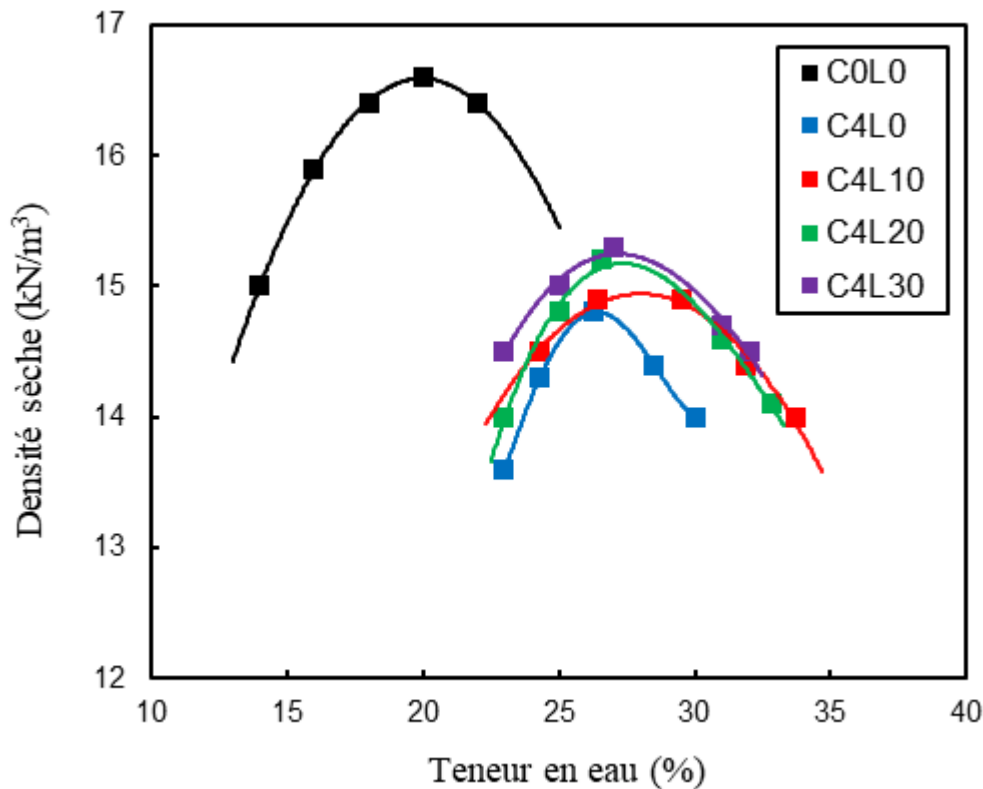


Fig. 5.24 — Courbes de compactage de la vase de Sidi Yacoub avant et après traitement avec 4% de chaux.

Les courbes de compactage du sol avant et après traitement avec 2, 4% de chaux ont été présentées sur la figure 5.23 et 5.24. La vase traitée étudiée a une courbe de compactage à pic unique avec une densité sèche maximale (MDD) de 16.60 kN/m^3 et une teneur en eau optimal (OMC) de 20% proche de sa limite de plasticité (19.18%).

Ces résultats s'accordent avec le modèle proposé par [Gurtug et Sridharan \(2004\)](#), qui ont mis en évidence une forte corrélation entre l'OMC et la limite de plasticité des sols cohésifs. Selon leurs travaux, la teneur en eau optimale représente environ 92 % de la limite de plasticité, avec un coefficient de corrélation de 0,95.

Les courbes de compactage du sol argileux traité à la chaux conservent leurs forme (pic unique) avec un pull-down vers la droite, ce qui signifie que le MDD a diminué et la OMC a augmenté.

La figure 5.23 montre clairement que l'ajout de la teneur en chaux a légèrement diminué le MDD et augmenté la OMC.

La conception du sol stabilisé à la chaux est proportionnelle à la quantité de chaux ajoutée (plus de chaux, un MDD plus faible et une OMC plus élevée). Selon la littérature, la diminution de la densité sèche peut être expliquée par la faible valeur de la densité de la chaux et la floculation des particules de sol avec formation immédiate de composés gélatineux ([Vitale et al., 2017](#) ; [Garzon et al. \(2016\)](#)).

5.5 Variation des paramètres de résistance au cisaillement

5.5.1 Evolution de l'angle de frottement et la cohésion

Le tableau suivant présente la cohésion et l'angle de frottement des différentes combinaisons à 1 jour de cure.

Tableau 5.2 — Cohésion et l'angle de frottement des différentes combinaisons à 1 jour de cure.

Chaux	0			2%			4%		
Laitier	0	0	10	20	30	0	10	20	39
C(kPa)	73.59	131.72	127.47	174.64	138.83	159.5	151.92	209.76	132.26
Angle de frottement interne (°)	51.65	27.74	44.79	33.58	46.87	46.36	42.7	30.37	40.107

Les figures ci-dessous montre la variation de la résistance au cisaillement en fonction de l'angle de frottement et la cohésion à 1 jour de cure.

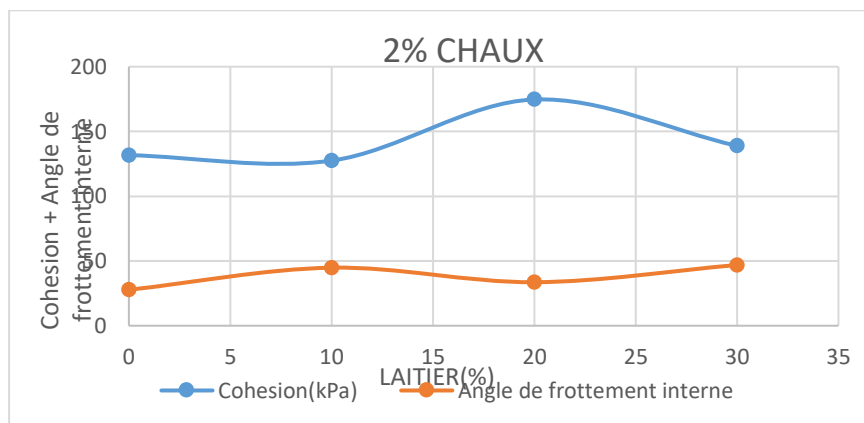


Fig. 5.25 — Variation des paramètres de cisaillement par traitement à 2% de chaux à 1jr de cure.

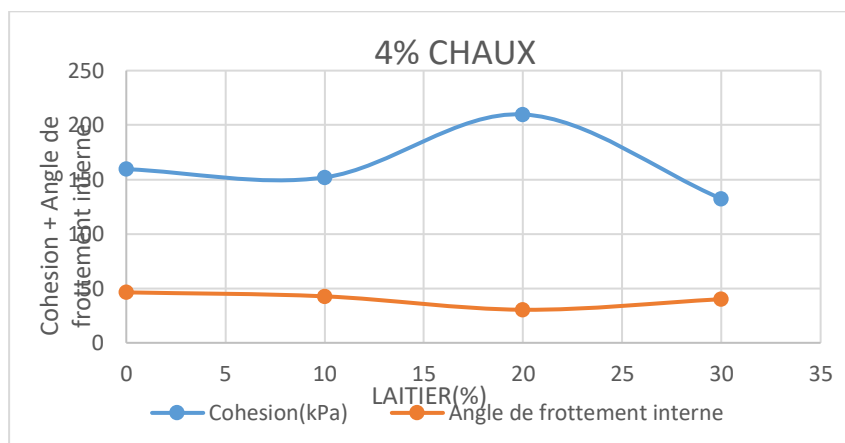


Fig. 5.26 — Variation des paramètres de cisaillement par traitement à 4% de chaux à 1jr de cure.

La cohésion du sol était quasi constante lorsque le Laitier a été ajoutée, la cohésion du sol naturel et du sol avec 10% de Laitier est égale à 127.47 kPa, cette valeur a fortement augmenté avec l'ajout de 20% de Laitier pour obtenir une cohésion de 174.64 kPa. Cette évolution peut s'expliquer par l'augmentation de la densité sèche maximale et par la modification de la structure du sol.

Une augmentation de l'angle de frottement a été observée en concordance avec la teneur en Laitier. L'ajout de 10% et 20% de Laitier a augmenté l'angle de frottement de 27.74° à 44.79°, cette augmentation peut être expliquée par la modification de la structure du sol (particule plus grosse) due à la grande différence entre la distribution granulométrique du sol et du Laitier.

Les figures 5.25 -5.27 montrent clairement qu'il existe trois facteurs qui ont une influence considérable sur la variation des paramètres de cisaillement de la vase stabilisé à la chaux et à la combinaison de chaux- Laitier granulé de haut fourneau. Ces facteurs sont la teneur en chaux, la teneur en Laitier combinée à la chaux et le temps de durcissement cela a été bien montré par les figures suivantes :

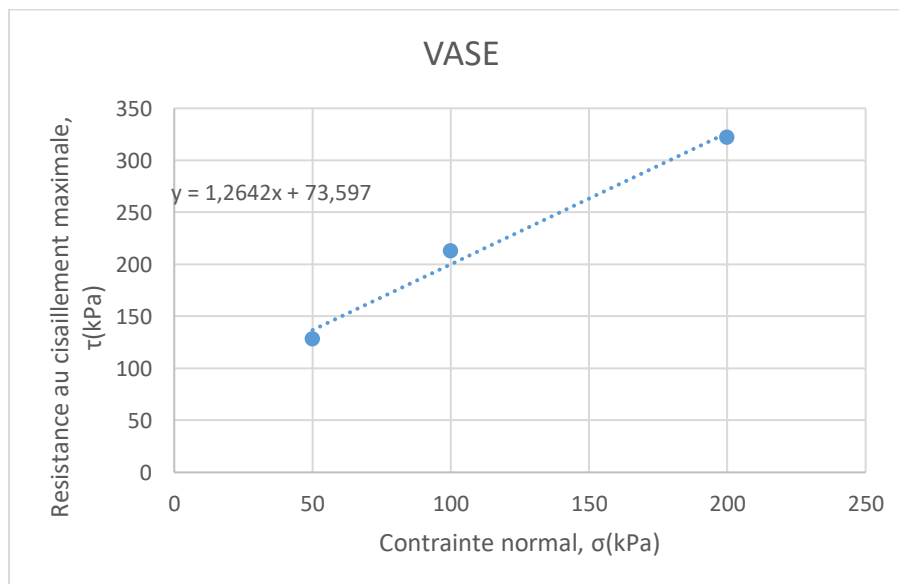


Fig. 5.27 — Diagramme contrainte 6 Résistance au cisaillement de la vase du barrage de Sidi Yacoub.

Afin d'expliquer la variation des paramètres de cisaillement et la réaction chimique responsable de cette variation, Des auteurs ont suggéré que la floculation des particules augmente la valeur de l'angle de frottement, alors que la cimentation des particules augmente la valeur de la cohésion, alors que les valeurs de cohésion plus élevées après 28 jours de durcissement par la réaction pouzzolanique produite avec le temps. [Ola \(1978\)](#) a expliqué la relation entre l'augmentation de la cohésion avec la teneur en chaux par la formation de floes lorsque les particules de sol deviennent fortement liées (agrégation / floculation) et le sol traité se comporte comme un sol à gros grains.

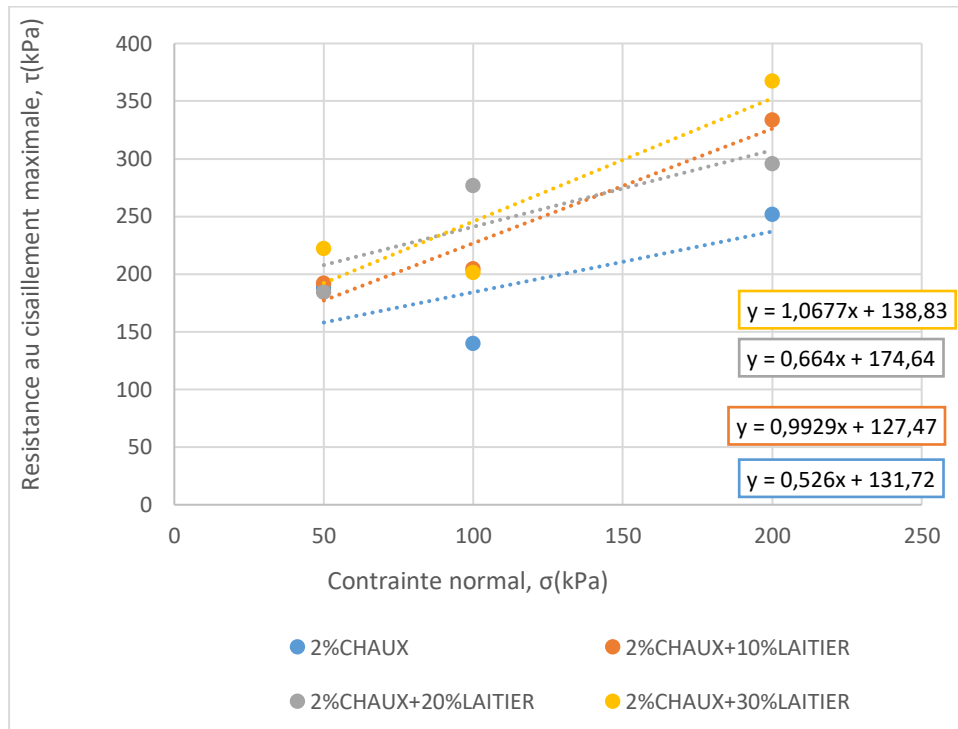


Fig. 5.28 — Variation de la résistance au cisaillement de la vase traitée avec 2 % de chaux, en fonction des pourcentages d’ajout de laitier.

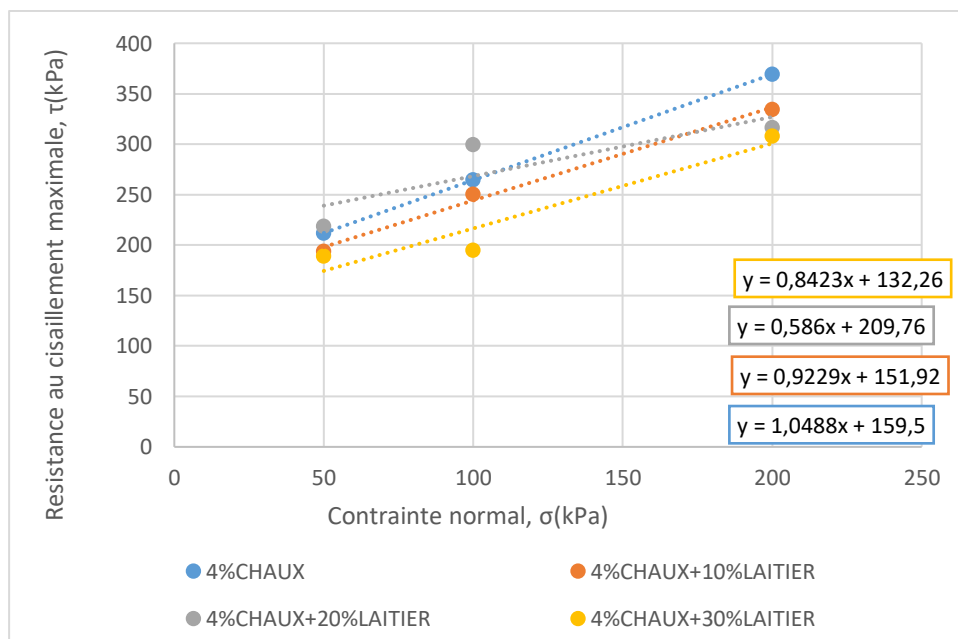


Fig. 5.29 — Variation de la résistance au cisaillement de la vase traitée avec 4 % de chaux, en fonction des pourcentages d’ajout de laitier.

L'augmentation de la teneur en chaux a entraîné une évolution considérable des paramètres de cisaillement ; pour un sol stabilisé à 4% de chaux à 1 jour de durcissement,

Concernant la variation des paramètres de cisaillement avec l'augmentation des teneurs en chaux et en Laitier en fonction du temps de cure sont bien illustrés en tableau 5.3

Tableau 5.3 — Cohésion et l'angle de frottement des différentes combinaisons à 28 jours de cure.

Chaux	2%				4%			
Laitier	0	10	20	30	0	10	20	39
C(kPa)	216,51	201,43	245,85	138,38	115,96	155,11	192,89	299,69
Angle de frottement interne(°)	35,94	45,04	33,32	54,83	58,58	53,55	48,52	35,81

Les figures ci-dessous montre la variation de la résistance au cisaillement en fonction de l'angle de frottement et la cohésion à 1 jour de cure.

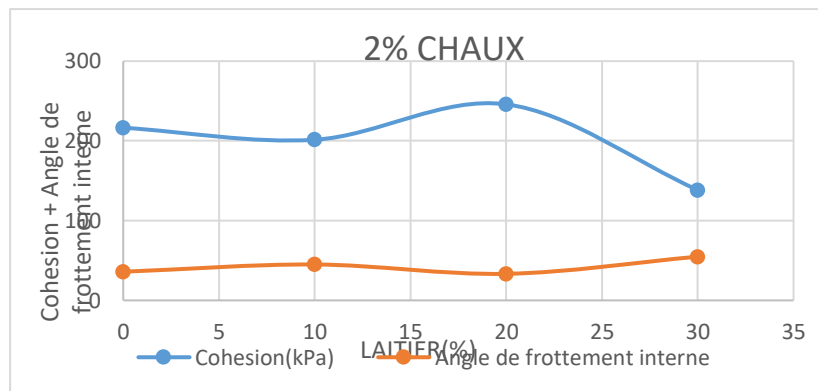


Fig. 5.30 — Variation des paramètres de cisaillement par traitement à 2% de chaux à 28jrs de cure.

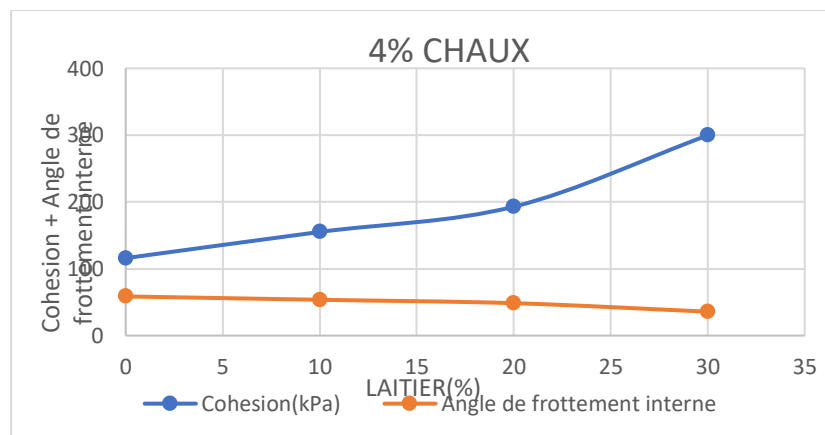


Fig. 5.31 — Variation des paramètres de cisaillement par traitement à 4% de chaux à 28jrs de cure.

Premièrement, des réactions à court terme telles que l'échange de cations et la floculation des particules se produisent lorsque le sol stabilisé avec de la chaux ou avec une combinaison chaux-Laitier, l'échange de cations provoque la production de nouvelles liaisons chimiques entre les particules pour former des agrégats plus gros, cette liaison chimique augmente la cohésion du sol traité et diminue l'angle de frottement (Fig.5.31). En raison de la floculation et de la fabrication de micro-ports. Donc, on peut considérer que la réaction pouzzolanique débute avec l'élévation du pH du milieu, rendue possible par les ions hydroxyde (OH^-) présents dans la chaux vive et le laitier granulé de haut fourneau. Un pH élevé facilite la dissolution de la silice et de l'alumine contenues dans les particules d'argile. Ces éléments, une fois en solution, réagissent avec l'excès de calcium fourni par le Laitier et l'activateur, formant des hydrates de calcium insolubles. En présence d'eau, ces hydrates cristallisent, créant des liaisons similaires à celles générées lors de la première phase de réaction. L'apparition de ces hydrates dits de « seconde génération » dépend notamment de la température, du pH du milieu et de la nature des argiles en présence.

5.5.2 Comportement de la résistance au cisaillement en fonction des conditions de traitement et durée de cure

Afin d'expliquer l'augmentation des paramètres de cisaillement avec l'ajout de Laitier granulé, il existe deux types d'influence. D'une part, l'effet sur les propriétés physiques du sol, ce dernier devient plus dense avec une structure plus résistante. En deuxième lieu, des réactions pouzzolaniques se produisent. La cémentation des particules est l'un des résultats de réactions à long terme qui est la cause de la forte augmentation de la Résistance (Fig. 5.32 -5.32 à 1 jour de cure) et (Fig. 5.34 -5.35 à 7 jours).

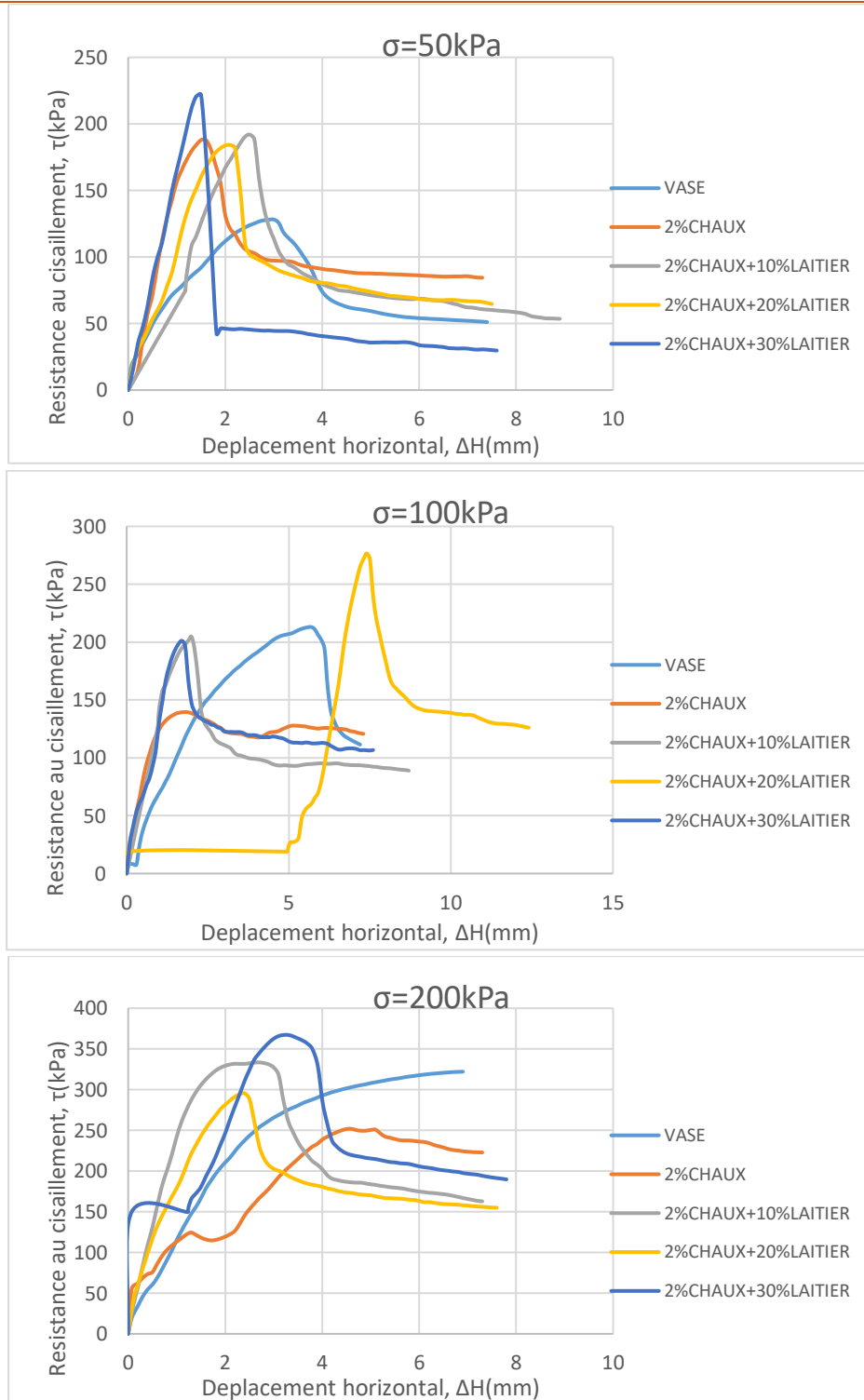


Fig. 5.32— Evolution de la résistance au cisaillement de la vase traitée à 2% de chaux en fonction de % d'ajout du Laitier Granulé de haut fourneau à 1 jour de cure.

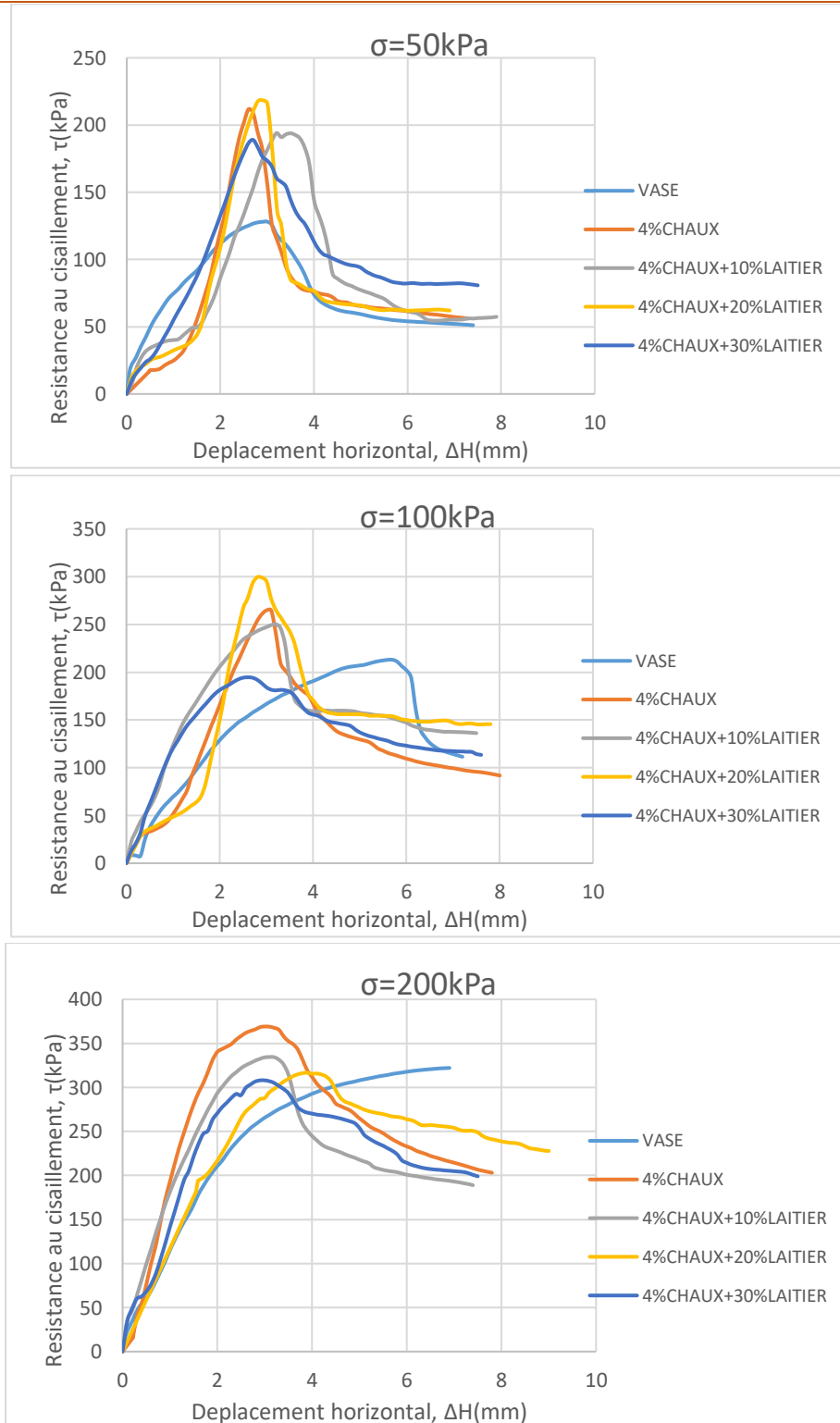


Fig. 5.33— Evolution de la résistance au cisaillement de la vase traitée à 4% de chaux en fonction de % d'ajout du Laitier Granulé de haut fourneau à 1 jour de cure.

D'après les figures ci-dessus, on constate que la résistance de cisaillement de la combinaison C2L30 peut atteindre 210 kpa à 300 kpa sous l'influence de 50kpa à 200kpa respectivement à 1 jour de cure.

Les figures représentant l'évolution de la contrainte de cisaillement après 2 jours de traitement sont les suivants :

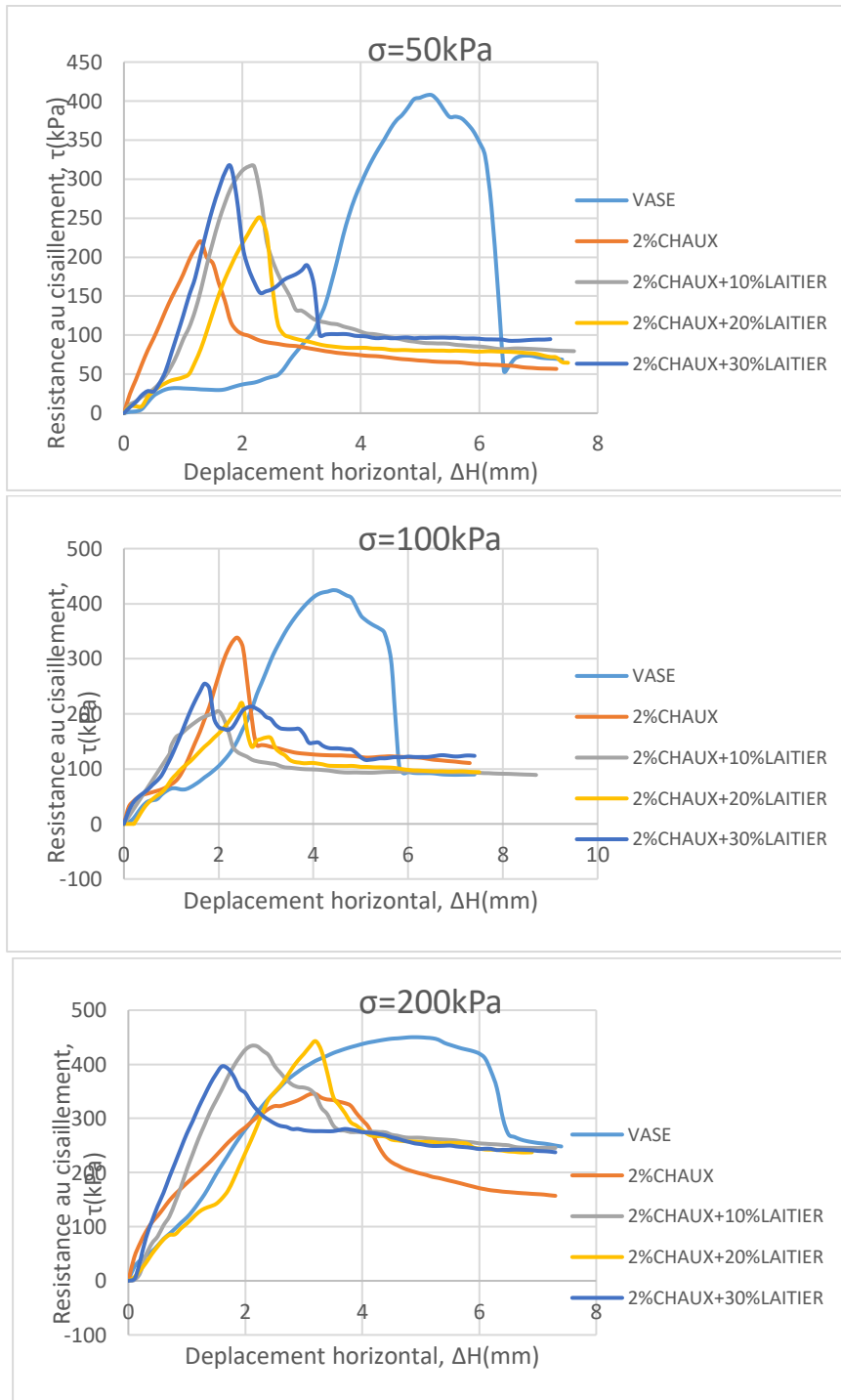


Fig. 5.34— Evolution de la résistance au cisaillement de la vase traitée à 2% de chaux en fonction de % d'ajout du Laitier Granulé de haut fourneau à 28 jours de cure.

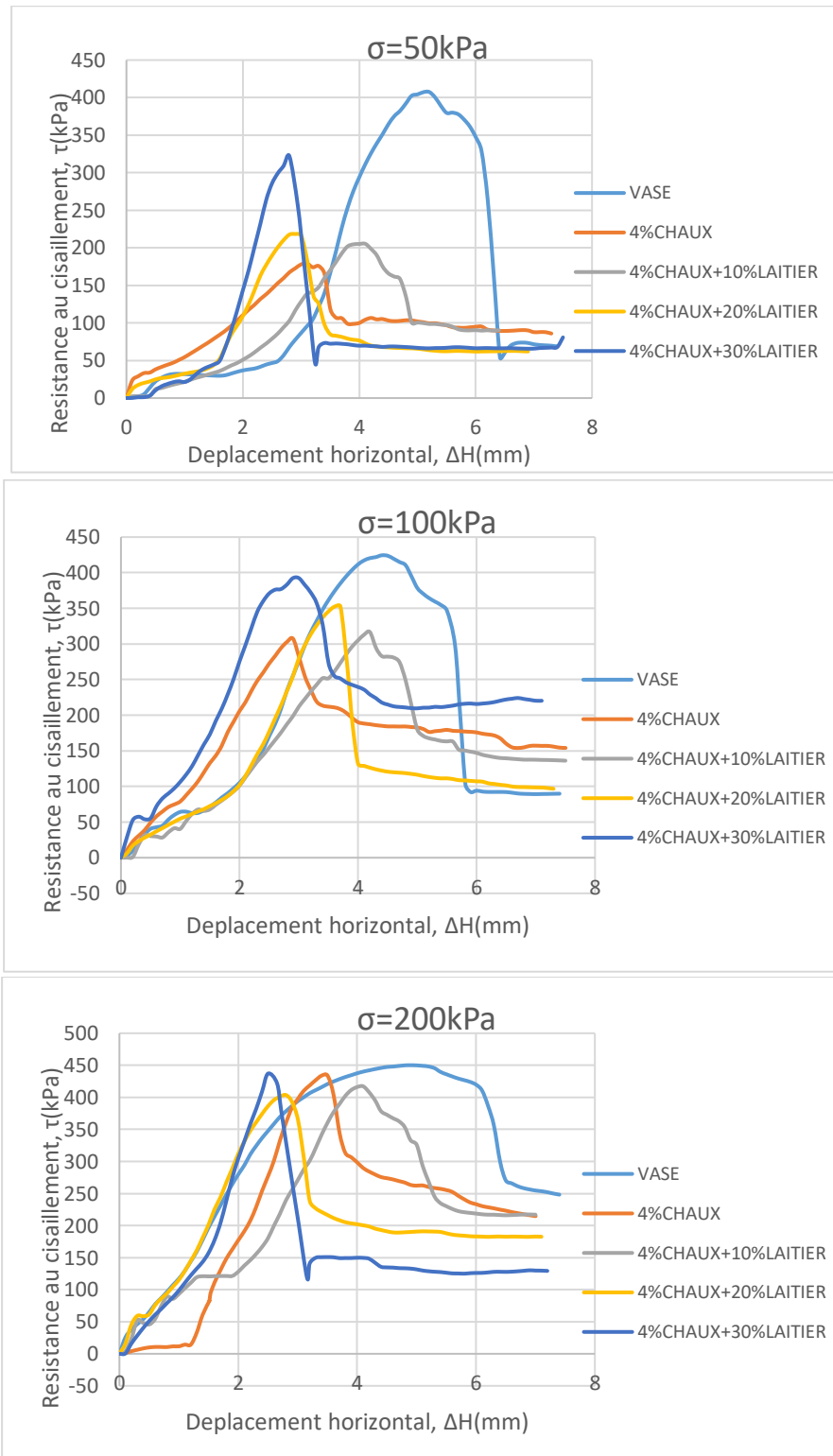


Fig. 5.35— Evolution de la résistance au cisaillement de la vase traitée à 4% de chaux en fonction de % d'ajout du Laitier Granulé de haut fourneau à 28 jours de cure.

Les figure 5.34 et 5.35 montrent l'effet d'addition du Laitier granulé, de la chaux et de leur combinaison sur les relations contrainte -déformation du sol traité., contenant des pics exprimant la contrainte déviatorique maximale suivie d'une réduction de contrainte (contrainte déviatorique résiduelle) jusqu'à le cisaillement de l'échantillon.

Lorsque le sol est traité avec de chaux ou d'une combinaison chaux- Laitier, des pics dans les courbes contrainte-cisaillement sont observés. Ces courbes sont linéaires presque jusqu'à 85% de la contrainte maximale. Cette linéarité augmente avec l'ajout de la chaux et la période de cure où elles deviennent plus pointues (Fig. 5.35). L'augmentation de la teneur en chaux et Laitier augmente, ce qui signifie que le sol a été bien renforcé par le laitier granulé.

5.6 Essais de Compression

La figure 5.36 montre l'effet d'addition du Laitier granulé, de la chaux et de leur combinaison sur les relations contrainte -déformation du sol traité. Le premier type de courbes, qui a une apparence asymptotique sans pic, représente les courbes du sol vase brute et du sol avec des teneurs différentes en Laitier. Le second type représente les courbes de la vase traitée avec la chaux et la combinaison chaux-Laitier, contenant des pics exprimant la contrainte déviatorique maximale suivie d'une réduction de contrainte (contrainte déviatorique résiduelle) jusqu'à la rupture de l'échantillon.

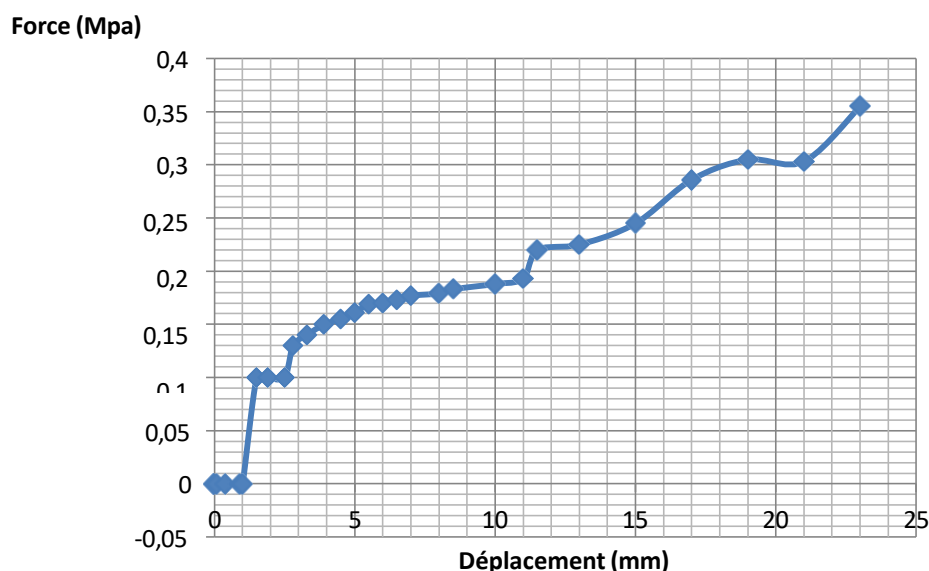


Fig. 5.36— Résistance à la compression de la combinaison C0L0 à 1jour de durcissement.



Fig. 5.37 — Fissures des surfaces latérales des éprouvettes après essais de compression.

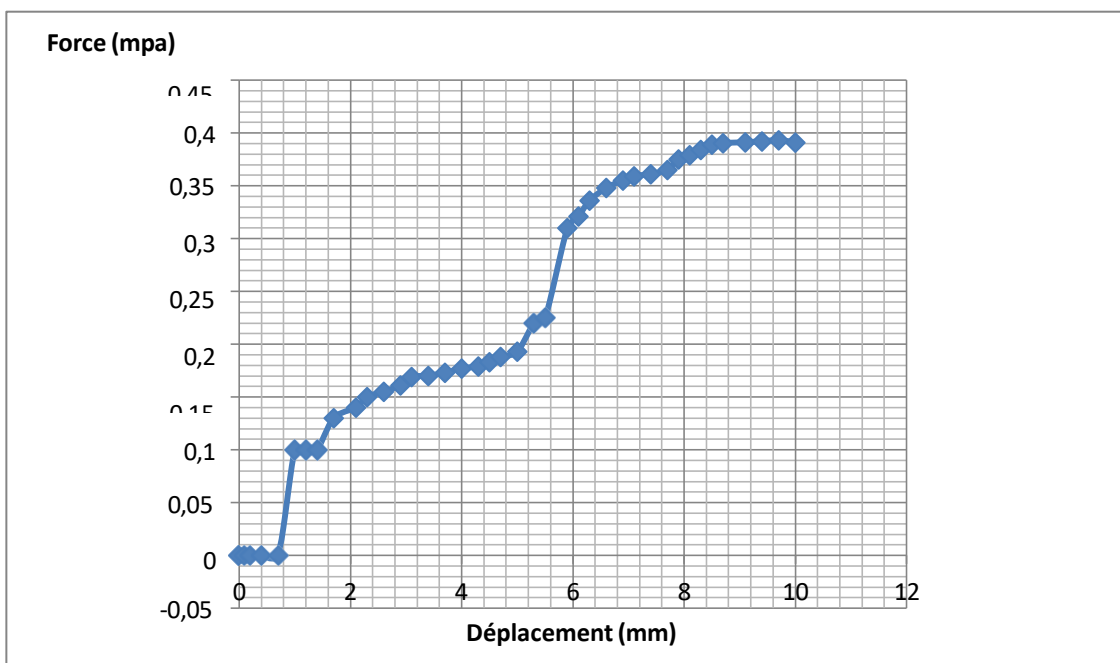


Fig. 5.38 — Résistance à la compression de la combinaison C4L0 à 1jour de durcissement.

La courbe représente la résistance a la compression 1 jour de la combinaison C4L0 d'une force de 0.4123 Mpa et un déplacement de 12.4 mm.

C'est connu dans la littérature que le traitement des sols argileux avec la chaux provoque une augmentation considérable à la résistance à la compression non confinée, ce comportement a été mentionné par différents chercheurs ([Harichane et al. 2018](#)).

À partir de la Fig. 5.38, on peut noter que les courbes contrainte-déformation des combinaisons traitées ont deux comportements déterminants, dans le court terme (1 jour de durcissement) le sol traité se comporte comme des matériaux ductiles avec une augmentation de la résistance à la compression non confinée

En revanche, une augmentation significative de la résistance à la compression non confinée devrait être observée après 28 jours de durcissement, comparativement au sol non traité, bien que cette évaluation n'ait pas pu être réalisée par manque de temps.

5.7 Conclusion

Une étude expérimentale a été réalisée afin d'évaluer l'influence du Laitier granulé de haut fourneau sur plusieurs propriétés de la vase du barrage de Sidi Yacoub stabilisée à la chaux.

Les paramètres examinés incluent l'évolution du pH, les limites d'Atterberg, les caractéristiques de compactage, ainsi que la classification du sol.

À partir des résultats obtenus, les conclusions suivantes ont été dégagées :

- L'augmentation de la teneur en chaux pour la vase stabilisée par celle-ci avec et sans ajout de Laitier change son pH modérément alcalin en une valeur de pH alcalin élevée, cette augmentation du pH est un signe du début des réactions chimiques entre le sol, le Laitier et la chaux ;
- L'ajout de chaux à la vase a augmenté à la fois LL et LP, provoquant une diminution considérable de IP en raison du changement dans la structure des particules du sol, qui transforme le comportement du sol de dispersé à floculé. La réaction pouzzolanique survenue entre la chaux et le sol avec le temps de cure a entraîné une augmentation à la fois de LL et de LP du sol traité, mais IP a légèrement diminué ;
- Une diminution supplémentaire de IP a été observée pour la vase traitée avec la combinaison de chaux et de Laitier. Ce comportement peut s'expliquer par deux facteurs principaux, (1) la réaction chimique entre sol-chaux-Laitier qui a augmenté la LP, (2) la diminution de LL causée par la faible LL du Laitier ;
- La conception de la vase stabilisée à la chaux correspond à la teneur en chaux ajoutée ; plus de chaux a entraîné une diminution du MDD et une augmentation de la OMC. La MDD de la vase traitée à la chaux augmente lorsqu'il est combiné avec différentes teneurs en Laitier, mais cette augmentation est inférieure à celle du sol non traité. En revanche, la OMC de la combinaison chaux-Laitier augmente avec l'ajout de la teneur en Laitier ;
- Un effet considérable de la chaux, de la combinaison avec le Laitier a été observé sur la modification de la classification de la vase selon l'abaque de Casagrande. L'ajout du Laitier granulé de haut fourneau au sol expansif traité avec de la chaux produit un sol plus stabilisé (structure du sol plus granulaire avec une plasticité moindre) ;
- Les courbes contrainte-déformation de la vase et la combinaison de la vase avec le Laitier ont une forme hyperbolique (sans pic). Des pics dans les courbes contrainte-déformation ont été observés lorsque la vase est stabilisée à la chaux ou à la combinaison de de chaux-Laitier ;

- Les paramètres de résistance au cisaillement la vase ont légèrement augmenté lorsque le laitier est ajouté, aucune augmentation des paramètres de cisaillement n'a été observée pendant l'augmentation du temps de durcissement. Une augmentation significative a été observée de la cohésion et de l'angle de frottement de la vase stabilisée par la chaux et la chaux combinée avec du Laitier, cette augmentation est basée sur la teneur en chaux, la teneur en Laitier combinée à la chaux et le temps de durcissement ;
- Une augmentation marginale de la contrainte déviatorique maximale a été observée pour les échantillons de combinaison sol-Laitier. L'utilisation de la chaux comme stabilisant a produit une augmentation importante de la contrainte déviatorique maximale avec l'ajout à la fois de la teneur en chaux et de la période de durcissement. L'ajout du Laitier à la vase traitée à la chaux fournit un meilleur résultat pour la contrainte déviatorique maximale de la vase traitée par rapport à l'utilisation de la chaux seule.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Au terme de cette étude mène pour le but de mieux analyser le phénomène d'envasement ainsi que la valorisation des sédiments d'envasement du barrage de Sidi Yacoub,

Nous avons consacré une partie, théorique qui permet de présenter le phénomène d'envasement, les causes et origines de l'envasement et les moyens de lutte contre ce problème et l'autre partie consiste à proposer une méthode permettant de réutiliser les sédiments obtenus par suite des opérations de dragage en domaine des travaux routier.

Les retenues de barrage de Sidi Yacoub sont les plus affectées par le phénomène d'envasement, en raison du taux élevé d'érosion observé dans cette région, lui-même accentué par la nature friable des sols et l'insuffisance de la couverture végétale.

Le taux d'érosion spécifique enregistré dans le nord de l'Algérie figure parmi les plus élevés du pays, dépassant 2 000 t/km²/an dans la majorité des bassins versants de l'Atlas tellien (Rhiou, Sly, Fodda, Mazafran, Isser, Soummam, etc.). Ce taux peut atteindre jusqu'à 4 000 t/km²/an au niveau de la chaîne côtière du Dahra.

L'Algérie qui a une expérience considérable en matière de la lutte contre ce phénomène tente depuis plusieurs années de mettre en œuvre des moyens de lutte adéquats pour allonger la durée de vie des barrages en améliorant leur exploitation.

Ces moyens doivent être poursuivis, renforcés et généralisés dans le futur pour une meilleure protection des ressources.

D'après les données disponibles, le bassin versant de Sidi Yakoub se caractérise par une précipitation annuelle moyenne d'environ 500 mm. Les précipitations mensuelles moyennes varient de 2 mm en juillet à environ 70 mm entre décembre et février. La densité de drainage du réseau hydrographique y est estimée à 3,68 km/km². Ce barrage est destiné à l'AEP et l'irrigation.

D'après LANBT, les résultats du levé bathymétrique réalisé en 2019 au niveau du barrage de Sidi-Yacoub témoignent d'une perte notable de capacité de stockage par rapport aux valeurs initiales, en raison de l'envasement progressif du réservoir. Ce constat souligne l'importance de valoriser les vases accumulées dans une perspective de gestion durable des ressources en eau.

L'extraction de ces sédiments de barrage nécessite des dépenses importantes ce qui nous oriente à valoriser ces matériaux soit comme matière première dans l'agriculture que l'industrie, soit comme des matériaux de construction routière.

Dans le cadre d'un projet de construction routière, la phase de caractérisation des matériaux constitue une étape cruciale, influençant à la fois les aspects techniques et économiques. Il est en effet essentiel de déterminer si les sols rencontrés le long du tracé prévisionnel peuvent être réutilisés dans la réalisation des différentes couches de la structure routière, notamment la couche de forme.

Notre objectif est de valoriser les sédiments du barrage de Sidi Yacoub en couche de forme, d'où nous avons appliqué cette méthodologie au niveau des laboratoires :

- ✚ Laboratoire Nationale de l'Habitat et Construction LNHC ;
- ✚ Laboratoire des Travaux publics de Chlef LTTC ;
- ✚ Laboratoire de l'Hydraulique et Génie civil de l'Université de Hassiba Benbouali Chlef UHBC

La méthodologie adoptée consiste à traiter le mélange avec différents pourcentages de liant (chaux et laitier granulé de haut fourneau). L'ajout de liant permet, notamment pour les matériaux fins souvent sensibles à l'eau, de renforcer les liaisons intergranulaires et de réduire la porosité ouverte, limitant ainsi le passage de l'eau libre à travers la structure.

Dans le cadre de la valorisation en technique routière, un traitement a été réalisé afin d'évaluer l'effet de différents ajouts : Vase, Vase-Chaux, Vase-Chaux, Vase -Chaux-Laitier granulé de haut fourneau. Les pourcentages utilisés sont les suivants : chaux (2 % et 4 %), et Laitier granulé (0- 10 – 20 et 30 %).

Cette recherche traite les résultats expérimentaux de l'utilisation de la chaux (C), du Laitier Granulé de haut Fourneau (L) et de leur combinaison sur la variation des paramètres de compactage, de cisaillement et de compression à travers 9 combinaisons étudiées.

D'après la caractérisation physique on a :

- L'analyse granulométrique effectuée sur la vase du barrage de Sidi Yacoub a permis de la classer comme un sol fin d'une granulométrie étalée, avec des sédiments mal à très mal classés, où la courbe dissymétrique avec décalage et classement maximum du côté fin ;
- D'après l'abaque de Casagrande et le système de classification unifiée des sols (USCS) on voit que notre sol étudié est classé en tant qu'un limon très plastique (OH) ;
- Le pH du sol-pouzzolane naturelle augmente considérablement avec l'ajout de la chaux, les valeurs de pH du sol-chaux et sol-chaux-PN restent presque les mêmes.
- Cette étude met en évidence l'effet de la stabilisation à la chaux sur les limites d'Atterberg d'une vase de barrage. L'ajout de chaux entraîne une augmentation de la limite de liquidité (LL) et de la limite de plasticité (LP), mais avec un accroissement plus marqué de la LP, ce qui réduit l'indice de plasticité (IP). Cette évolution est due aux réactions à court terme, telles que l'échange cationique et l'agglomération, qui modifient la structure du sol en le rendant plus granuleux et en améliorant sa résistance au cisaillement ;
- L'ajout de la teneur en chaux augmente à la fois la limite de liquidité et la limite de plasticité, entraînant une diminution considérable de l'indice de plasticité. Avec le

temps de cure, la limite de liquidité et la limite de plasticité continuent à augmenter mais l'indice de plasticité reste presque constant ;

- Selon la classification USCS, le sol initial est une argile très plastique (CH). L'ajout de chaux le fait passer à un limon très plastique (MH), tandis que l'incorporation de laitier modifie sa classification en argile à faible plasticité (CL). Avec 30 % de laitier, le sol évolue vers un limon à faible plasticité (ML). Ces changements de classe résultent principalement de la floculation des particules argileuses et des échanges cationiques induits par les traitements ;
- De l'essai Proctor, la vase du barrage présente une teneur en eau optimale de 20% pour une densité sèche de 1.60 donc on peut conclure que la vase de Sidi Yacoub présente une très faible portance du sol ;
- Les courbes de compactage du sol argileux traité à la chaux conservent leurs forme (pic unique) avec un pull-down vers la droite, ce qui signifie que le MDD a diminué et la OMC a augmenté ;
- L'augmentation de la OMC peut être due à l'augmentation de la capacité de rétention d'eau pour fournir la quantité d'eau nécessaire aux réactions pouzzolaniques se produisant entre les minéraux argileux et la chaux ajoutée ;
- Il est possible d'observer que l'ajout du Laitier aux vases traitées à la chaux a augmenté leur MDD qui produit une structure de sol plus dense. ;
- L'ajout du Laitier granulé à la vase traitée à la chaux produit les meilleurs résultats en termes de résistance au cisaillement.
- Une augmentation supplémentaire des paramètres de cisaillement a été produite avec l'ajout de Laitier à la vase traitée à la chaux.
- Dans l'essai de compression Une augmentation considérable a été particulièrement observée dans la compression du 1jour de la combinaison de C4L30.

Les résultats précédents indiquent que l'ajout du laitier granulé de haut fourneau à une vase traitée à la chaux peut contribuer à améliorer sa maniabilité ainsi que ses propriétés géotechniques. En génie civil, l'utilisation du laitier représente une solution à la fois économique et respectueuse de l'environnement, en raison de son faible coût et de ses émissions réduites de CO₂ par rapport à d'autres liants hydrauliques. Toutefois, les données disponibles sur la stabilisation des vases des barrages à l'aide de laitier demeurent limitées. Il est donc essentiel de poursuivre les recherches sur différents types de sols afin de définir les critères de sélection pour une utilisation optimale du couple chaux-laitier dans les projets de stabilisation.

Références



- Agence Nationale des Barrages et Transfert (A.N.B.T), (2004).** Levées bathymétriques des barrages en exploitation. Rapport sur les barrages.
- Agence Nationale des Barrages et Transfert (A.N.B.T), (2012).** Rapport du barrage de Sidi Yacoub.
- Agence Nationale des Barrages et Transfert (A.N.B.T), (2019).** Rapport du levé bathymétrique du barrage Sidi Yacoub.
- Agence Nationale des Barrages et Transfert (A.N.B.T), (2023).** Rapport de l'envasement des barrages problématique stratégie de lutte et programme d'actions.
- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., & Alcover, J.-F. (2010).** Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C. *Applied Clay Science*, 50(2), 191–198.
- Belahout F., (2021).** Valorisation des sédiments d'envasement du barrage DJORF-TORBA (wilaya de BECHAR), Thèse de Doctorat LMD, Université Ahmed Draia – Adrar.
- Bellara S., Levacher D., Mezazigh S, HidjebM. (2016).** Valorisation des sédiments du barrage de Zardezas (Algérie): Caractérisation et aptitude au compactage des sédiments.
- Benasla M., (2015).** Caractérisation de la vase de dragage du barrage de l'Oued Fodda et valorisation en tant que matériau de construction. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF.
- Cheng, Y., & Huang, X. (2018).** Effect of mineral additives on the behavior of an expansive soil for use in highway subgrade soils. *Applied Sciences*, 9(1), 30.
- Chu, J., Varaskin, S., Klotz, U. and Mengé, P. (2009),** "Construction processes," in 17th International Conference on Soil mechanics and geotechnical engineering, Amsterdam, pp. 3006-3135.
- Demmak A., (1982).** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Pierre et Marie Curie, Paris, France, 323p.
- Diaf N., Hidjeb M., Boudjellal K., Boudiaf M., Lamri I., (2022).** Optimization of the Combined Effect of Lime and Ground Granulated Blast-furnace Slag on Clayey Soil. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING* Vol. 17, Issue 1.

- Driss, A. A, Harichane, K., Ghrici, M (2021).** Effect of natural pozzolana on microstructural behavior and hydraulic conductivity of lime-stabilized clayey soil. *Innovative Infrastructure Solutions* 6:185.
- Driss, A. A, Harichane, K., Ghrici, M (2023).** Effect of lime on the stabilization of an expansive clay soil in Algeria. *Journal of Geomechanics and Geoengineering.* 1(1): 1-10.
- Garzón E., Cano M., O’Kelly BC., Sánchez-Soto PJ., (2016).** Effect of lime on stabilization of phyllite clays. *Applied Clay Science* 123:329–334.
- Harichane, K., Ghrici, M., & Kenai, S. (2018).** Stabilization of Algerian clayey soils with natural pozzolana and lime. *Periodica Polytechnica Civil Engineering,* 62(1), 1-10.
- Islam, S., Hoque, N. M. R., Haque, M. A., Mishra, P. N., Mamun, M. M. H., & Dey, S. (2019).** “Strength development in fine-grained paddy field soil by lime addition”. *Journal of Building Engineering,* 26, 100857.
- Kabir M., Dutta D., Hironaka S., (2011).** Process-based distributed modeling approach for analysis of sediment dynamics in a river basin. *Journal International Hydrology and Earth System Sciences (HESS),* pp 1308-1321.
- KACI M., HABI M., MORSLI B., (2017),** Estimation de l’érosion hydrique par l’application de l’équation universelle de pertes en sol (USLE). Cas du bassin versant non jaugé de l’oued Rhiou, (Bassin de Cheliff) Algérie. *Geo-Eco- Trop,* vol. 41, no 3, p. 503-518.
- Khushbu S. Gandhi, Shruti J. Shukla. (2019).** Durability of Commercial Waste Bagasse Ash And Ground Granulated Blast Furnace Slag Stabilized High Plastic Clay. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878, Volume-8 Issue-3.*
- Liu, Y., Wang, Q., Liu, S., ShangGuan, Y., Fu, H., Ma, B., ... Yuan, X. (2019).** Experimental investigation of the geotechnical properties and microstructure of lime-stabilized saline soils under freeze-thaw cycling. *Cold Regions Science and Technology,* 161, 32–42.
- OUIDIR K. (2012).** Barrages d’Ighil emda et Erraguene (Est Algérie) : Mécanismes et soutirages des sédiments. Mémoire de Magister en Hydraulique. Université Abderrahmane Mira-Bejaia.
- Padmaraj D., Chandrakaran PG. (2017).** Stabilisation of soft clay using ground granulated blastfurnace slag and lime. Sixth Indian Young Geotechnical Engineers Conference 6IYGEC2017 10-11 March 2017, NIT Trichy, India.
- REMINI.B, (2011),** Une nouvelle approche de lutte contre l’envasement des barrages, la technique des obstacles émerge, *Larhyss Journal,* ISSN 1112-3680, n° 09, pp. 43- 53.
- Remini B., Bensafia D., Mekhatri A. (2018).** Sidi M’hamed Ben Aouda’s Dam (Algeria): Acceleration to the Silting! *Larhyss Journal,* ISSN 1112-3680, n°33, Mars 2018, pp. 221-252

Remini.B, Bensafia D., (2016). Envasement des barrages dans les régions arides exemples algériens. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°27, pp. 63-90.

Roose E., (2004), Georges. Recherches sur l 'érosion hydrique en Afrique : revue et perspectives. Science et changements planétaires/sécheresse, vol. 15, no 1, p. 121-129.

Rosone, M., Celauro, C., & Ferrari, A. (2018). Microstructure and shear strength evolution of a lime-treated clay for use in road construction. International Journal of Pavement Engineering, 21(9), 1147–1158.

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(1), 105-113.

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.