

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
بلحاج بوشعيب جامعة عين تموشنت
Université–Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Génie Civil et Travaux Publics



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie civil
Filière : Génie civil
Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Thème

Formulation d'un mortier de terre stabilisé pour le revêtement mural

Réalisé Par :

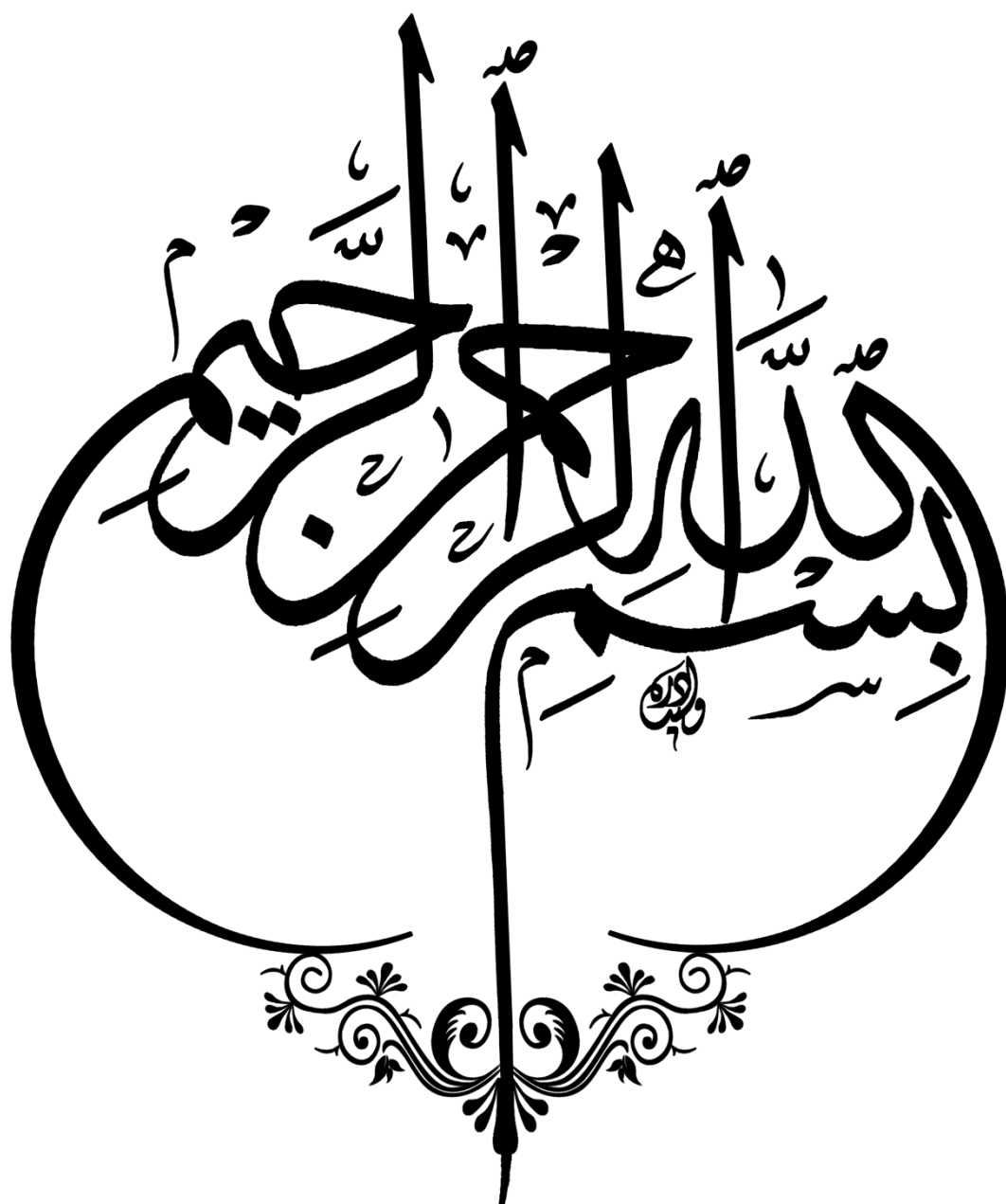
BOUDJANI Habiba

BEN HAMADA Mohamed

Soutenu publiquement, le 27/06/2026, devant le jury composé de :

Dr. SAID.A	MCB	Président	Université d'Ain Temouchent
Dr. DOUNANE .N	MCB	Examinatrice	Université d'Ain Temouchent
Dr. CHALABI.Y	MCB	Encadrant	Université d'Ain Temouchent
M. KEDDOU.A	Ingénieur de laboratoire	Co-Encadrant	Université d'Ain Temouchent

Année Universitaire 2025/2026



Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier Allah le Tout-Puissant de m'avoir donné la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à mon encadrant, **Dr. Chalabi Yousseuf**, pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire. Mes sincères remerciements s'adressent également à mon co-encadrant, **M. keddou adel**, pour son aide, ses orientations et ses remarques pertinentes qui ont contribué à l'amélioration de ce travail. Je remercie également l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil pour les connaissances et les compétences qu'ils nous ont transmises durant notre parcours universitaire. Enfin, j'adresse mes plus vifs remerciements à ma famille et à toutes les personnes qui m'ont soutenue et encouragée de près ou de loin durant la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

*Avec tous nos sentiments de respect,
avec l'expérience de ma reconnaissance,
nous dédions ce modeste travail :*

*Á nos très chers parents, pour leur
amour, leur sacrifices, leur soutien et leur
encouragements tous au long de mon
parcours. Que dieu les protège et les
comble de bonheur.*

*Á nos frères et sœurs, pour leur affection
et leur présence à nos côtés*

*Á nos encadrants, pour leurs précieux
conseils, leur disponibilité et leur
accompagnement durant la réalisation de
ce mémoire.*

*Á nos amis et collègues , pour les
moments partagés et leur soutien.*

Habiba et Mohamed

Résumé

Ce mémoire de Master est consacré à l'étude de la formulation et de la stabilisation de mortiers de terre crue destinés à être utilisés comme revêtements muraux dans le secteur de l'éco-construction. L'objectif principal est de pallier la faible durabilité à l'eau et l'instabilité dimensionnelle de la terre crue en valorisant des ressources locales de la région. Le programme expérimental a consisté à caractériser une argile marneuse de Remchi et un sable fin d'El Bouihi, puis à formuler différentes matrices terre-sable soumises à trois types de traitement : sans ajout, stabilisées à 5% de chaux, et stabilisées par un couple binaire à 5% de chaux + 5% de pouzzolane.

Les résultats à l'état frais montrent que l'association chaux-pouzzolane permet de contrôler efficacement le retrait plastique. À l'état durci (après 28 jours), les essais mettent en évidence un optimum textural remarquable pour la formulation composée de 45% d'argile, 45% de sable, 5% de chaux et 5% de pouzzolane. Cet éco-matériau optimisé affiche une résistance à la compression maximale de 3,12 MPa, un retrait de séchage réduit à 0,90%, et une excellente résistance à l'abrasion. De plus, face à l'action de l'eau, alors que les séries témoins (0% ajout) se dissolvent instantanément, la formulation chaux-pouzzolane préserve une parfaite intégrité physique et géométrique grâce au développement des produits de la réaction pouzzolanique. Enfin, la caractérisation thermique révèle une faible conductivité thermique, conférant à cet enduit d'excellentes propriétés isolantes. Ce travail valide ainsi scientifiquement une formulation de mortier de terre à la fois durable, résistante et écologique.

Mots-clés : Terre crue, Mortier de revêtement, Stabilisation, Chaux, Pouzzolane, Propriétés mécaniques, Durabilité à l'eau, Propriétés thermique.

Abstract

This Master's thesis is devoted to the study of the formulation and stabilization of raw earth mortars intended for use as wall coatings in the eco-construction sector. The main objective is to overcome the low water durability and dimensional instability of raw earth by valorizing local resources from the region. The experimental program consisted of characterizing a marly clay from Remchi and a fine sand from El Bouihi, then formulating different earth-sand matrices subjected to three types of treatment: without addition, stabilized with 5% lime, and stabilized with a binary mixture of 5% lime + 5% pozzolan.

The results in the fresh state show that the lime-pozzolan combination effectively controls plastic shrinkage. In the hardened state (after 28 days), the tests highlight a remarkable textural optimum for the formulation composed of 45% clay, 45% sand, 5% lime, and 5% pozzolan. This optimized eco-material exhibits a maximum compressive strength of 3.12 MPa, a reduced drying shrinkage of 0.90%, and excellent abrasion resistance. Furthermore, when exposed to water, while the control series (0% addition) dissolve instantly, the lime-pozzolan formulation maintains perfect physical and geometrical integrity due to the development of pozzolanic reaction products. Finally, thermal characterization reveals low thermal conductivity, conferring excellent insulating properties to this coating. This work thus scientifically validates a raw earth mortar formulation that is durable, resistant, and ecological.

Keywords : Raw earth, Coating mortar, Stabilization, Lime, Pozzolan, Mechanical properties, Water durability, Thermal properties.

ملخص

هذه المذكرة الخاصة بشهادة الماستر مكرسة لدراسة تركيب وتثبيت ملاط التربة الخام المعد لاستخدامه كطلاءات جدارية في قطاع البناء البيئي (الإيكولوجيا). الهدف الرئيسي هو التغلب على ضعف متانة التربة الخام تجاه الماء وعدم استقرارها الأبعادي، وذلك من خلال تثمين الموارد المحلية في المنطقة. تضمن البرنامج التجريبي توصيف طين مارني من منطقة رَمْشِي ورمل ناعم من منطقة البويجي، ثم تركيب خلطات مختلفة من التربة والرمل خضعت لثلاثة أنواع من المعالجات: بدون إضافات، ومثبتة بـ 5% جير، ومثبتة بخليط ثنائي من 5% جير + 5% بوزولان.

أظهرت النتائج في الحالة الطرية أن دمج الجير مع البوزولان يسمح بالتحكم الفعال في الانكماش اللدن. في الحالة الصلبة (بعد 28 يوماً)، كشفت الاختبارات عن وجود أمثلية نسيجية ملحوظة للخلطة المكونة من 45% طين، 45% رمل، 5% جير، 5% بوزولان. هذه المادة البيئية المثلى أظهرت مقاومة قصوى للضغط تبلغ 3.12 ميغاباسكال، وانكماشاً جفافياً مخفضاً إلى 0.90%، ومقاومة ممتازة للبري. بالإضافة إلى ذلك، عند التعرض للماء، وبينما تتفكك العينات المرجعية (بدون إضافات) فوراً، فإن خلطة الجير والبوزولان تحافظ على سلامة فيزيائية وهندسية تامة بفضل تطوّر نواتج التفاعل البوزولاني. أخيراً، أظهر التوصيل الحراري قيمة منخفضة، مما يمنح هذا الطلاء خصائص عزل ممتازة. وبالتالي، فإن هذا العمل يثبت علمياً خلطة ملاط تربة خام متينة ومقاومة وبيئية في آن واحد.

الكلمات المفتاحية: تربة خام، ملاط طلاء، تثبيت، جير، بوزولان، خواص ميكانيكية، متانة تجاه الماء، خواص

حرارية.

Table des matières

Contenu	Page
Remerciement	I
Dédicaces	I.
Résumé	II.
Table des matières	III.
Liste des tableaux	IV.
Liste des figures	V.
CHAPITRE I : Généralités sur la construction en terre	
1. Introduction	2
2. La terre	4
2.1 Définition	4
2.2 Limites de la terre crue	4
3. Terre stabilisée	6
3.1 Liants	6
3.1.1 Chaux	6
3.2 Stabilisation au ciment	7
3.2.1 Mécanisme de stabilisation au ciment	8
3.3 Stabilisation à la chaux	9
3.3.1 Le mécanisme à la chaux	9
3.4 Réactions pouzzolaniques	10
4. Propriétés de la terre stabilisée	11
4.1 Propriétés physiques	11
4.2 Propriétés mécaniques	12
4.3 Propriétés thermiques	15
4.4 Propriétés hygrothermiques	17
5. Enjeux de la stabilisation de la terre	17
Conclusion	20
CHAPITRE II : Matériaux et identifications	
1. Introduction	22
2. Matériaux utilisés	22
3. Essais d'identification	23
3.1 Essais sur argile	24
3.1.1 Analyse granulométrique par sédimentation	24
3.1.2 Limites d'Atterberg	25
3.1.2.1 Argile et la charte de plasticité	27
3.1.3 Bleu de méthylène	28
3.1.4 Poids volumique des grains solides	29
3.1.5 Masse volumique apparente	30
3.1.6 Mesure de la teneur en carbonate de calcium CaCO_3	30

Contenu	Page
3.2 Essais sur sable	31
3.2.1 Analyse granulométrique	31
3.2.1.1 Coefficient d'uniformité et de courbure	33
3.2.1.2 Le module de finesse	33
3.2.2 Poids volumique des grains solides	34
3.2.3 Masse volumique apparente	35
3.2.4 Bleu de méthylène	35
3.2.5 <i>Équivalent de sable</i>	36
3.2.6 Mesure de la teneur en carbonate de calcium CaCO_3	37
3.3 Synthèse et dénomination des matériaux utilisés	38
4. Conclusion	38
CHAPITRE III : Étude expérimentale sur mortier	
1. Introduction	40
2. Préparation des échantillons	40
3. Choix des matériaux	40
4. Préparation des mélanges secs	41
5. Choix de la teneur en eau de mélange	42
6. Les essais sur les mortiers à l'état frais	43
6.1 Essai de retrait des mortiers frais par l'extensomètre	43
6.2 Essai de perte de masse	45
6.3 Essai de stabilité	47
7. Les essais sur les mortiers à l'état durci	47
7.1 Essai de retrait	48
7.2 Essai goutte-à-goutte	50
7.3 Essai de résistance à l'abrasion	51
7.4 Essai d'absorption capillaire	53
7.5 Essai d'absorption totale	56
7.6 Conductivité thermique	57
7.7 Capacité thermique	58
7.8 Diffusivité thermique	59
7.9 Résistivité thermique	60
7.10 Résistance à la compression	61
7.11 Résistance à la traction par flexion	62
8. Conclusion	63
Conclusion générale	65
Références bibliographiques	67

Liste des tableaux

N°	Intitulé	Page
Tableau I.1	Comparaison des coûts de construction des matériaux	6
Tableau I.2	Résistance à la compression des matériaux en terre stabilisée	14
Tableau I.3	Méthodes de caractérisation des propriétés thermiques des matériaux	16
Tableau I.4	Propriétés hygrothermiques des matériaux de construction	19
Tableau II.1	Essais effectués sur les matériaux étudiés	24
Tableau II.2	Essai de sédimentation pour l'argile	24
Tableau II.3	Résultats de l'essai des limites d'Atterberg	27
Tableau II.4	Classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène	28
Tableau II.5	Poids volumique des grains solides pour l'argile	30
Tableau II.6	Masse volumique apparente de l'argile	30
Tableau II.7	Résultats de la teneur en carbonate de calcium pour l'argile	31
Tableau II.8	Analyse granulométrique par tamisage NF EN 933-1	32
Tableau II.9	Résultats de la granulométrie	33
Tableau II.10	Nature du sable selon le module de finesse	34
Tableau II.11	Poids volumique des grains solides pour le sable	34
Tableau II.12	Masse volumique apparente du sable	35
Tableau II.13	Qualité du sable selon les valeurs d'équivalent de sable	37
Tableau II.14	Les résultats de l'équivalent de sable	37
Tableau II.15	Résultats de la teneur en carbonate de calcium pour le sable	38
Tableau III.1	Formules adoptées dans cette recherche	42
Tableau III.2	Teneur en eau adoptée pour les différentes formulations	43
Tableau III.3	Régression linéaire de la masse des éprouvettes en fonction de la teneur en l'argile	46
Tableau III.4	Relation entre profondeur des piqûres et indice d'érodabilité	51

Liste des figures

N°	Intitulé	Page
Figure I.1	Shibam au Yémen	2
Figure I.2	l'arche de Ctésiphon en Irak	2
Figure I.3	le palais du potala au tibet en chine.	3
Figure I.4	Chan-Chan au pétion	3
Figure I.5	Coupe de la couche superficielle de la terre	4
Figure I.6	Schéma des processus de transformation de la chaux	7
Figure I.7	Variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de chaux par poids	10
Figure I.8	Classement des valeurs de MBV des matériaux de construction	18
Figure II.1	Sable	22
Figure II.2	Argile	22
Figure II.3	Localisation du gisement du sable d'El Bouihi (Tlemcen)	23
Figure II.5	Analyse granulométrique par sédimentation pour l'argile	25
Figure II.6	Schéma des processus de transformation de la chaux	25
Figure II.7	Comportement des sols fins avec la variation de la teneur en eau ($\omega\%$)	26
Figure II.8	Essai de limites d'Atterberg (UBBAT)	26
Figure II.9	Courbe de la limite de liquidité	27
Figure II.10	Charte de plasticité	27
Figure II.11	Essai au bleu de méthylène pour l'argile (UBBAT)	29
Figure II.12	Détermination de la masse volumique des grains solides pour l'argile	29
Figure II.13	Détermination de la masse volumique apparente de l'argile	30
Figure II.14	Détermination de la teneur en carbonate de calcium dans l'argile	31
Figure II.15	Série de tamis de l'analyse granulométrique pour le sable	32
Figure II.16	Analyse granulométrique par tamisage pour le sable	33
Figure II.17	Détermination de la masse volumique des grains solides pour le sable	34
Figure II.18	Détermination de la masse volumique apparente du sable	35
Figure II.19	Essai au bleu de méthylène pour le sable (GICA Ain Temouchent)	36
Figure II.20	Essai d'équivalent de sable	36
Figure II.21	Détermination de la teneur en carbonate de calcium dans le sable	37
Figure III.1	Table à secousses	43
Figure III.2	Déformation des mortiers frais en fonction de la teneur en argile pour les différentes formulations	44
Figure III.3	Essai d'extensomètre	45
Figure III.4	Variation de la masse des éprouvettes en fonction de la teneur en argile pour les différentes formulations	46
Figure III.5	Variation de la masse des éprouvettes issue de la régression linéaire pour les différentes formulations	46

N°	Intitulé	Page
Figure III.6	Essai de stabilité	47
Figure III.7	Éprouvettes démoulées et stockées à l'air libre	48
Figure III.8	Les mortiers dans l'étuve	48
Figure III.9	Essai de retrait	49
Figure III.10	Évolution de la déformation due au retrait en fonction du temps	49
Figure III.11	Principe de l'essai de goutte-à-goutte	50
Figure III.12	Essai de résistance à l'érosion (essai de goutte-à-goutte)	51
Figure III.13	Essai de résistance à l'abrasion	52
Figure III.14	Évolution du coefficient d'abrasion en fonction de la teneur en argile pour les différentes formulations	52
Figure III.15	Essai d'absorption capillaire	54
Figure III.16	Variation du coefficient d'absorption capillaire en fonction du temps pour la formule 5 % chaux et 5 % pouzzolane	55
Figure III.17	Coefficient d'absorption capillaire à 10 min pour la formule 5 % chaux et 5 % pouzzolane	56
Figure III.18	Essai d'absorption totale pour la formulation 0 % ajout et la formulation 5 % chaux	57
Figure III.19	Essai d'absorption totale pour la formulation 5 % chaux et 5 % pouzzolane	57
Figure III.20	Conductivité thermique en fonction de la teneur en argile pour les différentes formulations	57
Figure III.21	Capacité thermique en fonction de la teneur en argile pour les différentes formulations	58
Figure III.22	Diffusivité thermique en fonction de la teneur en argile pour les différentes formulations	59
Figure III.23	Résistivité thermique en fonction de la teneur en argile pour les différentes formulations	60
Figure III.24	Évolution de la résistance à la compression pour les différentes formulations (A, B, C) et essai de compression (D)	61
Figure III.25	Évolution de la résistance à la traction par flexion pour les différentes formulations (A, B, C) et essai de traction par flexion (D)	63

Introduction générales

Le secteur du bâtiment et des travaux publics fait face aujourd'hui à un défi majeur : concilier le développement des infrastructures avec les impératifs de la transition écologique et du développement durable. Dans ce contexte, la terre crue suscite un regain d'intérêt international remarquable. Matériau millénaire, local, recyclable et doté d'une faible empreinte carbone, la terre offre également d'excellentes propriétés de régulation hygrothermique pour le confort du bâti. Cependant, l'utilisation de la terre crue à l'état naturel, notamment sous forme de mortiers de revêtement ou d'enduits, se heurte à des limites techniques intrinsèques qui freinent son homologation à grande échelle. Sa faible résistance mécanique initiale, sa sensibilité marquée au retrait plastique lors du séchage et, surtout, sa vulnérabilité critique face à l'eau (perte de cohésion, érosion, défragmentation) constitue des verrous technologiques majeurs. Pour pallier ces faiblesses sans dénaturer l'atout écologique du matériau, la stabilisation physico-chimique s'impose comme une voie d'étude privilégiée. Si l'usage de liants traditionnels comme le ciment ou la chaux est courant, l'association de la chaux avec des ajouts pouzzolaniques locaux représente une alternative technico-économique et environnementale hautement prometteuse. L'objectif principal de ce travail de mémoire de Master est d'étudier la faisabilité de formulation, la caractérisation et l'optimisation d'un mortier de terre stabilisé, destiné à être utilisé comme revêtement mural. La démarche scientifique s'articule autour de la valorisation de matières premières locales de la région de Tlemcen : une argile marneuse de Remchi et un sable fin d'El Bouihi. L'originalité de l'approche repose sur l'évaluation comparative de l'impact d'une stabilisation binaire combinant la chaux et la pouzzolane sur les performances à l'état frais et durci de différentes matrices terre-sable. Pour répondre à cette problématique, notre mémoire est structuré en trois chapitres fondamentaux :

- Le Chapitre I : présente une synthèse bibliographique approfondie sur le matériau terre, ses techniques de mise en œuvre, ses limites actuelles, ainsi que les mécanismes physico-chimiques de la stabilisation par les liants minéraux et les réactions pouzzolaniques.
- Le Chapitre II : est dédié à l'identification et à la caractérisation complète des propriétés physiques, géotechniques et minéralogiques des matières premières utilisées (argile, sable).
- Le Chapitre III : expose le protocole expérimental de formulation des mortiers (séries à 0% d'ajout, 5% de chaux, et 5% chaux + 5% pouzzolane) et présente une analyse détaillée de l'évolution de leurs performances mécaniques, physiques, thermiques et de durabilité face à l'eau.

CHAPITRE I

Généralité sur la construction en terre

1 Introduction

La terre constitue sans conteste l'un des matériaux naturels les plus accessibles et abondants au monde. Longtemps utilisée par de nombreuses civilisations pour bâtir des habitations, la terre crue est aujourd'hui relativement délaissée. Pourtant, elle présente de multiples avantages et peut être exploitée à travers diverses techniques de construction. Par définition, la construction en terre crue repose sur l'utilisation de la terre comme matériau principal, souvent associée à d'autres éléments tels que le sable ou la paille. Ce mode de construction n'est propre à aucune région spécifique : il a été largement adopté dans différentes parties du monde, notamment dans les pays arabes, en Asie, en Afrique et en Europe, où les populations ont érigé maisons et abris grâce à ce matériau. Utilisée depuis des millénaires, la terre figure parmi les plus anciens matériaux de construction de l'histoire humaine. Les découvertes archéologiques en témoignent, révélant que les civilisations perse, assyrienne, égyptienne et babylonienne ont réalisé de nombreux édifices en terre, dont certains de grande envergure, tels que **Shibām** au Yémen **fig I.1**, l'arche de Ctésiphon en Irak **fig I.2**, le palais du Potala au Tibet en Chine **fig I.3** ou encore la cité précolombienne de Chan Chan au Pérou **fig I.4**. Ainsi, les sites archéologiques construits en terre sont présents sur l'ensemble des continents habités, ce qui s'explique par le fait que « la terre est l'un des trois matériaux premiers, au même titre que la pierre et le bois » **[1]**



Fig I.1 :Shibām au Yémen



FigI.2 :l'arche de Ctésiphon en Irak



Fig I.3 : le palais du potala au tibet en chine.



Fig I .4 :Chan-Chan au pétion

2 la terre

2.1 Définition

La terre est un matériau granulaire composé de grains minéraux de différentes dimensions. Les couches superficielles de la terre, humus et terre végétales, sont composées de grains mais également de matières organiques en décomposition, impropres à la construction [2,3].

Ces matières organiques sont issues de l'activité des espèces vivantes, animales, végétales ou d'autres phénomènes. Il est recommandé d'employer les couches inférieures de la terre afin de prévenir les éventuels désordres liés à leur présence (**Figure I.5**).

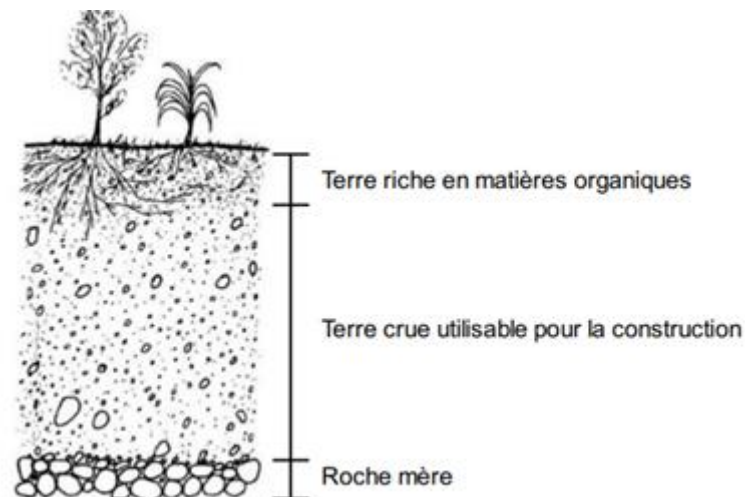


Figure I.5: Coupe de la couche superficielle de la terre [4]

2.2 Limites de la terre crue

Les matériaux en terre crue ont des propriétés thermiques et hygrothermiques pouvant contribuer à la performance des enveloppes et au confort des utilisateurs. Cependant, leur faible résistance mécanique les limite généralement à un emploi semi-structurel, en remplissage d'une structure porteuse dont ils complètent les propriétés [5,6]. De plus, la terre crue a une très faible durabilité à l'eau, ce qui entraîne des contraintes de conception [7]. Ainsi l'emploi des matériaux en terre est aujourd'hui rare et complexe à cause de problématiques qui leurs sont propres [2].

Le premier frein à la construction en terre est le risque de présence d'éléments dangereux pour notre santé et non inertes dans leur composition. En effet, la terre peut être polluée de manière artificielle par les activités humaines (hydrocarbures, engrais). Elle peut également contenir naturellement des espèces dangereuses pour les êtres vivants comme du plomb ou de l'arsenic [8]. Des essais comme la lixiviation selon la norme **NF EN 12457- 2** doivent être systématiquement réalisés lors de l'emploi d'une nouvelle terre [9]. Les terres inertes, pouvant être propres à la construction, sont stockées dans des Installations de Stockage des Déchets Inertes (ISDI) sur le territoire français. Il est également nécessaire de caractériser les propriétés mécaniques, thermiques et hygrothermiques en fonction de la terre et de la technique employée

afin de pouvoir concevoir un projet et faire valider son permis de construire [5]. L'état de l'art développé précédemment met en lumière la grande variabilité des propriétés d'usages des matériaux en terre. Ces différents essais de caractérisation imposent des coûts inévitables ainsi que des délais incompressibles dus à leur réalisation par des laboratoires agréés.

Les techniques de construction en terre nécessitent des artisans qualifiés qui se sont raréfiés avec l'abandon progressif de ces modes constructifs depuis la révolution industrielle. Du fait de leurs résistances mécaniques basse, une mauvaise mise en œuvre de techniques comme le pisé, le torchis ou la bauge est dangereuse pour l'intégrité de la structure et donc pour ses utilisateurs. Le pisé est particulièrement décrit comme une technique éprouvante par les témoignages de professionnels de la terre [10]. Bien que plus accessible que les autres techniques, la mise en œuvre de matériaux préfabriqués comme l'adobe ou la BTC est plus contraignante que la maçonnerie avec des matériaux en béton de ciment. Ces briques de terres sont généralement plus lourdes et plus fragiles. Elles sont donc plus difficiles à manipuler que des parpaings.

La terre est un béton naturel aux propriétés uniques de par la présence d'argiles. Cependant, contrairement aux liants industriels à activation hydraulique comme les ciments, les argiles obtiennent généralement leurs propriétés liantes au terme de leur séchage, après avoir été hydratés lors de la mise en œuvre. Cette étape de séchage entraîne un délai incompressible retardant la mise en charge des structures en terre et limitant le rendement lors de sa mise en œuvre. En effet, la bauge nécessite un séchage allant jusqu'à trois semaines, pour une levée allant jusqu'à 100 cm et une épaisseur allant jusqu'à 120 cm (Guide bonnes pratiques ARPE). Le pisé nécessite plusieurs jours entre chaque couche, pour des levées de 80 à 100 cm [11]. Enfin, les BTC ont une levée maximale de 100 à 150 cm en fonction de leur épaisseur (10 à 15 cm) [6], ce qui représente 10 à 15 rangées de briques d'environ 10 cm de hauteur. Ces contraintes de mise en œuvre imposent un rendement plus faible que les techniques de constructions industrielles comme la maçonnerie en parpaing de ciment, le coulage de voiles en béton de ciment ou encore l'assemblage In Situ d'éléments préfabriqués. De ce fait, elles ne peuvent pas répondre aux cahiers des charges de la majorité des chantiers d'aménagement des constructeurs. La largeur des murs en pisé ou en bauge rend également impossible leur emploi dans des zones denses comme les grandes villes, où il est nécessaire d'optimiser l'épaisseur des enveloppes. Ces techniques sont cependant adaptées aux petits chantiers ou aux projets collaboratifs avec des contraintes temporelles et spatiales plus souples.

Les délais et coûts de caractérisation des terres, la difficulté à trouver des artisans qualifiés et le faible rendement des techniques de construction en terre ont pour conséquence un coût de mise en œuvre plus élevé que les techniques de constructions industrielles (**Tableau I.1**). Les apports thermiques et hygrothermiques de la terre peuvent néanmoins contribuer aux économies énergétiques des ouvrages et réduire leur coût global. Cependant le coût de construction élevé rend le matériau difficile à employer.

Tableau I.1 : Comparaison des coûts de construction des matériaux [2 ;5]

Matériaux	BTC	Pisé	Parpaing béton
Coût au m ² (euros)	250-500	500-700	120-150

L'état de l'art met en lumière la corrélation pouvant exister entre les propriétés des matériaux en terre. La modification d'une propriété physique, mécanique, thermique ou hygrothermique peut entraîner l'évolution des autres propriétés [12]. Les argiles apportent au squelette granulaire de la terre une porosité provoquant une diminution de la masse volumique, de la conductivité thermique et de la résistance à la vapeur d'eau.

Cependant, bien que les propriétés des argiles permettent une cohésion naturelle des grains dans certaines conditions, les propriétés mécaniques des matériaux en terre crue ainsi que leur durabilité restent faibles par rapport aux autres matériaux de construction. Cette résistance mécanique peut néanmoins être améliorée en augmentant la compacité et donc la masse volumique ainsi que les forces de frictions internes, entraînant une augmentation de la conductivité thermique et de la résistance à la vapeur d'eau [2].

Afin de contribuer au développer et à la généralisation de la construction en terre, il est nécessaire de créer des outils scientifiques pour caractériser les terres et leurs propriétés ainsi que des solutions industrielles pour répondre aux problématiques de mise en œuvre, de rendement et de coût afin de pouvoir utiliser ces matériaux à différentes échelles industrielles.

3. Terre stabilisée

La stabilisation de la terre désigne l'ajout d'un liant (minéral ou organique) à la terre lors de la confection ou la mise en œuvre d'un matériau. Ce procédé peut permettre d'améliorer les propriétés mécaniques, la durabilité et l'ouvrabilité des matériaux en terre [7 ;5]. L'augmentation de la teneur en liant permet d'élargir le spectre des terres pouvant être employées en augmentant leur résistance. De tels matériaux peuvent être nommés « terre stabilisée », ou « béton de terre ». A l'instar des bétons de ciment, ils sont composés d'un squelette granulaire dont la cohésion est principalement assurée par les liens formés par les hydrates issus de la réaction du liant.

3.1. Liants

3.1.1. Chaux

La chaux ou oxyde de calcium (CaO) est une espèce minérale obtenue par la calcination du calcaire (CaCO₃) à 900°C :



La chaux désigne communément les produits obtenus à partir de la calcination de roches calcaires pouvant être également argileuses (**Figure I.6**) Leurs propriétés sont exploitées dans différents domaines dont le BTP. L'hydratation de la chaux vive CaO entraîne une réaction exothermique formant de l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) ou Portlandite. Ce matériau est nommé chaux éteinte ou chaux hydraulique lorsque le calcaire utilisé lors de la

calcination est argileux. Elle produit alors des silicates et des aluminates en plus de l'oxyde de calcium qui permettent l'hydraulicité de ce produit :



La chaux éteinte peut être utilisée en tant qu'enduit, mortier ou béton en fonction des grains avec lesquels elle est mélangée. Après leur mise en œuvre, la chaux présente dans ces produits se transforme en calcaire par carbonatation au contact du CO_2 présent dans l'air environnant :



La chaux est largement employée pour la stabilisation des sols. Elle permet la floculation et l'agglomération des particules d'argiles et peut provoquer des réactions pouzzolaniques sur le long terme.

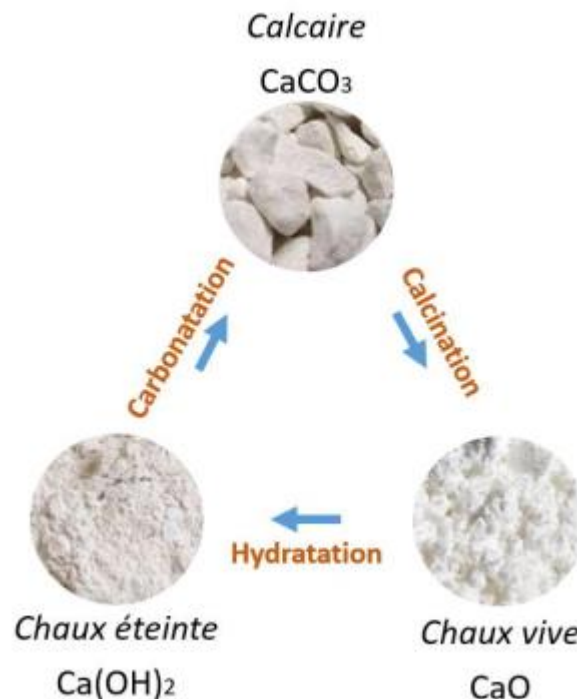


Figure I.6 Schéma des processus de transformation de la chaux

3.2 Stabilisation au ciment

La technique d'amélioration des caractéristiques mécaniques de la terre par les liants minéraux est utilisée depuis 1920 en Allemagne et 1935 aux Etats Unis. Dans le secteur routier, les tentatives de stabilisation par le ciment remontent à 1952 aux USA avec un élargissement aux routes et pistes d'aérodromes. La maîtrise de la technique de stabilisation de la terre par les liants minéraux, permet de couvrir tout le domaine de génie civil [14]. L'utilisation de tous les ciments normalisés dans la construction donne de bons résultats [15].

Compte tenu de la résistance demandée, on peut employer la classe de résistance qui convient le mieux. Par contre, Doat [16] propose un type de ciment en fonction de la nature du sol. L'utilisation de ciment riche en alite ($C_3 S$) et bélite ($C_2 S$) convient mieux aux sols argileux. Ces types de ciments donnent, après hydratation, beaucoup de Portlandite $Ca(OH)_2$. Verdeyen [17] propose pour ce type de ciment une terre dont la teneur en argile n'excède pas 20 à 30% ($IP < 25 \%$)

3.2.1. Mécanisme de stabilisation au ciment

Le ciment est constitué de plusieurs éléments. Dont les quatre principaux sont :

1. le silicate tricalcique ou alite ($SiO_2 - 3CaO$) ;
2. le silicate bicalcique ou belite ($SiO_2 - 2CaO$) ;
3. L'aluminate tricalcique ou aluminate ($Al_2O_3 - 3CaO$) ;
4. Ferro-aluminate tetracalcique ou Ferrite ($Al_2O_3 - Fe_2O_3 - 4CaO$).

Ces composés sont désignés en notation cimentière respectivement par : C_3S ; C_2S ; C_3A et $C_4 AF$. Les constituants secondaires sont la chaux libre (CaO), les sulfates de sodium et de potassium ($NaSO_4$ et K_2SO_4) [18].

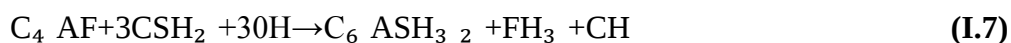
Suivant la teneur de ces constituants, les propriétés du ciment changent. Pour illustration, avec une forte teneur en C_3S , le ciment présente une résistance mécanique élevée, par contre un ciment possédant une forte teneur en C_3A , se caractérise par une faible résistance à l'action des eaux agressives. Lorsque le mélange avec le sol est réalisé, le ciment va se dissoudre et s'hydrate si la quantité d'eau est suffisante pour former des constituants hydratés. La principale réaction provient de l'hydratation des deux silicates de calcium (C_3S et C_2S) qui forment deux nouveaux composés ; la portlandite (CH) et le silicate de calcium hydraté ($C-S-H$: $3CaO.2SiO_2.3H_2O$) :



En fonction du taux de gypse dans le ciment, les aluminates tricalciques (C_3A) sont hydratés. L'étringite est formé en présence de gypse et elle joue un rôle moteur dans l'amélioration de la résistance :



Les CA réagissent avec l'eau pour former des C_4AH_{13} , C_2AH_8 , et des C_3AH_6 en l'absence de gypse. C_4AH_{13} et C_2AH_8 sont instables. « Sous l'action de la chaleur d'hydratation, ils se transforment en C_4AH_8 » Une réaction se produit par la phase ferrite (C_4AF) en présence de gypse pour produire de l'étringite suivant la réaction :



La réaction du ciment dépend de la granulométrie et de la minéralogie du sol à traiter. Pour les sols à éléments grossiers, le ciment couvre les grains pour les assembler et former un bloc

résistant [17]. La réaction se produit entre le ciment et la terre ou bien entre les différents constituants du ciment [19]. Pour le matériau cohérent, une quantité importante de particules sont plus petites que les grains de ciment, « donc elles ne peuvent pas être couvertes par le ciment [20] ». Par ailleurs, le compactage du mélange pourra améliorer la résistance du composite. La résistance croît de plus en plus au fur et à mesure que l'hydratation avance.

3. 3 Stabilisation à la chaux

Comme le ciment, la chaux a joué aussi un rôle dans la stabilisation des matériaux de construction depuis très longtemps. Elle fut employée par les Romains et d'autres anciennes civilisations pour stabiliser la chaussée des pistes [21].

La chaux est obtenue par calcination d'un mélange de calcaire et d'argile à une température qui avoisine 1000 °C. Il existe deux types de chaux :

- La chaux vive est obtenue par incinération du calcaire plus ou moins pure. Il s'agit de l'oxyde de calcium (CaO) (**équation I.8**).



- La chaux aérienne ou chaux éteinte quant à elle provient de la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est appelée aérienne parce qu'elle se durcit en présence de l'air. La chaux aérienne est constituée surtout d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) (**équation I.9**).

$$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 \quad (\text{I.9})$$
- La chaux hydraulique contrairement à la chaux aérienne agit en présence d'eau. Elle provient de la calcination d'un calcaire surtout argileux.

Tous les types de chaux peuvent être utilisées pour la stabilisation du matériau terre [16]. Son utilisation est conseillée pour les sols contenant 20% d'argile et les sols qui ont IP > 17% et LL > 40%. La chaux éteinte est privilégiée par rapport à la chaux vive. Cette dernière présente des défauts tels que : la conservation est difficile face à l'humidité avant son utilisation et la manipulation est également pénible lors des préparations de mélanges [22]. La résistance d'un sol riche en kaolinite croît avec la teneur en chaux. Par contre pour un sol riche en illite, c'est à partir de 5% de chaux que les résultats sont satisfaisants à moyen et long terme [23].

3. 3.1 Le mécanisme à la chaux

Les réactions qui vont se produire lors d'une stabilisation à la chaux sont : l'échange cationique, la floculation et l'agglomération d'argiles, la carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques entre la chaux, la silice et l'alumine [24-26]. Tout d'abord les deux premières réactions se produisent pour augmenter la plasticité, la maniabilité et aussi la résistance du sol. Ces réactions réduisent nettement l'indice de plasticité. Cette phase constitue la période de modification du sol (**figure I.7**).

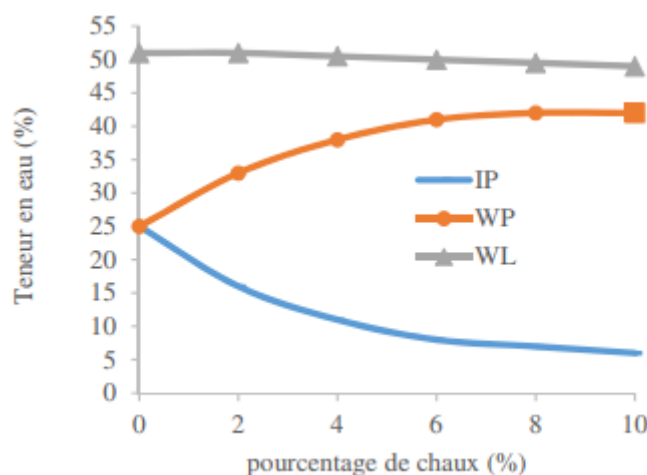
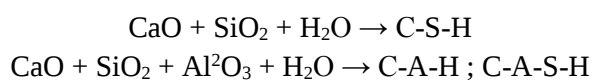


Figure I.7 : variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de chaux par poids [27]

La phase suivante représente la stabilisation qui regroupe la troisième et la quatrième réaction. C'est la période de cimentation avec augmentation progressive de la résistance au cisaillement et de la durabilité du sol. La température joue un rôle prépondérant dans la stabilisation des sols par la chaux. Une température inférieure à 13 °C ralentit le processus de stabilisation. Par contre une température plus élevée l'accélère [28]. La teneur en eau diminue avec l'utilisation de la chaux vive. Elle est due à la réaction exothermique qui produit une forte chaleur. Le malaxage pourra également favoriser l'évaporation de l'eau.

3.4. Réactions pouzzolaniques

Les réactions pouzzolaniques décrivent les interactions entre des matériaux siliceux ou alumino-siliceux et la chaux permettant la formation de CSH ou plus rarement de CAH ou CASH [29 , 30]. Les matériaux permettant ces réactions sont nommés pouzzolanes ou matériaux pouzzolaniques. Ils peuvent être d'origine naturelle (roches volcaniques, terres diatomée, argiles) ou artificielle (cendre volantes, métakaolin). Ces matériaux doivent généralement être vitreux ou amorphe pour permettre les réactions pouzzolaniques. L'augmentation de la finesse et donc de la surface spécifique permet généralement d'améliorer la pouzzolanité de ces matériaux : leur cinétique de réaction et la quantité d'hydrates produits.



Equation I.10. Réaction pouzzolanique

Des réactions pouzzolaniques peuvent apparaître lors de la stabilisation de la terre avec de la chaux ou d'autres liants contenant de l'hydroxyde de sodium $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La mise en solution de la portlandite entraîne sa dissolution en ions Ca^{2+} et OH^- , provoquant une élévation du Ph. Ce phénomène entraîne l'apparition d'échanges cationiques entre les cations interfoliaires des feuillets et les cations Ca^{2+} , en fonction du type et de la charge des argiles. La modification de la charge des argiles réduit l'intensité des forces de répulsion, entraînant leur floculation leur agglomération. Les argiles sont ensuite dissoutes dans le milieu alcalin, libérant de la silice et de l'alumine pouvant réagir avec les ions Ca^{2+} et OH^- . Ces réactions peuvent mener à la

formation de liaisons CSH, CAH ou CASH sur le long terme en présence d'une quantité suffisante de chaux [31]. Elles permettent ainsi d'améliorer la résistance et la durabilité des matériaux en terre.

4. Propriété de terre stabilisé

4.1. Propriétés physiques

La nature et la distribution des grains composants les terres conditionnent la quantité de matière, et réciproquement de vide, présent dans ces matériaux. De ce fait, elles ont une influence directe sur les propriétés physiques d'usage des matériaux de construction comme la porosité et la masse volumique [12]. Ces propriétés ont une influence directe sur les propriétés mécaniques, thermiques et hygrothermiques des terres, il est donc nécessaire de les étudier pour comprendre les liens qui les relient [32 ;33].

L'état de l'art réalisé par giada et al [34] sur les propriétés des matériaux en terre montre que la masse volumique apparente à l'état sec est fréquemment mesurée. Elle est définie par les normes sur les sols **NFP94** et les bétons **NFP18** comme le rapport entre la masse du matériau et son volume.

L'ajout de liant dans les matériaux granulaires peut augmenter la compacité en prenant la place des espaces vides entre les grains pour former des cristaux ou des gels qui les lient. Ce phénomène a pour conséquence d'augmenter la masse volumique et de diminuer la porosité [35]. Cependant, les terres contiennent une grande quantité de fines qui occupent une partie de l'espace entre les grains plus grossiers. De ce fait, l'ajout d'un liant peut créer un effet de desserrement dans les terres riches en fines, entraînant une augmentation de la porosité [32].

Les travaux de messaadi et al [36] illustrent ce phénomène en mesurant la masse volumique de BTC composés de 15 à 80 % d'argiles, de 0 à 80 % de sables et de 5 à 10 % de ciment. Les formulations contenant 5 % de ciment ont des masses volumiques plus élevées que les formulations en contenant 10 % pour des teneurs en sable hormis pour la formulation contenant 60 % de sable. La valeur de la masse volumique varie entre 2125 kg.m⁻³ et 2410 kg.m⁻³.

De même, l'ajout de liant peut modifier la quantité d'eau nécessaire à l'obtention d'une consistance souhaitée. Ainsi, dao et al [37] ont constaté une diminution de la masse volumique (1780 – 1620 kg.m⁻³) lors de l'ajout de 0 à 12 % de ciment CEM I et de la modification de la teneur en eau. Cette modification de la rhéologie entraîne une augmentation de la porosité apparente calculée (34 – 40 %) à partir de la masse volumique apparente et absolue. Les essais ont été réalisés sur une terre fine dont 67 % des particules sont inférieures à 63 µm et 30 % inférieures à 2 µm.

Enfin, mc gregor et al [38] ont constaté une faible diminution de la masse volumique (1783.3 – 1719.7 kg.m⁻³) lors de l'ajout de 3 à 8 % de liant minéral (chaux, ciment, géopolymère) dans une terre sableuse riche en fine dont 25 % des particules sont inférieures à 63 µm et 17 % inférieures à 2 µm.

L'impact de l'ajout de liant sur la masse volumique et la compacité d'un matériau en terre dépend de sa distribution granulométrique. Si la quantité de fines est trop élevée, le liant ne comble pas un espace vide, mais entraîne un phénomène de desserrement. Le besoin en eau d'hydratation des liants influence également la teneur en eau et donc la rhéologie des mélanges. L'action du liant sur les propriétés physiques reste limitée pour de faibles teneurs [39].

L'influence de la teneur en eau sur les propriétés des matériaux en terre est peu étudiée contrairement aux bétons de ciment. La masse volumique augmente avec la teneur en eau jusqu'à atteindre un optimum de compacité [2]. L'ajout d'eau au-delà de cette valeur entraîne une baisse de la compacité, de la résistance et de la conductivité thermique [32].

4.2. Propriétés mécaniques

La résistance d'un matériau est une propriété fondamentale des matériaux de construction de structure. Elle est généralement caractérisée par sa contrainte maximale de rupture dans le domaine de la construction **NF196, NF206**. Cette contrainte peut être mesurée de différentes manières par des essais mécaniques de flexion, compression, traction ou autre en fonction des performances attendues. Les matériaux de construction en terre sont principalement étudiés à travers des essais de résistance en compression [3]. La stabilisation de la terre pour former un béton de terre est une technique maîtrisée depuis les millénaires. Les fameux « bétons romains » étaient composés de terre, de pouzzolane et de chaux, ayant formé des réactions pouzzolaniques leur conférant une grande durabilité.

Cependant, ces réactions sont encore peu maîtrisées et peuvent varier grandement selon la composition des terres et des liants. **Le Tableau I.2** présente les résistances et teneurs en liant de plusieurs terres stabilisées.

Les travaux de Izzemouren et al [40] montrent que la stabilisation chimique à la chaux couplée au compactage permet d'obtenir des BTC stabilisées avec une résistance à la compression plus élevées que les BTC en terre crue ($6.9 < R_c < 8.5$ MPa). Les BTC sont fabriquées avec une terre fine composée de 70 % de terre de Biskra (Sud-est de l'Algérie) et 30 % de sable 0/3 mm. Ces valeurs varient en fonction de la quantité de chaux employée (6 – 10 %) mais aussi de la méthode de cure. La cure à la vapeur à 75 °C permet d'obtenir de meilleures résistances après 24 heures (6.5 - 10 MPa). Les échantillons suivant une cure humide ont une résistance mécanique à 28 jours moyenne (3 – 4.8 MPa) qui évolue jusqu'à atteindre une résistance plus élevée que lors de la cure à la vapeur à 18 mois (7.1 - 11.65 MPa). Ces écarts dus à la variation des conditions de cure peuvent être causés par plusieurs phénomènes.

La carbonatation de la portlandite entraîne la formation de cristaux de calcite liant faiblement les grains. Elle est néanmoins limitée lors de la cure humide d'un matériau. Les réactions pouzzolaniques peuvent être responsables de l'augmentation de la résistance sur le long terme lors de la cure humide. De telles réactions sont rares après seulement 24 heures, hormis si les conditions de cures (vapeur à 75 °C) entraînent une augmentation de la cinétique. Une analyse des structures des éprouvettes permettrait de confirmer cette hypothèse. La substitution de 10 à 40 % de la chaux par de la pouzzolane naturelle entraîne une augmentation de la résistance à la

compression (6.3 - 16 MPa) des échantillons curés à la vapeur. Ce phénomène peut également être dû aux réactions pouzzolaniques entre la chaux, la pouzzolane naturelle et la terre.

Bien que la chaux puisse permettre une légère amélioration des propriétés mécaniques en formant de la calcite ou des réactions pouzzolaniques avec les argiles, les périodes de cures sont relativement longues comparées à des bétons de ciments.

Bahar et al [41] Ont observé une augmentation de la résistance mécanique de BTC formulées avec un sol fin, lors de l'augmentation de la quantité de ciment CEM I, passant de 2.6 MPa à 6.5 MPa pour un ajout de 0 à 20 % de ciment. Les propriétés mécaniques apportées par le ciment évoluent jusqu'à atteindre leur maximum à 28 jours de cure. La hausse de la résistance mécanique reste limitée malgré la grande quantité de ciment.

Amriou et al [42] ont mis en évidence l'impact de la distribution granulométrique sur la résistance à la compression des bétons de terre. Les éprouvettes sont composées de gravier (0 - 50 %), de sable (0 - 100%), et d'argile (0 - 100 %), stabilisées avec 10 % de ciment. Ces variations de granulométrie entraînent une variation des propriétés mécaniques, allant de 1.8 MPa à 6.7 MPa pour les formulations sans graviers et de 3.2 MPa à 4.7 MPa pour les formulations avec graviers. De plus, l'ajout de 0.5% de fibre entraîne une augmentation de la résistance mécanique des formulations sans graviers et de certaines formulations avec graviers. Les variations de résistances peuvent être dues aux variations de l'arrangement des grains. Ce phénomène influence la compacité et la masse volumique du béton de terre. Izemmouren [7] a constaté l'apport des additions minérales aux bétons de terre stabilisés avec de la chaux. L'ajout de pouzzolane naturelle, de poudre de verre ou de laitier de haut fourneau permet d'améliorer la résistance mécanique du matériau jusqu'à 10.9 MPa. Les essais ont été réalisés avec un sol riche en fines et un sol fin qui a obtenu les meilleures résistances. Les résistances maximales ont été obtenues après 180 jours de cure humide.

Une telle augmentation de la résistance mécanique peut être causée par des réactions pouzzolaniques entre la chaux et les matériaux pouzzolaniques contenus dans le béton de terre. Ces réactions entraînent l'apparition d'hydrates comme CSH, CAH ou CASH qui améliorent les propriétés mécaniques.

Les apports du laitier aux bétons de terre stabilisés à la chaux ont été mis en évidence par Wild et al [43] et leurs essais sur la kaolinite et une argile de Kimmeridge (Oxford). Les résistances obtenues sont faibles (1 – 3.5 MPa) à cause de la grande finesse des terres étudiées. Ils mettent cependant en évidence l'évolution de la résistance en fonction des proportions des liants et la durée de la cure.

Izzemouren et al [44] ont obtenu jusqu'à 18 MPa pour différentes formulations d'un sol sulfatique compacté, stabilisé avec 3 à 5 % de ciment et 0 à 8 % de laitier de haut-fourneau. Les résistances maximales ont été obtenues après 90 jours de cure humide. La hausse de la résistance à la compression des bétons de terre est causée par l'activation du laitier par le ciment. Ils entraînent la formation de plusieurs hydrates qui améliorent les propriétés mécaniques. Des réactions pouzzolaniques peuvent également être provoquées par les argiles et la portlandite formée par la réaction d'hydratation du ciment.

De Filippis [12] a réalisé des bétons de terre stabilisés avec 5 à 15 % de laitier activé avec de la soude NaOH. Les résistances obtenues varient grandement selon les formulations et les terres, composées de sables, de graviers et d'environ 10 % de sols fins riches en argiles. Les formulations à 15 % dépassent légèrement la résistance des formulations contenant 10 % de ciment. Ces résultats montrent que la stabilisation au laitier activé à la soude peut nécessiter une plus grande quantité de matière pour obtenir une résistance supérieure aux bétons de terre stabilisés au ciment.

L'état de l'art montre que les liants peuvent améliorer les propriétés mécaniques des matériaux en terre en formant des hydrates assurant la cohésion des grains. Cependant la présence d'une grande quantité de fines, et notamment des argiles, limitent les propriétés mécaniques des bétons de terre stabilisés au ciment ou à la chaux. Les liants à base de laitiers activés ou de matériaux pouzzolaniques permettent généralement d'obtenir une résistance à la compression plus élevée, pouvant s'expliquer par l'apparition de réactions pouzzolaniques entre les terres et les liants. Toutefois, ces grandes résistances sont obtenues dans des conditions de cures idéales. L'étude de l'influence des conditions de cures est importante à réaliser pour maîtriser la stabilisation avec des liants à base de laitier activé.

Tableau I.2 Résistance à la compression des matériaux en terre stabilisée

Matériaux	Liant	Résistance mécanique (MPa)	Source
Béton de terre	Ciment 3-5%	3,0-5,0	[5]
	Ciment 6-8%	4,0-5,0	[33]
	Ciment 2-12%	2,6-3,2	[37]
	Ciment 10%	1,8-6,5	[42]
	Ciment 10%	4,8-6,3	[12]
	Laitier activé NaOH 5-15%	1,6-6,2	
BTC	Ciment 4-20%	2,3-6,3	[41]
	Chaux 2-4%	4,1-5,9	[45]
	Chaux 6-10%	6,9-8,5	[7]
	Chaux 6-10% contenant 0-30 de pouzzolane	6,8-9	
	Chaux 6-10% contenant 0-30 de poudre de verre	6,8-10,2	
	Chaux 6-10% contenant 0-30 de laitier	6,8-10,9	
	Chaux 6-10% contenant 0-30 de pouzzolane	3,0-16,0	[40]
	Ciment 3-5% laitier 0-8%	7,0-18,0	[44]

4.3. Propriétés thermiques

L'étude des propriétés thermiques des enveloppes et de leurs composants permet d'évaluer leur apport à l'isolation et au confort thermique du bâtiment. Ces phénomènes sont caractérisés par plusieurs grandeurs [46;47] fréquemment étudiées pour les matériaux en terre [34].

La conductivité thermique, définie comme le rapport entre l'énergie thermique transférée, par unité de temps et de surface, et le gradient température :

$$\phi = -\lambda \text{ grad } T$$

Equation I.11 Loi de Fourier

- λ : Conductivité thermique (W.m-1.K-1)
- ϕ : Densité de flux thermique (W.m-2)
- T : température (K)

La capacité thermique d'un matériau est définie comme la quantité d'énergie thermique nécessaire à l'augmentation de sa température d'un degré. Elle décrit donc la capacité d'un matériau à stocker de l'énergie thermique. Elle est généralement exprimée en fonction de la masse ou du volume :

- c_m : Capacité thermique massique (J.K-1.kg-1)
- c_v : Capacité thermique volumique (J.K-1.m-3)

La conductivité et la capacité thermique permettent de définir deux grandeurs qui caractérisent le phénomène d'inertie thermique dans le domaine du confort thermique [46;47] : La diffusivité thermique D , capacité du matériau à transmettre la chaleur, et l'effusivité thermique E , capacité du matériau à échanger de la chaleur avec son environnement :

$$D = \lambda / \rho c$$

$$E = \sqrt{\lambda \rho c}$$

Equation I.12. Diffusivité et effusivité thermique

- E : Effusivité thermique (J K-1.m-2.s-1/2)
- λ : Conductivité thermique (W.m-1.K-1)
- ρ : Masse volumique du matériau (kg.m-3)
- c : Capacité thermique massique (J.K-1.kg-1)

Les matériaux en terre possèdent en moyenne une conductivité thermique au moins deux fois plus faible que les autres matériaux granulaires comme les bétons de ciments, grâce aux propriétés des argiles qui entraînent notamment la formation de pores. L'air isolant ($\lambda = 0.024$ W.m-1.K-1) pouvant être présent dans ces pores fait baisser la conductivité thermique du matériau [34]. Leur conductivité limitée ainsi que leur forte capacité thermique entraînent une faible effusivité et diffusivité, permettant aux terres de contribuer à l'inertie thermique des enveloppes en ralentissant les transferts de chaleur [34].

Le Tableau I.3 présente les conductivités thermiques de terres stabilisées afin de les comparer au béton de ciment ainsi qu'à la terre cuite. Il apparaît que leurs conductivités

thermiques sont bien inférieures au béton mais relativement proches de la terre cuite. Les études menées par Ouedraogo[3] sur des bétons de terre stabilisés avec 0 à 4 % de chaux ou de ciment ont donné des conductivités thermiques très proches pour les deux terres fines étudiées avec la méthode de la plaque chaude ($0.49 - 0.57 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$). Ces faibles écarts peuvent être dus aux variations de teneur en eau et de masse volumiques des échantillons. Les mesures réalisées par la méthode du fil chaud ont donné des résultats plus élevés d'environ $0.15 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ avec une faible variation entre les formulations.

Zhang et al [48] ont observé que la conductivité thermique de terres stabilisées compressées ne varie pas lors de l'augmentation de la quantité de ciment de 0 à 9 %. Elle augmente cependant lors de l'augmentation de la masse volumique par compactage des matériaux. Ainsi, nous attribuons les éventuels impacts des liants sur la conductivité des terres stabilisées à la modification de la rhéologie et du besoin en eau, pouvant influencer la porosité.

Dao et al [37] ont constaté une variation de la conductivité thermique ($0.9 - 1.4 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$) d'un béton de terre fine en fonction de la quantité de ciment (0 – 12 %) ajoutée. Cette valeur diminue jusqu'à 4 % d'ajout puis augmente à partir de 6 %. Ces variations peuvent être causées par une variation de l'arrangement des grains dus à la quantité de ciment et la teneur en eau. Les valeurs mesurées sont relativement hautes pour des adobes contenant 34 à 40 % de porosité. Ce phénomène peut être dû à une trop forte hétérogénéité du matériau pour la technique de caractérisation employée (conductimètre).

Tableau I.3. Méthodes de caractérisation des propriétés thermiques des matériaux

Grandeurs	Méthode de mesure	Appellation internationale	Source
Conductivité et capacité thermique	Fil chaud	Hot wire	[49]
	Disk chaud	Hot disk	[50]
	Conductimètre	Conductivitymeter	[51]
	Mesure du flux de chaleur	Heat flow meter	[37]
Capacité thermique	Calorimétrie différentielle à balayage	Differential scanning calorimetry	[52]
	1Calorimètre	Calorimeter	[34]

L'état de l'art met en évidence la corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique des matériaux en terre [34 ;53]. Ce phénomène de s'explique par le fait que l'augmentation de la masse volumique induit l'augmentation de la compacité et donc, de la quantité de matière conductrice. Réciproquement, la porosité et la quantité d'air isolant contenu dans le matériau diminuent, participant également à l'augmentation de la conductivité thermique. L'ajout de liant peut modifier le besoin en eau du matériau et ainsi sa porosité et sa masse volumique. L'effet reste néanmoins limité pour de faibles teneurs. Il est négligeable lors du compactage de la terre stabilisée.

4.4. Propriétés hygrothermique

Les propriétés hygrothermiques des matériaux de construction caractérisent leurs interactions avec la vapeur d'eau présente dans l'environnement. Ces propriétés sont étudiées

dans le domaine du bâtiment et du confort thermique car elles peuvent influencer la qualité de l'air, les échanges de chaleur et les propriétés des matériaux pouvant capter de la vapeur d'eau [12 ;54 ,55].

La résistance à la diffusion de vapeur d'eau et la valeur tampon hydrique sont les principales propriétés hygrométriques mesurées pour caractériser les interactions entre la vapeur d'eau et les matériaux en terre [12 ;34]. L'étude des isothermes de sorption et de désorption permet d'étudier l'évolution de ces comportements lors de l'évolution de l'humidité relative. Ces données sont indispensables à la compréhension et la prédiction du comportement hygrothermique des matériaux.

Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau est défini comme le rapport entre la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air et celle du matériau [52]. Il caractérise la capacité d'un matériau à limiter les transferts de vapeur d'eau à travers ses pores interconnectés. Un matériau perméable a une faible résistance à la diffusion de vapeur d'eau. Un matériau étanche a une forte résistance à la diffusion de vapeur d'eau. Cette grandeur est mesurée à l'aide de la méthode de la coupelle sèche ou humide **NF EN ISO 12572** :

$$\mu = \delta_{\text{air}} / \delta \quad \textbf{Equation I.13. Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau}$$

- μ : Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau du matériau (adimensionnel)
- δ_{air} : Perméabilité à la vapeur d'eau de l'air (kg.m-1.s-1.Pa-1)
- δ : Perméabilité à la vapeur d'eau du matériau (kg.m-1.s-1.Pa-1)

Les données du tableau 4.4.1 montrent que la résistance à la diffusion de vapeur d'eau des matériaux en terre est basse ($3 < \mu < 18.5$), bien inférieure à la valeur mesurée sur un béton de ciment ($\mu = 203.3$). Plus généralement, les matériaux en terre ont une résistance à la diffusion de vapeur d'eau inférieure à la majorité des matériaux structurels comme l'acier, le bois et même les bétons légers ou poreux [56]

La MBV (Moisture Buffer Value), ou valeur du tampon hydrique, caractérise la capacité d'un matériau à échanger de la vapeur d'eau avec son environnement [12 ;57]. Elle est fréquemment employée dans le domaine de la construction afin d'étudier le comportement hygrothermique d'un matériau dans une ambiance intérieure et de le comparer avec d'autres matériaux d'usage (**Figure I.8**). Bien qu'il n'existe pas de norme encadrant cette méthode, son emploi est décrit dans le protocole NORDTEST [58].

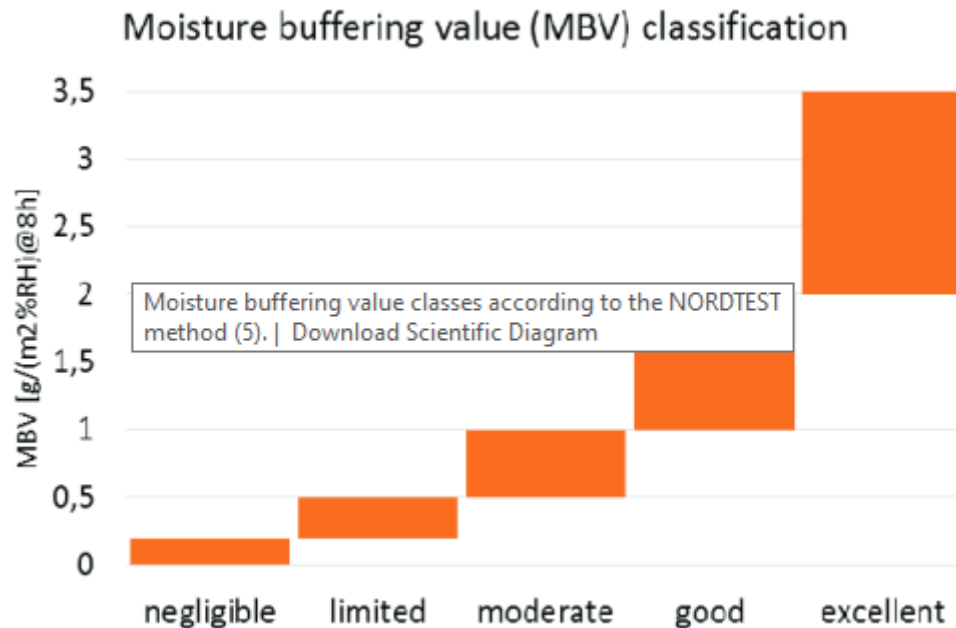


Figure I.8. Classement des valeurs de MBV des matériaux de construction [58]

L'état de l'art montre que les matériaux en terre crue ont généralement une valeur de MBV supérieure à 1 g.m-2.%HR-1 [38 ; 57]. Cette valeur témoigne de la capacité des matériaux en terre à échanger de la vapeur d'eau avec leur environnement, pouvant contribuer à la régulation du confort hydrique. Elle varie grandement en fonction des terres et des conditions de mises en œuvre. Bien que l'impact de faible ajout de liants soit limité sur la porosité des matériaux en terre, Les hydrates formés par les liants peuvent créer des pores fermés dans le béton de terre, réduisant les échanges de vapeur d'eau avec l'environnement.

Le Tableau I.3 présente la résistance à la vapeur d'eau et la MBV de plusieurs matériaux en terre, comparés au béton de ciment dont la résistance est élevée et la MBV faible. [3] a réalisé des mesures de MBV sur deux terres fines stabilisées avec 2 à 4 % de chaux et de ciment. Les BTC non stabilisées ont une MBV de 2.7 et 3.3 g.m-2.%HR 1. Les valeurs des BTC stabilisées sont comprises entre 2.3 et 2.7 g.m-2.%HR-1 et diminuent lors de l'augmentation de la quantité de liant. Ces résultats montrent l'effet de la stabilisation sur le comportement hygrothermique des matériaux en terre. La formation des hydrates entraine une diminution des échanges de vapeur d'eau des BTC avec l'environnement.

Kohandelnia[58] observe des écarts de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau entre 3 mélanges de terres stabilisées avec différentes quantités de ciment (5 – 8 %). Les valeurs augmentent avec la concentration de ciment. Cependant, les différences de compositions des terres peuvent également influencer le comportement hygrothermique du matériau. Mc Gregor et al [38] ont également observé une diminution des propriétés hygrothermiques lors de la stabilisation d'un matériau en terre avec différents liants : ciment (4 – 8 %), chaux (4 – 8 %), NaOH (3 %). Bien que la masse volumique ne varie pas significativement, la MBV diminue lors de l'augmentation de la quantité de liant (1.8 – 3.6 g.m-2%HR-1). Ils constatent également une légère hausse de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau (5.9 – 8.2). Il

apparaît que la stabilisation avec 3 % de NaOH a entraîné une hausse de la résistance et une baisse de la MBV légèrement supérieures qu'avec les autres liants.

Ce phénomène peut être dû à une dissolution plus importante des argiles avec la soude qu'avec la portlandite. Enfin, les essais ont été réalisés selon plusieurs cycles proposés par le protocole Nordtest et ont mis en évidence les écarts de valeurs de MBV pouvant exister selon les paramètres d'étude ($\Delta MBV = 0.7 \text{ g.m-2\%HR-1}$).

L'état de l'art montre que l'ajout de liant dans les matériaux en terre entraîne une diminution des échanges de vapeur d'eau avec l'environnement. Ce phénomène semble être principalement dû à la formation d'hydrates pouvant altérer les pores. La diversité de composition des terres, leur stabilisation, mais aussi les paramètres d'étude expliquent la large plage de valeurs constatée (**Tableau I.3**). Malgré l'action des liants, les bétons de terre ont des valeurs de μ et de MBV témoignant d'une grande capacité d'échange de vapeur d'eau avec leur environnement, bien que généralement inférieures à la terre crue

Tableau I.4. Propriétés hygrothermiques des matériaux de construction

Matériaux	MBV	μ	Source
Béton de ciment	0,37	203,3	[57]
Bauge	1,4	18,5	[58]
Terre crue	-	3 – 9	[57]
BTC	1,5 - 3,3	-	[59]
BTC	1,8 - 3,6	5,5 – 8,2	[38]
BTC	2,6 - 3,3	-	[3]

5. Enjeux de la stabilisation de la terre

La stabilisation de la terre crue a pour but d'améliorer ses propriétés comme sa résistance, sa durabilité et son ouvrabilité afin de faciliter son emploi sur les chantiers. Cependant, les études menées sur les bétons de terre montrent que malgré une nette amélioration de la durabilité de ces matériaux, l'augmentation des propriétés mécaniques reste parfois limitée.

Cette résistance basse suffit néanmoins à compléter des structures porteuses par des voiles en béton de terre stabilisés au ciment (4 MPa pour 3 % de ciment) précisent [5]. L'ajout de liant est indispensable pour permettre la bonne ouvrabilité d'un béton de terre coulé. Pourtant, bien que les temps de prise et de décoffrage soient écourtés, moins de 72 heures contre plusieurs semaines pour la terre crue, il reste au moins deux fois plus long que pour un béton de ciment. En considérant leur faible rendement ainsi que les coûts économiques et environnementaux élevés, il apparaît que l'emploi de la chaux et du ciment pour stabiliser les terres est limité.

Pour autant, les récentes études menées sur l'impact des liants alternatifs à base de laitiers ou de matériaux pouzzolaniques ont mis en lumière le potentiel de ces additions minérales pour la formulation de bétons de terre plus résistants [7 ;12]. Cependant, malgré la formulation de liant plus performant permettant d'élargir le spectre des terres pouvant être employées en construction, la grande variabilité de leurs propriétés reste un enjeu majeur pour la conception et la réalisation des projets.

Conclusion :

La terre stabilisée représente une solution pertinente et durable pour améliorer les performances de la terre crue dans le domaine de la construction. Grâce à l'ajout de chaux et pouzzolane, elle permet d'augmenter la résistance mécanique, de réduire la sensibilité à l'eau et d'améliorer la durabilité des ouvrages. Les réactions physico-chimiques, notamment les réactions pouzzolaniques, contribuent à renforcer la structure interne du matériau et à assurer sa stabilité dans le temps. Ainsi, la terre stabilisée conserve les avantages écologiques de la terre crue, tels que sa faible empreinte carbone et ses bonnes performances thermiques et hygrométriques, tout en répondant aux exigences techniques modernes du bâtiment. Elle constitue donc une alternative efficace et respectueuse de l'environnement aux matériaux conventionnels. Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes de la stabilisation de la terre ainsi que les différentes techniques utilisées et leurs effets sur les propriétés du matériau. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude des matériaux utilisés dans la formulation du mortier de terre stabilisée destiné au revêtement mural.

CHAPITRE II

Matériaux et indentifications

1. Introduction :

Les matériaux de construction jouent un rôle essentiel dans la qualité, la résistance et la durabilité des ouvrages. Ce chapitre a pour objectif de décrire les méthodes d'analyse, les échantillons ainsi que les techniques utilisées lors de l'expérimentation, en précisant également l'équipement et les méthodes employés. Après prélèvement des échantillons sur le site, ceux-ci ont été préparés et soumis à diverses méthodes d'analyse à ces matériaux. *Ces résultats expérimentaux sont issus du travail de LAHOUEL Oumaima et MOSTEFAI Mohamed, réalisé dans le cadre de leur PFE « L'application de la terre crue comme mortier dans les revêtements muraux », sous le même encadrement que notre étude.* La dénomination exacte des matériaux sera quant à elle déterminée sur la base des résultats de l'expérimentation.

2. Matériaux utilisé :

Dans le cadre de cette étude, les matériaux principaux examinés sont le sable et l'argile. Le sable, en tant que matériau granulaire non cohésif, est fréquemment utilisé pour ajuster la plasticité de l'argile lors des analyses. À l'opposé, l'argile est un matériau fin et cohésif, susceptible de subir des phénomènes de consolidation, de gonflement et de retrait. La combinaison de ces deux matériaux permet de simuler une texture variée comprenant l'argile, le limon et le sable.



Fig II.1 : Sable



Fig II.2 : Argile

Le sable utilisé dans cette étude est un sable naturel fin, extrait du gisement de Bouihi, situé dans la région de Tlemcen (**Fig. II.3**). Ce type de sable est couramment employé dans le secteur de la construction, notamment pour la préparation des mortiers. Quant à l'argile, elle est extraite en tant que matériau remanié près de l'unité CeramDivindus à Remchi, Tlemcen (**Fig. II.4**). Souvent désignée sous le nom « d'argile bleue », elle est utilisée par cette unité comme matière première pour la fabrication de céramiques murales.

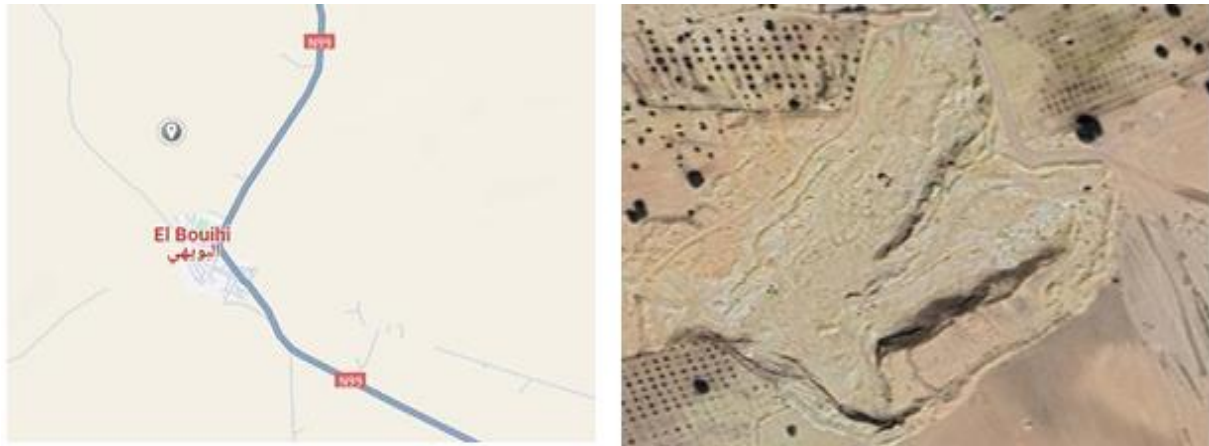
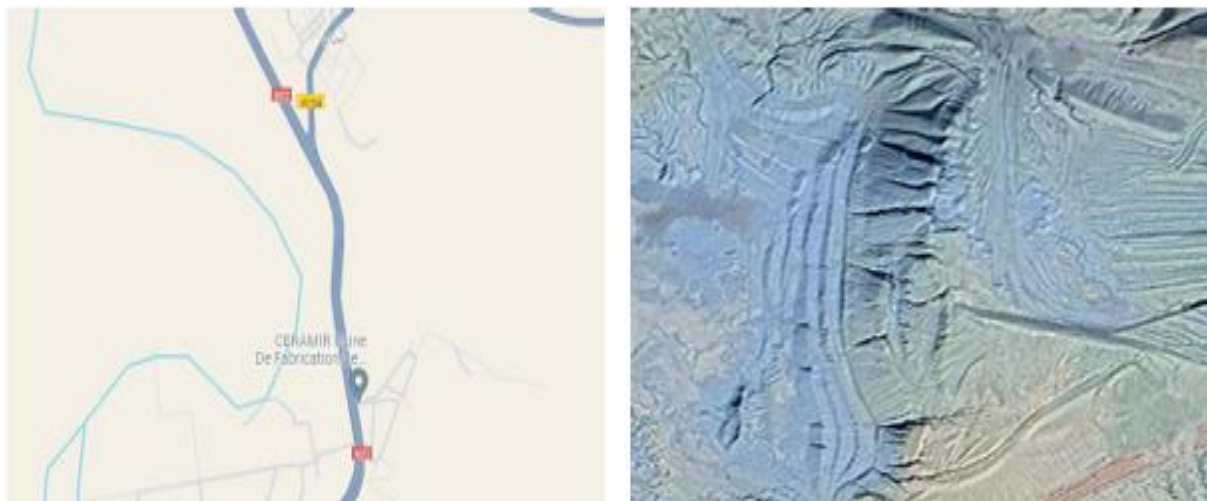


Fig II.3 : Localisation du gisement du sable d'El Bouihi(Tlemcen



3. Essais d'identification :

Les essais d'identification des sols constituent des étapes cruciales menées en laboratoire pour analyser les caractéristiques physiques et hydriques des sols. Dans la suite de cette étude, des tests ont été réalisés tant sur le sable que sur l'argile. Le (**Tableau II.1**) présente la nature des essais réalisés sur les matériaux examinés.

Tableau II.1 : Essais effectués sur les matériaux étudiés

Argile	Sable
- Analyse granulométrique par sédimentation - Limite d'Atterberg - Bleu de méthylène - Poids volumique des grains solides - Masse volumique apparente - Mesure de la teneur en carbonate de calcium CaCO₃	- Analyse granulométrique - Poids volumique des grains solides - Masse volumique apparente - Bleu de méthylène - Equivalent sable - Mesure de la teneur en carbonate de calcium CaCO₃

3.1. Essais sur argile :

3.1.1. Analyse granulométrique par sédimentation :

L'analyse granulométrique par sédimentométrie est utilisée pour examiner la distribution des tailles de grains inférieurs à 80 µm. En raison des interactions moléculaires entre ces sédiments et le tamis, ce dernier ne peut pas être employé. Cette analyse est réalisée conformément à la norme **NF P94-057**. Il convient de rappeler que le principe de l'essai de la sédimentation repose sur la loi de Stokes. Les résultats de cet essai, selon la norme **NF P94-057**, sont présentés dans le **Tableau II.2** et la **Fig II.5**.

Tableau II.2 : Essai de sédimentation pour l'argile

Temps (s)	Liquide (A)	$\rho_s \left(\frac{g}{cm^3} \right)$	ϕ (mm)	Tamisas (%)
30	1,0265	2,63	0,0600	100
60	1,026	2,63	0,0432	72,02
120	1,0255	2,63	0,0295	49,09
300	1,0245	2,63	0,0195	32,42
600	1,0235	2,63	0,0142	23,60
1800	1,0215	2,63	0,0085	14,15
3600	1,0185	2,63	0,0061	10,21
14400	1,0155	2,63	0,0032	5,35
86400	1,0115	2,63	0,0014	2,38

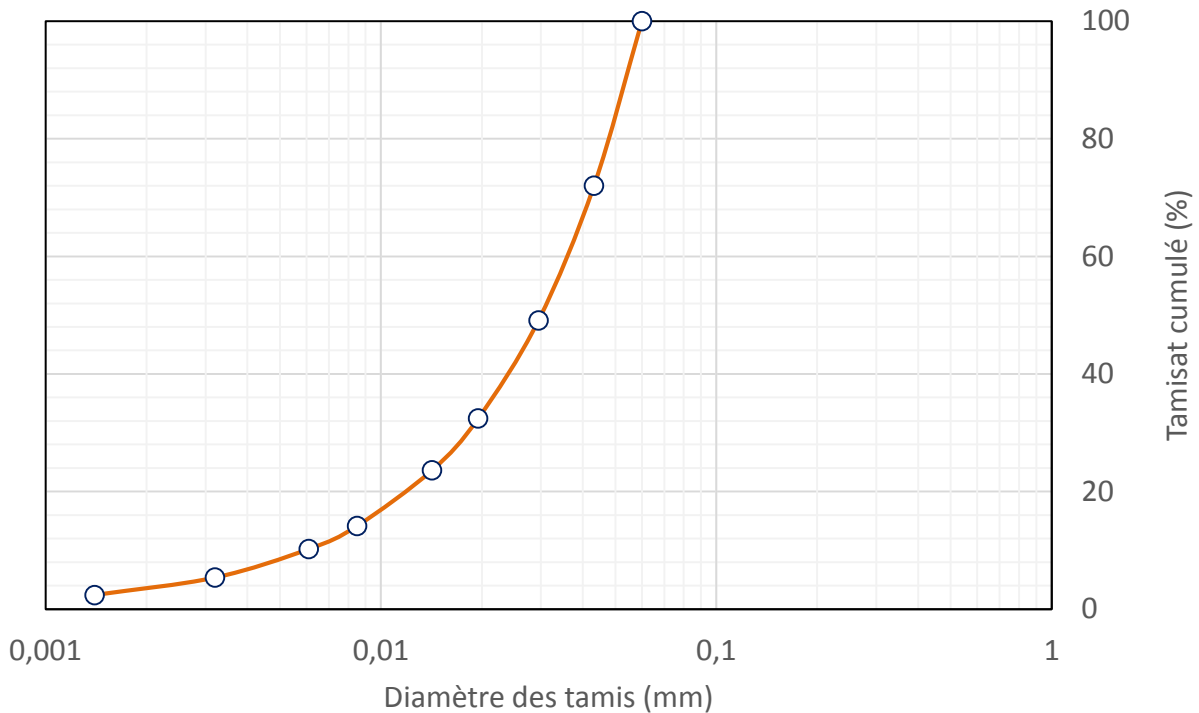


Fig II.5 : Analyse granulométrique par sédimentation pour l'argile



Fig II.6 : Essai de sédimentométrie pour l'argile (UBBAT)

3.1.2. Limite d'Atterberg :

La consistance d'un sol peut varier dans de larges limites avec la quantité d'eau interstitielle que contiennent ses pores et l'épaisseur des couches d'eau adsorbées qui enrobent ses grains. Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles qui marquent les seuils entre le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité) et le

passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité). Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considéré, exprimée en (%) du poids du matériau sec. La différence entre la limite de liquidité et de plasticité qui définit l'étendue du domaine plastique est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité. Ces limites sont d'une importance fondamentale en géotechnique car elles indiquent la sensibilité d'un sol aux modifications de sa teneur en eau

- **Limite de liquidité** ω_L : Elle sépare l'état liquide de l'état plastique
- **Limite de plasticité** ω_p : Elle sépare l'état plastique de l'état solide
- **Limite de retrait** ω_s : Elle sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait

Ces limites sont déterminées en laboratoire sur la fraction du sol (mortier) passant au tamis d'ouverture égale à 0,40mm (méthode de la coupelle de Casagrande, cône de pénétration, du rouleau et appareil de retrait). La courbe **II.9** représente la variation de la teneur en eau en fonction du nombre de coup. Les résultats (selon la norme **NF P94-051**) de cet essai pour l'argile sont présentés dans le **tableau II.3**.

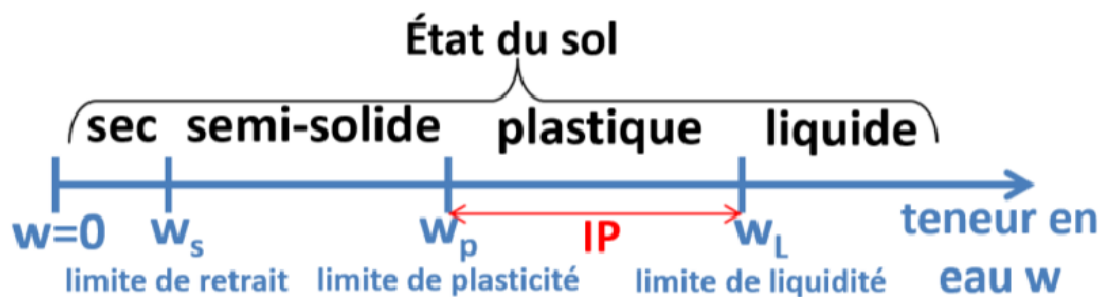


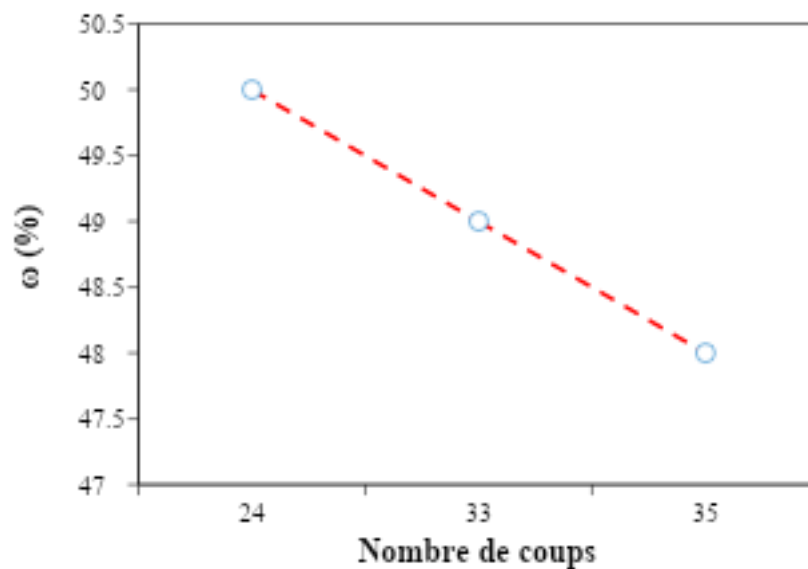
Fig II.7: Comportement des sols fins avec la variation de la teneur en eau ($\omega\%$)



Fig II.8: Essai de limites d'Atterberg (UBBAT)

Tableau II.3: Résultats de l'essai des limites d'Atterberg

Paramètre	Argile
ω_l %	49,75
ω_p %	27,30
I_p %	22,45

**Fig II.9 :** Courbe de la limite de liquidité

3.1.2.1. Argile et la charte de plasticité :

La charte de plasticité (**Fig II.10**) est un outil utilisé pour classer les sols fins, en particulier les argiles et les limons, en fonction de leur plasticité et de leur teneur en eau. Elle est souvent représentée sous forme de diagramme où l'axe des abscisses représente la limite de liquidité (ω_L) et l'axe des ordonnées représente la limite de plasticité (I_p).

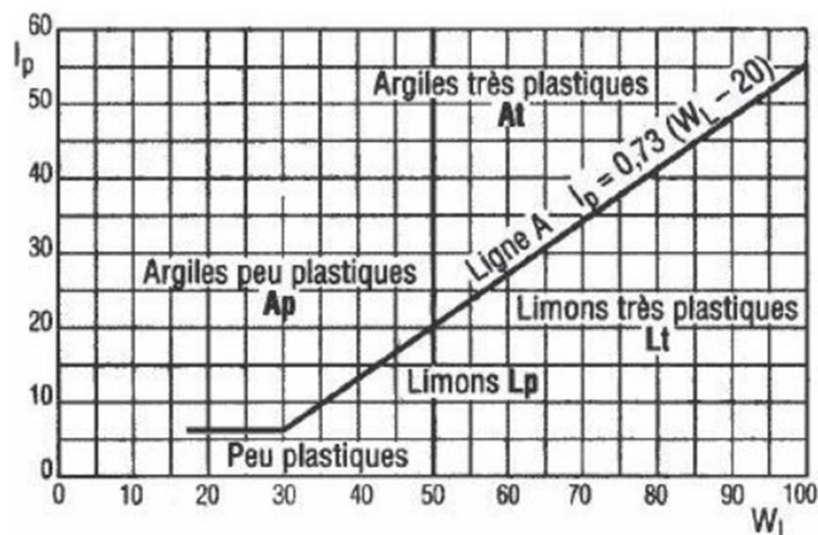


Fig II.10 : Charte de plasticité

L'argile étudiée se situe légèrement au-dessus de la **ligne A** dans la zone des argiles, tout en étant très proche de la zone des limons. Elle se trouve entre les catégories peu plastique et très plastique. Par conséquent, cette argile ne peut être strictement classée ni comme argile, ni comme limon, et elle ne se classe pas clairement dans les catégories de plasticité. La dénomination précise de notre argile sera présentée ultérieurement, après l'obtention d'informations complémentaires issues du reste des essais.

3.1.3. Bleu de méthylène :

L'essai est fait selon la norme **NFP 94-068**. Le principe de cet essai consiste à contrôler l'absorption du bleu de méthylène injecté dans un bain aqueux contenant les fines de la prise d'essai, en observant une goutte de suspension déposée sur une feuille de papier filtre.

La tache formée se compose d'un dépôt central du matériau, coloré d'un bleu soutenu, entouré d'une zone humide incolore. La saturation des fines en bleu de méthylène se traduit par la formation d'une auréole bleu clair persistante autour de dépôt central **Fig II.11**

On appelle valeur de bleu de méthylène VBS, la quantité exprimée en gramme de bleu de méthylène absorbée par 100 g de fines. **Tableau II.4** montre la classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène. La valeur de bleu pour l'argile selon la norme **NF P94-068** VBS = 5,23.

Tableau II.4 : Classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène

Seuil de VBS (g/100g)	Type de sol
< 0,1	Sol insensible à l'eau (notamment si passant $80\mu m < 12\%$)
0,1 – 0,2	Début de la sensibilité à l'eau
0,2 – 1,5	Limite des sols sablo-limoneux
1,5 – 2,5	Sol limoneux peu plastiques
2,5 – 6	Sol limoneux de plasticité moyenne
6 – 8	Sol argileux
>8	Sol très argileux



Figure II.11 : Essai au bleu de méthylène pour l'argile (UBBAT)

3.1.4. Poids volumique des grains solides :

C'est le rapport entre la masse et l'unité de volume de la matière qui constitue le granulat en tenant en compte l'accélération de la pesanteur et sans tenir compte les vides pouvant exister dans ou entre des grains. Le poids volumique des grains solides s'exprime en (kN/m^3). L'essai consiste à mesurer le volume réel occupé par les granulats. Dans notre étude, nous avons effectué l'essai (**Fig II.12**) selon la norme **NF P94-054**. Le résultat de cet essai pour l'argile est présenté dans le **Tableau II.5**

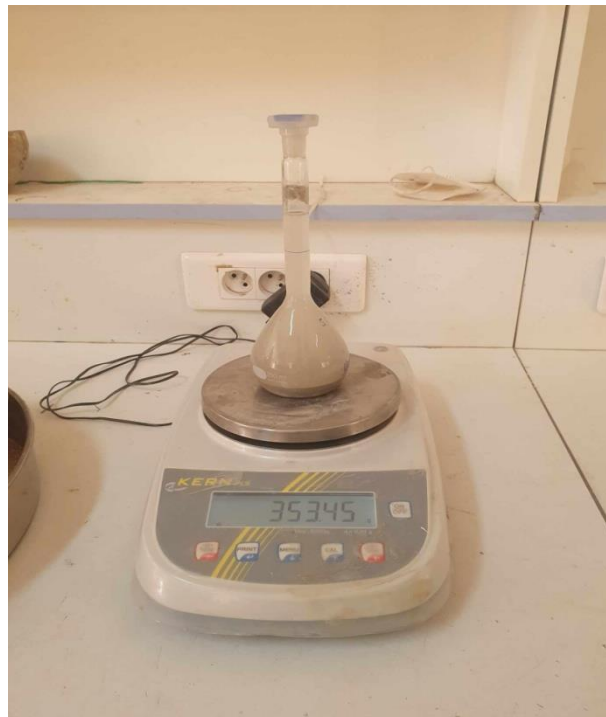


Fig II.12 : Détermination de la masse volumique des grains solides pour l'argile

Tableau II.5: Poids volumique des grains solides pour l'argile

Paramètre	Argile
$\gamma_s (kN/m^3)$	26,30

3.1.5. Masse volumique apparente :

C'est le rapport entre la masse d'un corps et l'unité de volume apparent (y compris les vides). Elle est exprimée en (g/cm^3 , Kg/m^3 , t/m^3). Le principe de cette mesure consiste à remplir un récipient avec un volume intérieur connu et de peser la quantité de matériau correspondant. Le résultat de cet essai (**Fig II.13**) pour l'argile est présenté dans le **Tableau II.6**

**Fig II.13 :** Détermination de la masse volumique apparente de l'argile**Tableau II.6:** Masse volumique apparente de l'argile

Paramètre	Argile
$\rho_{app} (kg/m^3)$	672

3.1.6. Mesure de la teneur en carbonate de calcium $CaCO_3$:

Pour caractériser la calcification des sols, un essai de carbonatation est réalisé afin de déterminer la teneur en carbonate de calcium ($CaCO_3$) dans le matériau étudié. Cet essai est effectué conformément à la norme **NF P94-048**, qui fournit les lignes directrices pour les méthodes de caractérisation des sols contenant des matériaux carbonatés. L'essai (**Fig II.14**) consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone (CO_2) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression

atmosphérique connues) par un échantillon préparé pour l'essai. Les résultats de cet essai sont présentés dans le **Tableau II.7**.



Fig II.14 : Détermination de la teneur en carbonate de calcium dans l'argile

Tableau II.7 : Résultats de la teneur en carbonate de calcium pour l'argile

Masse de CaCO3	Volume de CO2	$x = \frac{(65 \times 100)}{22400} x = 0,30g$
100 g	22400 ml	
x	65ml	
Masse de CaCO3	Masse de roche	$x = \frac{(0,30 \times 100)}{1} x = 30\%$
0,30g	1g	
x	100g	
D'après les résultats trouvés le matériau étudié provient d'une marne		

3.2. Essais sur sable :

3.2.1. Analyse granulométrique :

La granulométrie, ou analyse granulométrique, permet de déterminer la taille des grains d'un granulat, tandis que la granularité désigne la répartition de ces dimensions. Cette analyse repose sur le tamisage, qui consiste à séparer les granulats à l'aide d'une série de tamis aux mailles normalisées, disposées de manière décroissante de 80 mm à 0,063 mm (**Fig II.15**).

La norme **NF EN 933-1** définit la méthode de référence pour caractériser la granularité des granulats par tamisage à sec. Cette méthode s'applique à tous types de granulats, y compris les

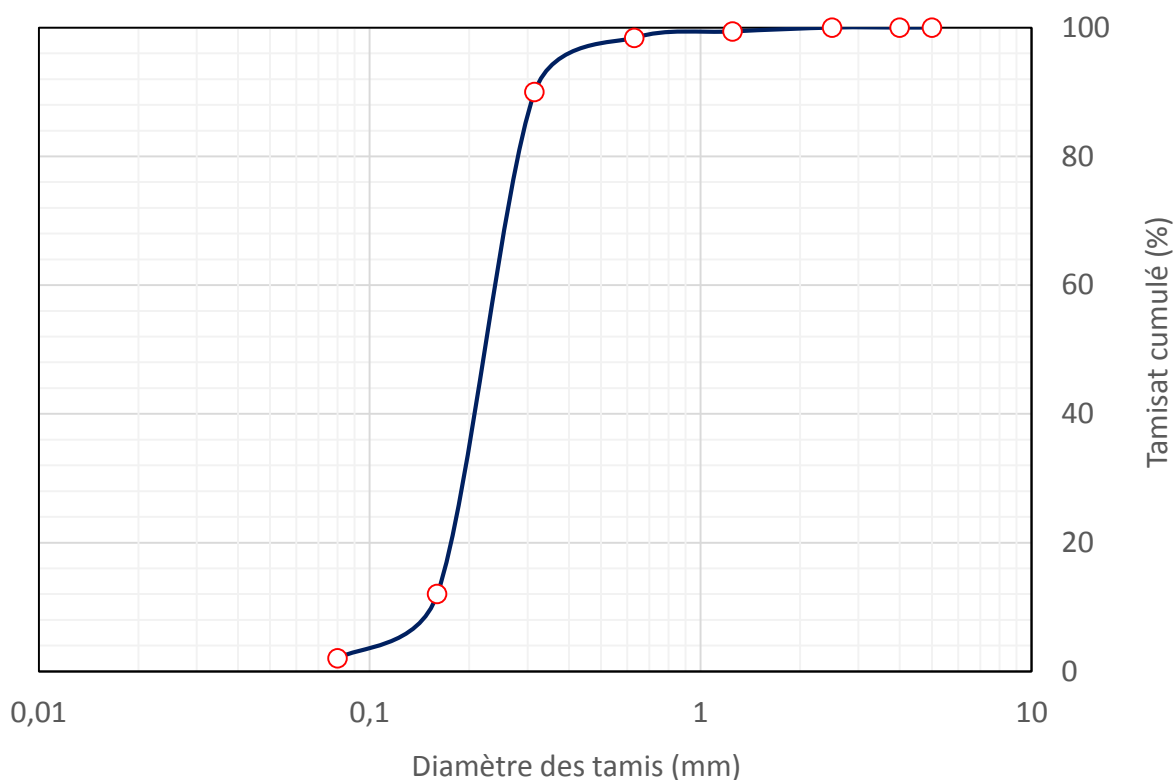
sables. Les résultats (selon la norme **NF EN 933-1**) de cet essai sont présentés dans le **Tableau II.8**.



Fig II.15 : Série de tamis de l'analyse granulométrique pour le sable

Tableau II.8 : Analyse granulométrique par tamisage NF EN 933-1

Φ (mm)	Tamisât
5	100
4	100
2,5	100
1,25	99,4
0,63	98,4
0,315	90
0,16	12
0,08	2
Fond	0.2



FigII.16 : Analyse granulométrique par tamisage pour le sable

3.2.1.1. Coefficient d'uniformité et de courbure :

À partir de la courbe granulométrique, nous avons déterminé les diamètres correspondant à des tamisats de 60 %, 30 % et 10 %. Ces valeurs nous ont permis de calculer le coefficient de courbure et le coefficient d'uniformité. Le **Tableau II.9** présente un résumé des résultats obtenus à partir de l'analyse granulométrique.

Tableau II.9 : Résultats de la granulométrie

Paramètre	D ₆₀ %	D ₃₀ %	D ₁₀ %	C _u	C _c
Valeur	0,23	0,19	0,16	1,44	0,98

D'après les valeurs du coefficient d'uniformité et de courbure montrées dans **Tableau II.9**, Le sable que nous avons étudié à une granulométrie serrée et mal graduée.

3.2.1.2. Le module de finesse :

Le module de finesse du sable est un indice utilisé pour évaluer la distribution granulométrique des particules dans un échantillon de sable. Il est calculé en utilisant les diamètres des tamis et les pourcentages cumulés de la masse retenue sur ces tamis. La formule pour calculer le module de finesse (**M_F**) est la suivante :

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \text{refus cumulés des tamis (5 mm - 2,5 - 1,25 - 0,63 - 0,315 - 0,16)}$$

$$M_f = 1,002$$

Le sable est classé selon son module de finesse M_f comme montré dans le **Tableau II.10**. D'après la valeur de module de finesse calculée, notre sable est considéré comme un sable très fin.

Tableau II.10 : Nature du sable selon le module de finesse

Module de finesse	Nature du sable
$1,8 < M_f < 2,2$	Le sable a une majorité d'éléments fins et très fins
$2,2 < M_f < 2,8$	Un bon sable à béton
$2,8 < M_f < 3,2$	Le sable manque de fines

3.2.2. Poids volumique des grains solides

Comme nous avons déjà défini le principe et le but de l'essai dans la partie « Argile », Le résultat de cet essai (**Fig II.17**) pour le sable selon la norme **NF P94-054** est présenté dans le **Tableau II.11**.



Fig II.17 : Détermination de la masse volumique des grains solides pour le sable

Tableau II.11 : Poids volumique des grains solides pour le sable

Paramètre	Sable
$\gamma_s (kN/m^3)$	26,50

3.2.3. Masse volumique apparente :

Comme nous avons déjà défini le principe et le but de l'essai dans la partie « Argile », Le résultat de cet essai (**Fig II.18**) pour le sable est présenté dans le **Tableau II.12**.



Fig II.18 : Détermination de la masse volumique apparente du sable

Tableau II.12 : Masse volumique apparente du sable

Paramètre	Sable
$\rho_{app} (kg/m^3)$	1604

3.2.4. Bleu de méthylène :

L'essai de bleu de méthylène pour les sables est une méthode utilisée pour évaluer la teneur en argile le sable, essentielle dans les domaines de l'ingénierie et de la construction. En ajoutant une solution de bleu de méthylène à un échantillon de sable et en observant son absorption, on peut déterminer la quantité d'argile présente. Cela permet d'évaluer de quantifier la sensibilité du sable vis à vis l'eau. Le mode opératoire est plus au moins identique à celle de l'argile que nous avons déjà abordé auparavant. La valeur de bleu pour le sable selon la norme **NF P94-068 MB** = 1,2.



Fig II.19: Essai au bleu de méthylène pour le sable (GICA Ain Temouchent)

3.2.5. Equivalent sable :

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution flocculant dans un cylindre gradué et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. On complète alors le sable en utilisant le reste de solution flocculant afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable. Après 20 min, les hauteurs des produits sont mesurées. L'équivalent de sable est le rapport hauteur du sable sur hauteur totale. La valeur de l'équivalent de sable est donnée conformément à la norme **NF EN 933-8** dans le **Tableau II.14**.

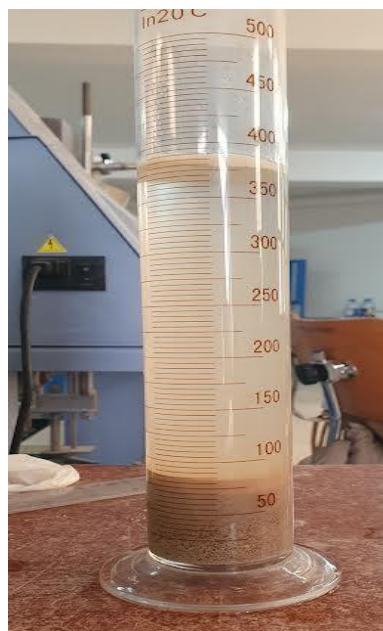


Fig II.20 : Essai d'équivalent de sable

Tableau II.13 : Qualité du sable selon les valeurs d'équivalent de sable

E.S	Nature et qualité du sable
$E.S < 60$	Sable argileux qui présente un risque de retrait ou de gonflement et un problème d'adhérence. C'est un sable à rejeter pour les bétons de qualité.
$60 \leq E.S < 70$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand on ne craint particulièrement pas le retrait.
$70 \leq E.S < 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour des bétons de haute qualité (valeur optimale $E.S = 75$, $E.S.V = 80$)
$E.S \geq 80$	Sable très propre et une absence presque totale de fines argileuses, ça présente un risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau

Tableau II.14 : Les résultats de l'équivalent de sable

ES	Limite de valeur	Observation
82.35	$E.S \geq 80$	Sable très propre

3.2.6. Mesure de la teneur en carbonate de calcium CaCO_3 :

Comme nous avons déjà défini le principe et le but de l'essai dans la partie « Argile », Le résultat de cet essai (**Fig II.21**) pour le sable selon la norme **NF P94-048** est présenté dans le **Tableau II.15**.

**Fig II.21 :** Détermination de la teneur en carbonate de calcium dans le sable

Tableau II.15 : Résultats de la teneur en carbonate de calcium pour le sable

Masse de CaCO3	Volume de CO2	$x = \frac{(132 \times 100)}{22400} = 0,60g$
100g	22400 ml	
x	132ml	
Masse de CaCO3	Masse de roche	$x = \frac{(0,60 \times 100)}{0,54} = 111\% \cong 100\%$
0,60g	0,54g	
x	100g	
D'après les résultats trouvés le matériau étudié provient d'une roche calcaireuse		

3.3. Synthèse et dénomination des matériaux utilisés :

D'après les valeurs des limites d'Atterberg de l'argile, et en les comparant à la charte de plasticité, nous constatons que l'argile se situe dans la zone des argiles, tout en étant très proche de celle des limons. De plus, la limite de liquidité de 50 % se trouve entre les zones peu plastique et très plastique. Par ailleurs, les résultats de l'essai au bleu de méthylène indiquent que le matériau est un sol limoneux de plasticité moyenne. Ainsi, à la lumière de ces deux essais complémentaires, nous pouvons conclure que l'argile étudiée est une « **Argile limoneuse moyennement plastique** ».

D'après les résultats de l'équivalent du sable, il apparaît que le sable est très propre. De plus, l'essai au bleu de méthylène, dont la valeur est inférieure à 1,5, confirme également que le sable est de haute qualité. Enfin, le module de finesse indique qu'il s'agit d'un sable très fin. En conséquence, nous pouvons conclure que le sable étudié est un « **Sable fin très propre** ».

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, différents essais ont été réalisés sur l'argile et le sable afin de déterminer certains paramètres physiques, chimiques et géotechniques, dans le but d'identifier plus précisément les matériaux étudiés. L'objectif est également d'observer la variation de certains paramètres dans une plage définie par les normes. De plus, nous cherchons à établir une dénomination précise des matériaux utilisés.

D'après les résultats d'identification, l'argile est classifiée comme une argile limoneuse moyennement plastique, provenant d'une roche marneuse. Quant au sable, il est identifié comme un sable fin très propre, issu d'une roche calcaire. Ces résultats d'identification constitueront les fondements du prochain chapitre, qui se concentrera sur l'étude expérimentale des mortiers.

CHAPITRE III

Etude expérimentale sur mortier

1.Introduction

Les résultats du chapitre précédent ont fourni les propriétés d'identification indispensables à la compréhension de cette nouvelle phase de l'étude. Ce chapitre traite de la stabilisation de mortiers de terre composés essentiellement de sable et d'argile, par l'incorporation de différents ajouts, dans le but d'évaluer leurs performances mécaniques et thermiques. Les formulations ainsi développées doivent satisfaire à des exigences précises, présentées en détail dans ce qui suit.

2.Préparation des échantillons

Il est à noter que les matières premières de cette étude, à savoir le sable et l'argile, proviennent de la région de Tlemcen. Plus précisément, le sable a été extrait du gisement de Bouihi, tandis que l'argile, sous forme remaniée, a été prélevée aux abords de l'unité Ceram DIVINDUS située à Remchi. Une quantité approximative de 100 kg pour chaque matériau a été transportée vers le laboratoire de mécanique des sols de l'Université d'Ain Témouchent afin de procéder à la confection des différents mortiers.

Le protocole de préparation a débuté par un séchage initial à l'air libre durant 24 à 48 heures, visant à dissiper l'eau de surface. Les matériaux ont ensuite été introduits dans une étuve thermorégulée à une température de 105 ± 5 °C pendant une durée de 24 heures (suivant les prescriptions de la norme NF P 94-050) pour garantir l'élimination totale de l'humidité résiduelle.

Une fois séchée, l'argile a subi un broyage mécanique au laboratoire jusqu'à l'obtention d'une fine texture. Cette opération, essentielle pour l'homogénéisation de la structure granulaire, a été complétée par un tamisage à la maille de 0,125 mm. La poudre obtenue a aussitôt été stockée dans des contenants étanches afin de la prémunir contre toute réhydratation ou pollution extérieure. En parallèle, le sable a été passé au tamis de 5 mm dans le but d'écarter les éléments grossiers et de maîtriser son fuseau granulométrique, assurant ainsi l'homogénéité requise pour la suite des essais expérimentaux.

3.Choix des matériaux

Dans les mortiers de terre étudiés, l'argile et le sable jouent des rôles complémentaires et essentiels. L'argile agit comme un liant naturel qui apporte la plasticité et la rétention d'eau nécessaires à la mise en œuvre ; le choix d'une argile à plasticité moyenne permet ici de limiter

le retrait et la fissuration tout en optimisant la cohésion et la quantité d'eau requise. De son côté, le sable sert de squelette granulaire pour réguler la plasticité de la matrice fine, minimisant ainsi l'apparition des fissures. L'utilisation spécifique d'un sable fin et propre garantit en outre une texture homogène et une esthétique soignée, idéale pour des applications en revêtement mural.

Néanmoins, la pérennité de cette matrice brute (Argile + Sable) demeure limitée face aux sollicitations hydriques et mécaniques. Pour y remédier, notre démarche expérimentale s'est articulée autour de deux approches de stabilisation : l'utilisation de la chaux seule, puis l'association de la chaux et de la pouzzolane.

L'introduction de la chaux seule à modifier à court terme la structure argileuse par floculation, améliorant ainsi la stabilité volumétrique et réduisant le retrait. Dans un second temps, l'incorporation conjointe de la pouzzolane permet de valoriser la chaux libre par le biais de la réaction pouzzolanique. Ce couplage binaire génère de nouveaux composés hydratés stables et insolubles (de type C-S-H et C-A-H) qui densifient la microstructure. Ce double processus permet non seulement de bloquer les variations volumétriques pour empêcher la fissuration, mais accroît de manière synergique la durabilité et la capacité portante du matériau, garantissant la pérennité des revêtements formulés.

4.Préparations des mélanges secs

Dans cette étude, trois formulations principales ont été développées en ajustant les proportions de sable et d'argile, ainsi qu'en introduisant des agents stabilisants. La première série fait office de témoin (sans ajout), la deuxième intègre 5 % de chaux, et la troisième combine 5 % de chaux et 5 % de pouzzolane. Le détail de ces mélanges est consigné dans le **Tableau III.1** Il convient de souligner que le dosage de ces constituants a été réalisé de manière pondérale et non volumique, afin de s'affranchir des écarts liés aux différences de masse volumique apparente des matériaux. Bien que la pratique sur les chantiers algériens repose traditionnellement sur des dosages volumiques approximatifs (à la brouette ou au seau), le passage à une approche pondérale en laboratoire est indispensable pour garantir la reproductibilité des éprouvettes. Dans ce contexte, le contrôle rigoureux de la teneur en eau in situ s'avère essentiel pour s'assurer de la conformité et de la régularité du gâchage des mortiers.

Tableau III.1 : Formules adoptées dans cette recherche

Formule
100% Argile
90% Argile + 10% Sable
80% Argile + 20% Sable
95% Argile + 5% Chaux
85% Argile + 10% Sable + 5% Chaux
80% Argile + 15% Sable + 5% Chaux
70% Argile + 25% Sable + 5% Chaux
60% Argile + 35% Sable + 5% Chaux
50% Argile + 45% Sable + 5% Chaux
40% Argile + 55% Sable + 5% Chaux
55% Argile + 35% Sable + 5% Chaux + 5% Pouzzolane
45% Argile + 45% Sable + 5% Chaux + 5% Pouzzolane
35% Argile + 55% Sable + 5% Chaux + 5% Pouzzolane

5.Choix de la teneur en eau de mélange

Pour mener à bien ce programme expérimental, une série d'essais a été réalisée sur différents mélanges d'argile et de sable élaborés à des teneurs en eau distinctes. Cette démarche vise à identifier le dosage en eau optimal qui garantit une ouvrabilité adéquate du matériau, tout en limitant les phénomènes de retrait et l'apparition subséquente de fissures.

La détermination de la teneur en eau optimale des mélanges s'effectue en augmentant de manière progressive la quantité d'eau introduite par rapport à la matière sèche, tout en contrôlant l'évolution de la maniabilité (**figure III.1**). Le processus est interrompu lorsque le mortier atteint une consistance plastique, caractérisée par un étalement compris entre 150 et 180 mm.

Cette consistance à l'état frais a été mesurée conformément à la norme NF EN 1015-3 (méthode de la table à secousses). Un moule tronconique est rempli de mortier frais, puis retiré verticalement. La table à secousses est ensuite actionnée à 15 reprises, et le diamètre d'étalement du mortier est mesuré selon deux directions orthogonales à l'aide d'un pied à coulisse. Cette valeur permet de quantifier la fluidité du mélange et d'ajuster sa teneur en eau si nécessaire. Pour chaque formulation, l'essai a été répété sur trois échantillons afin d'en retenir la valeur moyenne.

**Figure III.1 : Table à secousses****Tableau III.2 : Teneur en eau adoptée pour les différentes formulations**

Formule	Teneur en eau ω (%)
100% Argile	37
90% Argile + 10% Sable	32
80% Argile + 20% Sable	38
95% Argile + 5% Chaux	37
85% Argile + 10% Sable + 5% Chaux	42
80% Argile + 15% Sable + 5% Chaux	56
70% Argile + 25% Sable + 5% Chaux	46
60% Argile + 35% Sable + 5% Chaux	37
50% Argile + 45% Sable + 5% Chaux	29
40% Argile + 55% Sable + 5% Chaux	22
55% Argile + 35% Sable + 5% Chaux + 5% Pouzzolane	28
45% Argile + 45% Sable + 5% Chaux + 5% Pouzzolane	25
35% Argile + 55% Sable + 5% Chaux + 5% Pouzzolane	18

6. Les essais sur les mortiers à l'état frais :

6.1 Essai de retrait des mortiers frais par l'extensomètre :

L'analyse de la déformation à l'état frais (**Figure III.2**) montre que le retrait des mortiers est dicté par la teneur en argile, la déformation s'accroissant de façon critique au-delà de 80 %

d'argile pour atteindre un maximum de 8 % (formulation à 0% d'ajout). Ce phénomène est lié à l'évaporation de l'importante quantité d'eau requise par les fines, entraînant de fortes tensions capillaires, tandis que l'augmentation de la fraction de sable joue un rôle de squelette stabilisateur bloquant la déformation à une valeur minimale d'environ 2 % (Formulation avec 5% de chaux). L'introduction de la formulation bicomposante (5 % chaux + 5 % pouzzolane) s'avère particulièrement efficace pour les teneurs intermédiaires (35 % à 55 % d'argile) : elle linéarise et maîtrise parfaitement le retrait plastique (déformation contenue entre 2,8 % et 3,5 %) grâce à la floculation immédiate des argiles par la chaux, confirmant qu'à l'optimum de 45 % d'argile, le mortier présente une stabilité volumique initiale tout à fait satisfaisante (3 % de déformation).

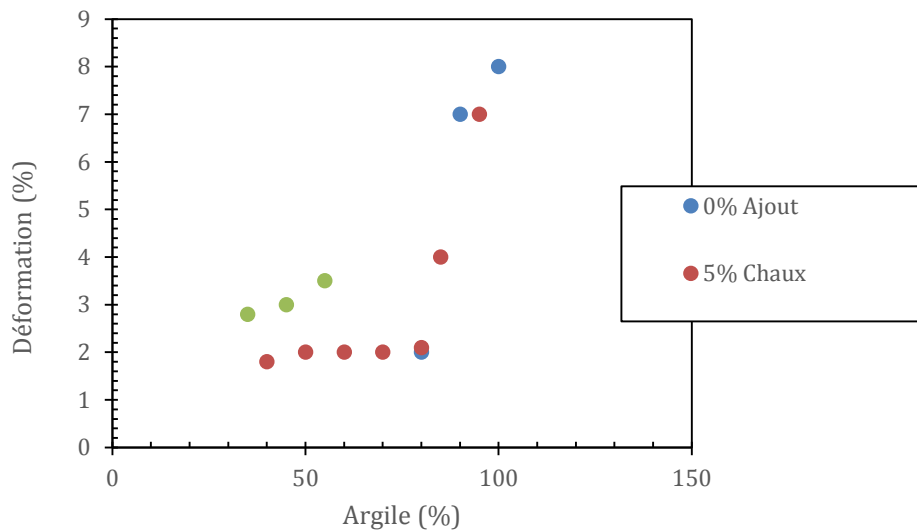


Figure III.2: Déformation des mortiers frais en fonction de la teneur en argile pour les différentes formulations



Figure III.3: Essai d'extensomètre

6.2 Essai de perte de masse :

La **figure III.4** montre que la masse des éprouvettes pour les différentes formulations diminue avec la diminution de la teneur en argile, ou indirectement dit l'augmentation de la teneur en sable, et cela peut être expliqué par la densité que le sable apporte au mortier de terre. L'ajout de la chaux ne joue pas un rôle visible sur la masse des éprouvettes quelle que soit la teneur en argile. En revanche, l'ajout de 5 % de chaux et 5 % de pouzzolane augmente la masse des éprouvettes lorsque la teneur en argile est inférieure à 50 %, et cela peut être expliqué par le fait qu'en dessous de cette limite, la pouzzolane peut réagir efficacement en développant des matériaux cimentaires issus de la réaction pouzzolanique. Autrement dit, une teneur en argile inférieure à 50 % est nécessaire pour déclencher la réaction pouzzolanique et augmenter la masse.

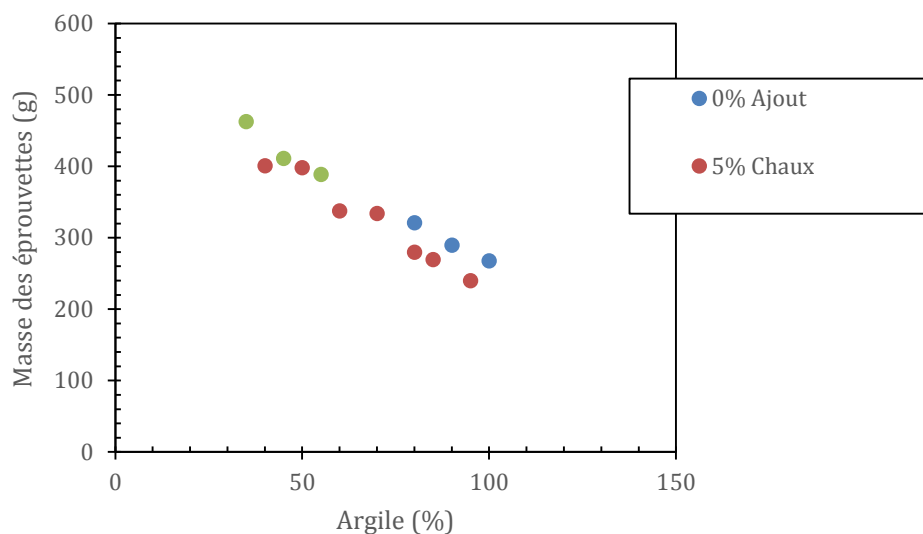


Figure III.4: Variation de la masse des éprouvettes en fonction de la teneur en argile pour les différentes formulations

Tableaux III. 3: Régression linéaire de la masse des éprouvettes en fonction de la teneur en l'argile

Formulation	Equation de régression linaire	Coefficient de détermination (R^2)
0% Ajout	$Masse = -2,66 * Argile (\%) + 532,47$	0,99
5% Chaux	$Masse = -3,13 * Argile (\%) + 537,41$	0,96
5% Chaux + 5% Pouzzolane	$Masse = -3,69 * Argile (\%) + 587,13$	0.95

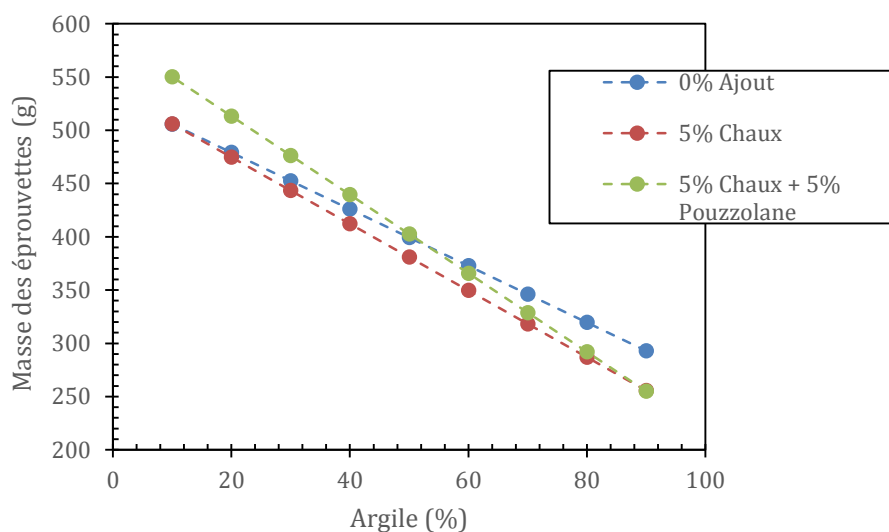


Figure III.5 Variation de la masse des éprouvettes issue de la régression linéaire pour les différentes formulations

6.3 Essai de stabilité :

La stabilité dimensionnelle du mortier à l'état frais a été évaluée conformément à la norme EN 459-2. Cet essai consiste à vérifier l'absence d'expansion anormale susceptible d'entraîner des fissurations après durcissement. Des éprouvettes ont été préparées selon les trois formulations et leurs variations dimensionnelles ont été mesurées selon la procédure normalisée. Les résultats obtenus ont révélé que la formulation avec 5% chaux et 5% pouzzolane ne manifeste aucune déformation excessive, indiquant une bonne stabilité du mortier testé.

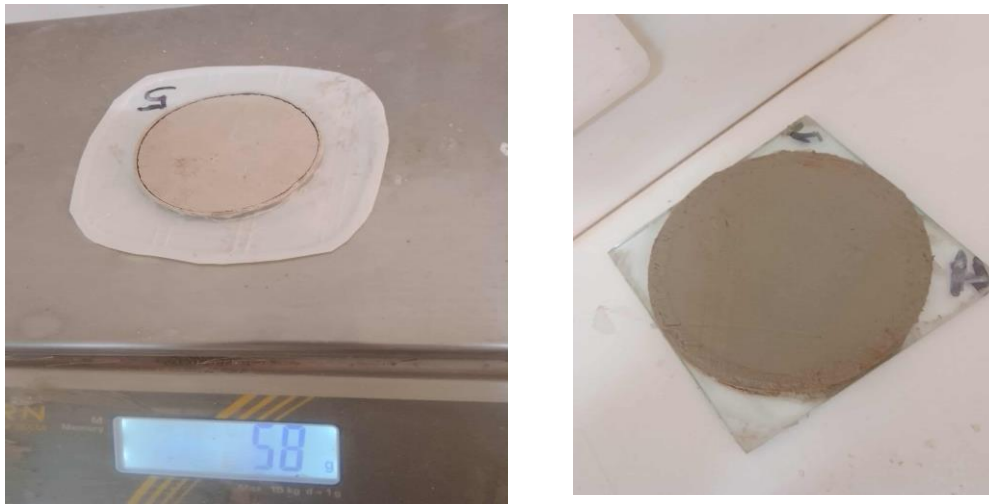


Figure III.6 : Essai de stabilité

7 Les essais sur les mortiers à l'état durci :

Après avoir présenté les différents essais sur les mortiers à l'état frais, cette section se concentrera sur les essais relatifs à l'état durci. Il est essentiel d'évaluer les propriétés mécaniques et physiques des mortiers une fois durcis, car ces caractéristiques déterminent leur performance en tant que matériau de construction.



Figure III.7: Eprouvettes démoulés et stockés à l'air libre



Figure III.8 : Les mortiers dans l'étuve

Après le moulage (**Figure III.7**), les mortiers ont été conservés dans le laboratoire pendant une période de 14 jours, dans des conditions contrôlées, à l'abri du vent et de l'exposition directe au soleil. Cette phase de pré-curage avait pour but de permettre aux échantillons de gagner en cohésion et de durcir progressivement. Une fois ce délai écoulé, les éprouvettes ont été soigneusement démoulées, pesées, puis placées dans une étuve à température constante jusqu'à stabilisation de leur masse (**Figure III.8**). Cette étape est essentielle pour garantir des conditions d'essai reproductibles lors de l'évaluation des propriétés mécaniques et physiques.

7.1 Essai de retrait :

Le retrait des mortiers à base de terre dépend de la nature de la terre, de la granulométrie du sable, de la teneur en eau et des conditions de séchage. Dans cette étude, il a été mesuré à l'aide d'un rétractomètre (**figure III.9**) sur des éprouvettes 40×40×160 mm.



Figure III.9 : Essai de retrait

La valeur du retrait est la moyenne des mesures sur trois éprouvettes, arrondie à dix micromètres. L'objectif est d'évaluer le retrait des différentes formulations terre pour assurer une meilleure stabilité dimensionnelle.

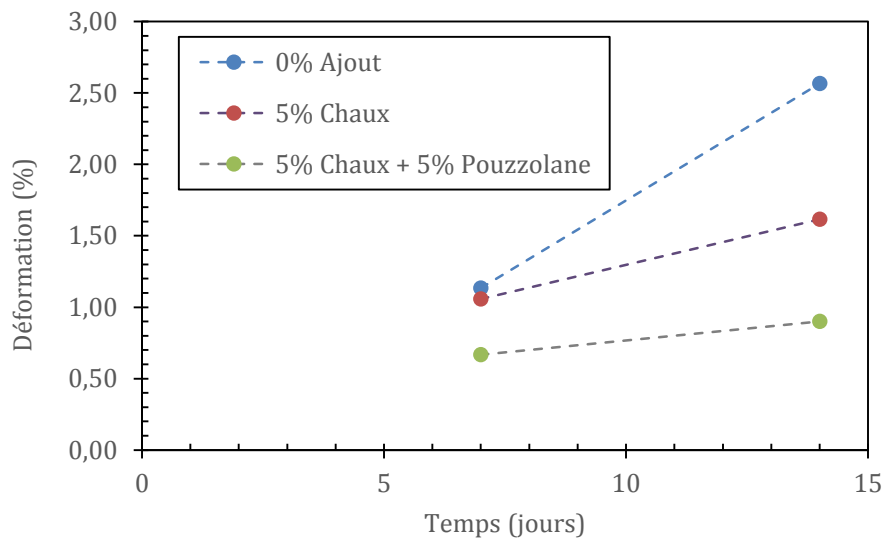


Figure III.10 : Evolution de la déformation due au retrait en fonction du temps

L'étude montre qu'une texture à 45 % d'argile stabilisée avec 5 % de chaux et 5 % de pouzzolane constitue la formulation optimale pour limiter le retrait de séchage à long terme du

mortier durci. À cet âge, la réaction pouzzolanique consomme l'eau interne et structure un réseau rigide d'hydrates (gels C-S-H) qui fige durablement la matrice cimentaire. Ce mécanisme d'armature interne bloque efficacement la contraction volumique, maintenant la déformation à une valeur plancher de seulement 0,90 % à 14 jours. À l'inverse, le mortier sans ajout manifeste une forte instabilité dimensionnelle, son retrait atteignant une valeur critique de 2,57 % sous l'effet des tensions capillaires exercées lors de l'évaporation de l'eau. Enfin, la formulation à 5 % de chaux seule occupe une position intermédiaire avec une déformation de 1,61 %, ce qui confirme l'apport indispensable de la pouzzolane pour stabiliser le matériau.

7.2 Essai goutte -a- goutte :

La motivation de cet essai est de développer un test très simple pour que les maçons puissent déterminer eux-mêmes la pertinence de leur terre. Dans cet essai, une mèche en tissu mouillée passe dans 100 mm d'eau, les gouttes d'eau tombent de 400 mm de hauteur sur l'échantillon qui est incliné de 27° par rapport à l'horizontale. Cette action veut simuler des gouttes d'eau de pluie.

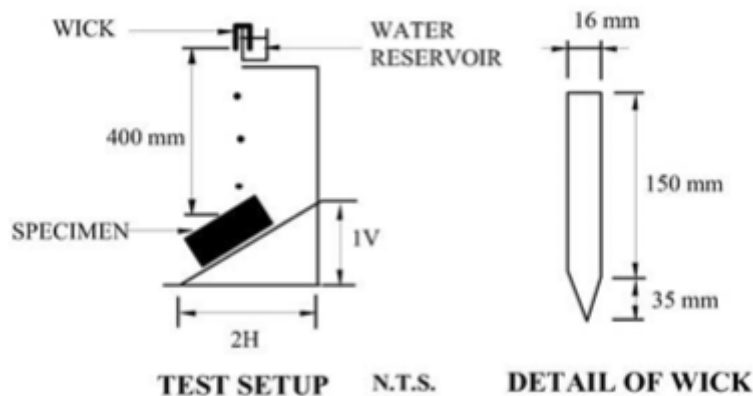


Figure III.11: Principe de l'essai de goutte -a- goutte



Figure III.12 : Essai de résistance à l'érosion (L'essai de goutte -a-goutte)

Tableau III.4: Relation entre profondeur des piques et indice d'érodabilité

Indice d'érodabilité (E_i)	Profondeur des piques (mm)	Note
1	0	Non-érodé
2	$0 > \text{et} < 5$	Légèrement érodé
3	$5 > \text{et} < 10$	Erodé
4	> 10	Très érodé

La profondeur des piques pour les trois formulations se trouve entre 0 et 5 mm. D'après le **Tableau III.4**, les mortiers sont légèrement érodés.

7.3 Essai de Résistance à l'abrasion :

La résistance à l'abrasion des mortiers de terre crue s'effectue suivant la norme expérimentale NF XP 13-901. Il s'agit de soumettre un mortier de terre à une érosion mécanique appliquée par frottement d'une brosse à pression constante sur un nombre de cycles donnés. Le brossage se fait à raison d'un aller et retour par seconde pendant une minute (soit 60 allers retours). La largeur brossée du mortier de terre comprimée ne doit pas excéder plus de 2mm de la largeur de la brosse. Cet essai déduit le coefficient d'abrasion (C_a) de mortier qui représente la perte de matière liée au brossage de la brique sur la surface d'abrasion :

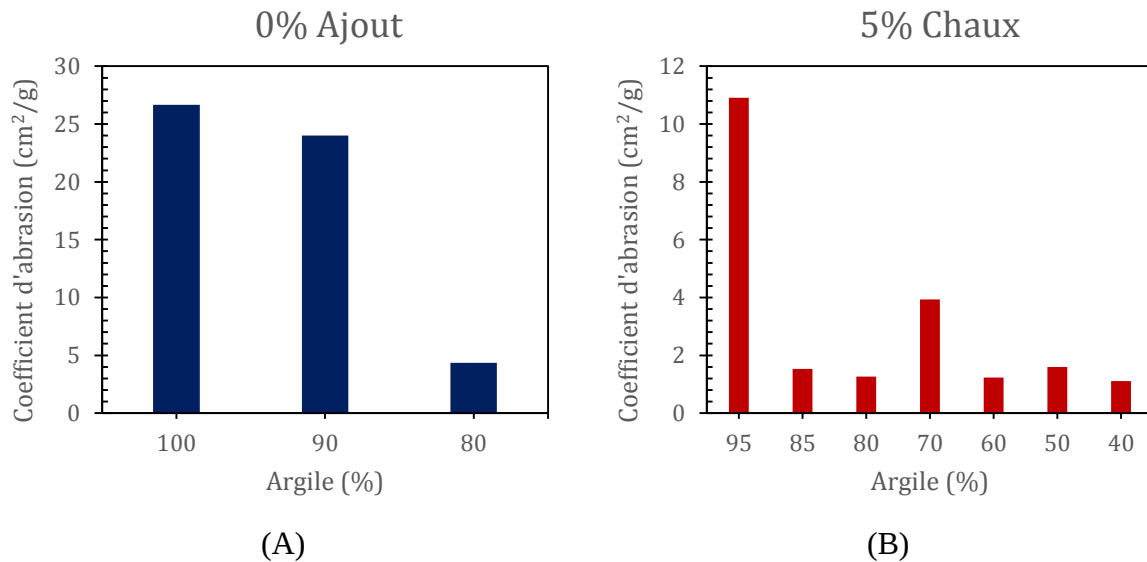
$$Ca(cm^2/g) = \frac{S}{m_0 - m_1}$$

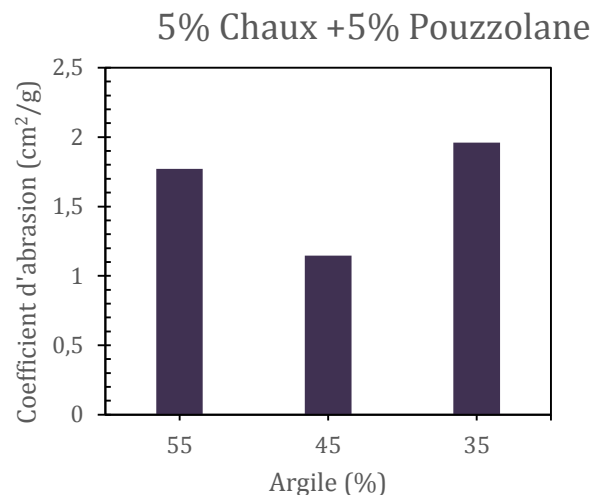
Où :

- Ca : coefficient d'abrasion du mortier
- S : Surface d'abrasion du mortier en cm^2
- m_0 : masse initiale du mortier avant abrasion en gramme
- m_1 : Masse du mortier après l'essai d'abrasion en gramme.



Figure III.13: Essai de Résistance à l'abrasion





(C)

Figure III.14: Évolution du coefficient d'abrasion en fonction de la teneur en argile pour les différentes formulations

L'analyse de la résistance à l'abrasion (**Figure III.14**) confirme que la stabilisation améliore drastiquement la durabilité de surface des mortiers de terre face à l'usure, sachant qu'un coefficient plus faible traduit une meilleure résistance. Pour le mélange témoin (0 % d'ajout), le coefficient d'abrasion diminue fortement à mesure que la teneur en argile baisse, ce qui s'explique par l'apport d'un squelette sableux dur qui vient blinder mécaniquement une matrice d'argile pure initialement très friable. L'introduction de 5 % de chaux seule engendre un durcissement remarquable de la surface, stabilisant le coefficient sous la barre des **2 (cm²/g)** grâce à la carbonatation et aux échanges ioniques qui fixent solidement les granulats. Enfin, la formulation combinant 5 % de chaux et 5 % de pouzzolane valide de manière spectaculaire l'existence d'un optimum microstructural à 45 % d'argile, où la courbe en "U" atteint son minimum absolu (**1,15 cm²/g**). À ce seuil critique, la compacité du mélange est maximale et la cinétique de la réaction pouzzolanique est idéale, générant un réseau dense d'hydrates cimentaires qui empêche le déchaussement des grains, tandis qu'un écart par rapport à cet optimum (excès ou manque de fines) recrée de la porosité ou de la fragilité matricielle.

7.4 Essai Absorption capillaire :

Les essais d'absorption capillaires sont également intéressants et faciles à effectuer. Ils renseignent globalement sur la structure et sur l'importance du réseau capillaire. Ils sont aussi utilisés en complément d'autres essais pour caractériser la durabilité du mortier. L'essai d'absorption capillaire a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme européenne

NF EN 480-5. Il consiste à déterminer le taux d'absorption par remontée capillaire, due à la force de succion, d'une éprouvette de dimension (4 x 4 x 16) cm du mortier posée à sa base sur de petits supports de telle manière que seuls les 5 premiers millimètres du bas de l'éprouvette soient immergés (**Figure III.15**). On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps jusqu'à 24h. A chaque échéance, l'éprouvette est sortie du récipient, pesée (M) et replacée dans le récipient en position vertical.



Figure III.15: Essai Absorption capillaire

Il convient de souligner qu'après quelques secondes de déroulement de l'essai, les échantillons de la formulation 0% ajout et la formulation 5% chaux commencent à se défragmenter au niveau de la base, c'est-à-dire à partir de la surface en contact avec l'eau. Ce constat indique, d'une part, l'impossibilité de poursuivre cet essai et, d'autre part, révèle que ces mortiers présentent une résistance minimale à l'effet hydrique, même dans des conditions simulant une pluviométrie allant de moyenne à faible. En revanche, la formulation contenant 5% de chaux et 5% de pouzzolane présente une résistance acceptable, préservant l'intégrité géométrique des éprouvettes. Cette stabilité permet le calcul du coefficient d'absorption (**Figure III.16**) capillaire selon l'équation suivante :

$$C_b(\%) = 100 * \frac{M_{10} - M_0}{S * \sqrt{t}}$$

Ou

M₁₀ : Masse de l'éprouvette après 10 minutes de contact avec l'eau (g).

M_0 :Masse de l'éprouvette sèche (g).

S :Surface de la face immergée (cm²)

$\sqrt{t}$:Racine carrée du temps en minutes qui correspond à 10 mn

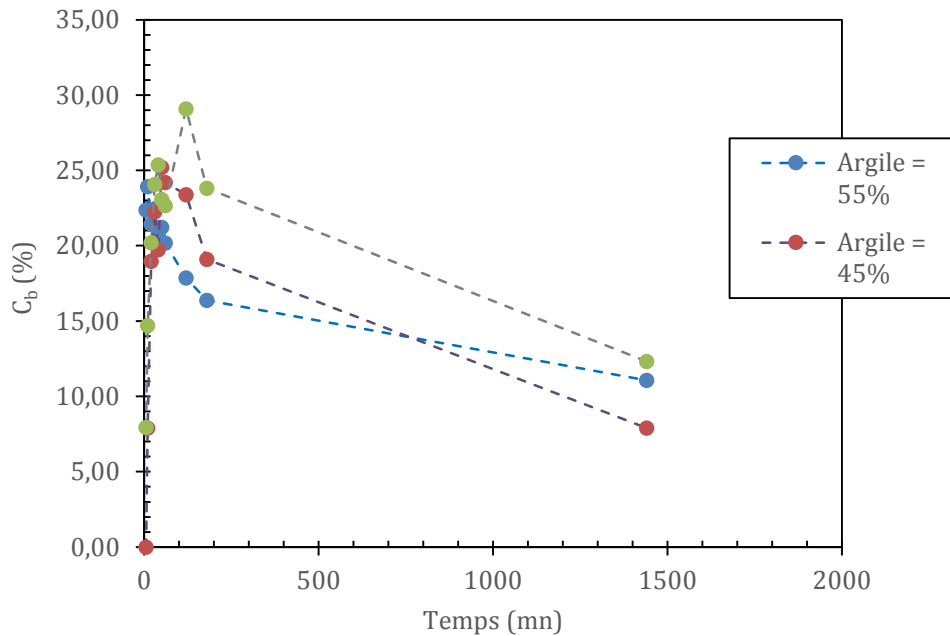


Figure III.16 : Variation de coefficient d'absorption capillaire en fonction du temps pour la formule 5% chaux et 5% pouzzolane pour les différentes teneur en argile.

L'analyse du coefficient d'absorption capillaire (**Figure III.17**) de la formulation stabilisée (5 % chaux + 5 % pouzzolane) valide de manière claire la présence d'un optimum textural à 45 % d'argile, où le coefficient C_b s'effondre à son niveau le plus bas (7,91%). À cette proportion précise, la compacité granulaire est maximale et le réseau poreux est idéalement colmaté par les hydrates issus de la réaction pouzzolanique. Aux deux extrêmes, le comportement hydrique s'altère : à 55 % d'argile, l'excès de fines engendre une forte porosité capillaire et des microfissures de retrait qui augmentent la succion ($C_b = 23,91\%$), tandis qu'à 35 % d'argile, le manque de matrice génère des vides intergranulaire entre les grains de sable non enrobés, ce qui fait remonter le coefficient à 14,7%.

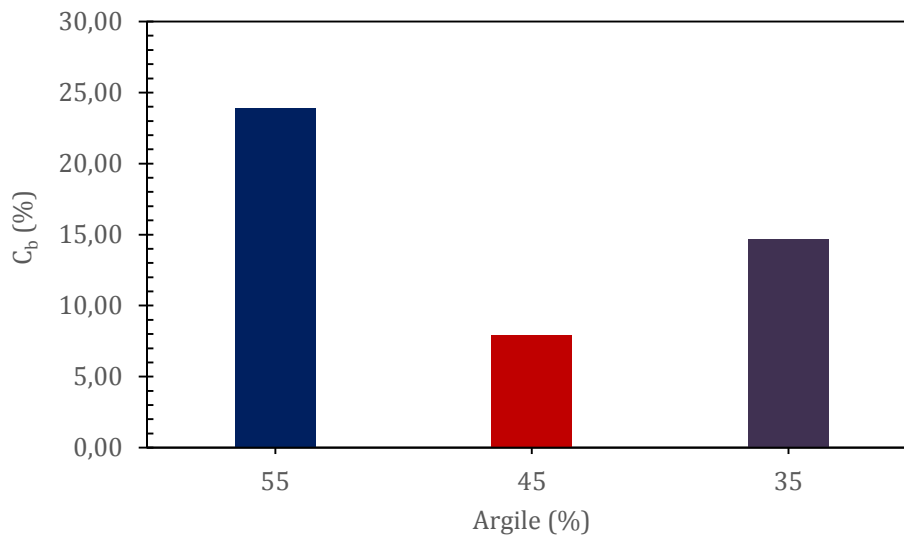


Figure III.17 Coefficient d'absorption capillaire à 10 mn pour la formule 5% chaux et 5% pouzzolane pour les différentes teneur en argile.

7.5 Essai Absorption totale

L'absorption se mesure habituellement en faisant sécher une éprouvette jusqu'à la masse constante, en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de masse exprimé en pourcentage de la masse sèche. L'essai d'absorption par immersion a été effectué effectivement, en séchant des éprouvettes (4 x 4 x 16) cm du mortier à l'étuve jusqu'à masse constante, ensuite en les immergeant totalement dans l'eau pendant 48h jusqu'à saturation des matériaux. L'objectif de cet essai est de déterminer la masse d'eau que peut absorber les éprouvettes après immersion total durant une période donnée.

De la même manière que l'essai précédent, celui-ci n'a pas pu être réalisé pour les formulations de 0% d'ajout et de 5% chaux (**Figure III.18**). En effet, une fois plongés dans l'eau, les mortiers durcis se transforment rapidement en une boue d'argile, se dissolvant en quelques minutes. Cela indique non seulement une faible résistance à l'hydratation, mais soulève également des préoccupations quant à leur performance face à des conditions d'inondation, notamment celles pouvant affecter la partie inférieure d'une structure.



Figure III.18: Essai Absorption totale pour la formulation 0% ajout et la formulation 5% chaux



Figure III.19 : Essai Absorption totale pour la formulation 5% chaux et 5% pouzzolane

En revanche, la formulation combinant 5 % de chaux et 5 % de pouzzolane (**Figure III.19**) a manifesté une résistance à l'eau nettement supérieure après immersion totale. Bien que les éprouvettes n'aient pas intégralement conservé leur intégrité géométrique initiale, présentant un léger effritement au niveau des arêtes et des bords qui a rendu leur pesée rigoureuse impossible, elles ont maintenu une cohésion d'ensemble stable. D'une manière générale, l'association chaux-pouzzolane s'impose comme la formulation optimale du point de vue de la durabilité et de la stabilité hydrique.

7.6 Conductivité thermique :

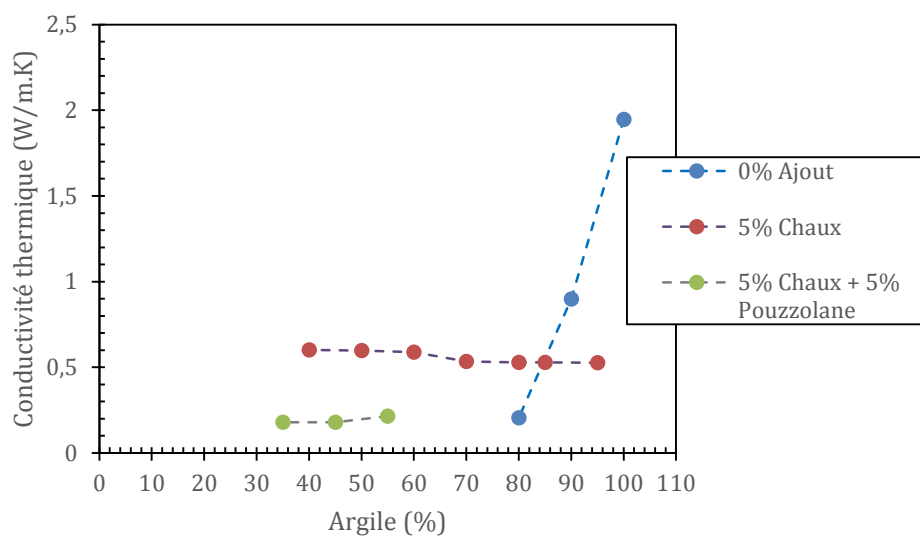


Figure III.20: Conductivité thermique en fonction de la teneur en argile pour les différentes formulations

L'étude de la conductivité thermique du mortier de terre en fonction de la teneur en argile et des ajouts (chaux, pouzzolane) (**Figure III.20**) montre que la meilleure performance isolante est obtenue avec l'ajout combiné de **5 % de chaux et 5 % de pouzzolane**, quelle que soit la teneur en argile. Cette formulation atteint une conductivité thermique d'environ **0,05 W/m·K**, valeur très faible qui place ce matériau au niveau des isolants légers conventionnels. À titre de comparaison, le mélange sans ajout ne devient intéressant qu'à faible teneur en argile (0,05 à 0,20 W/m·K entre 30 et 60 % d'argile), tandis que l'ajout de chaux seul stabilise la conductivité autour de 0,50–0,58 W/m·K sans atteindre d'excellentes performances. Ainsi, la formulation optimale pour un mortier de terre à vocation isolante est celle associant **chaux et pouzzolane**, qui garantit une très faible conductivité thermique indépendamment de la proportion d'argile.

7.7 Capacité thermique :

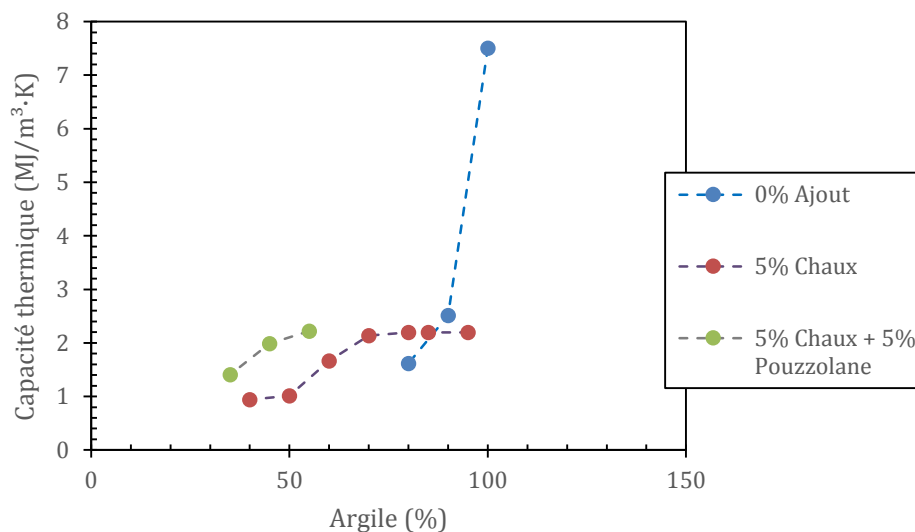


Figure III.21 : Capacité thermique en fonction de la teneur en argile pour les différentes formulations

L'évolution de la capacité thermique du mortier de terre en fonction de la teneur en argile (**Figure III.21**) montre une nette progression de cette propriété lorsque la proportion d'argile augmente, et ce pour l'ensemble des formulations étudiées. En l'absence d'ajout, la capacité thermique est maximale pour l'argile pure, traduisant une excellente aptitude au stockage de l'énergie thermique, tandis qu'elle diminue fortement lorsque la teneur en argile s'abaisse, le

sable ayant une moindre capacité de stockage. L'ajout de 5 % de chaux réduit sensiblement la capacité thermique par rapport au mélange sans ajout, quel que soit le taux d'argile. L'ajout combiné de 5 % de chaux et 5 % de pouzzolane conduit aux valeurs les plus faibles, en raison de la nature légère et poreuse de la pouzzolane. Ainsi, la **formulation la plus optimale** pour maximiser la capacité thermique, et donc l'inertie du mortier de terre, est l'**argile pure sans aucun ajout**, qui offre la plus grande capacité de stockage d'énergie thermique sur l'ensemble des compositions testées.

7.8 Diffusivité thermique :

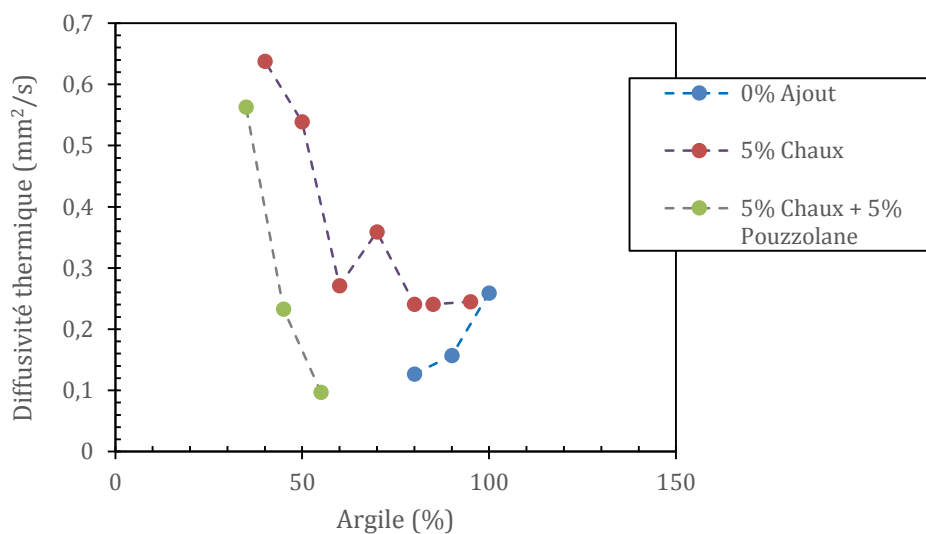


Figure III.22: Diffusivité thermique en fonction de la teneur en argile pour les différentes formulations

L'évolution de la diffusivité thermique du mortier de terre en fonction de la teneur en argile et des ajouts (**Figure III .22**) traduit la vitesse à laquelle la chaleur se propage à travers le matériau. En l'absence d'ajout, la diffusivité augmente légèrement avec la teneur en argile, l'argile pure présentant une valeur modérée, ce qui indique une propagation de la chaleur relativement lente, cohérente avec sa forte inertie. L'ajout de 5 % de chaux modifie peu cette tendance globale, maintenant des valeurs intermédiaires. En revanche, l'ajout combiné de 5 % de chaux et 5 % de pouzzolane conduit aux diffusivités les plus élevées, malgré une conductivité très faible. Ce résultat, en apparence paradoxal, est lié à la très faible capacité thermique de cette formulation qui entraîne une augmentation de la diffusivité, même avec une conductivité minime. Ainsi, la formulation qui présente une diffusivité élevée (matériau qui réagit rapidement aux variations de température) est celle associant **5 % de chaux et 5 % de**

pouzzolane. À l'inverse, la **formulation la plus optimale** pour une diffusivité faible (matériau qui amortit et ralentit la propagation de la chaleur) est l'**argile pure sans ajout**, qui favorise un comportement thermo-inertiel.

7.9 Résistivité thermique :

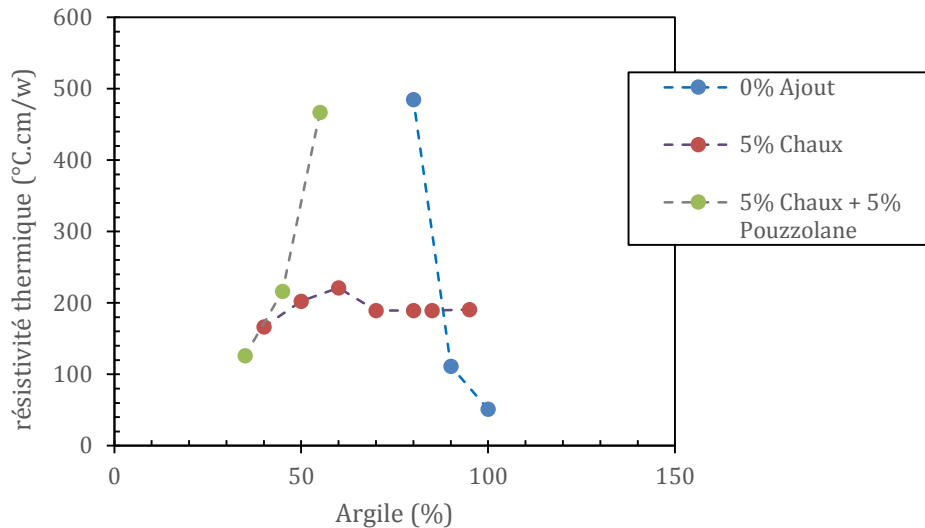


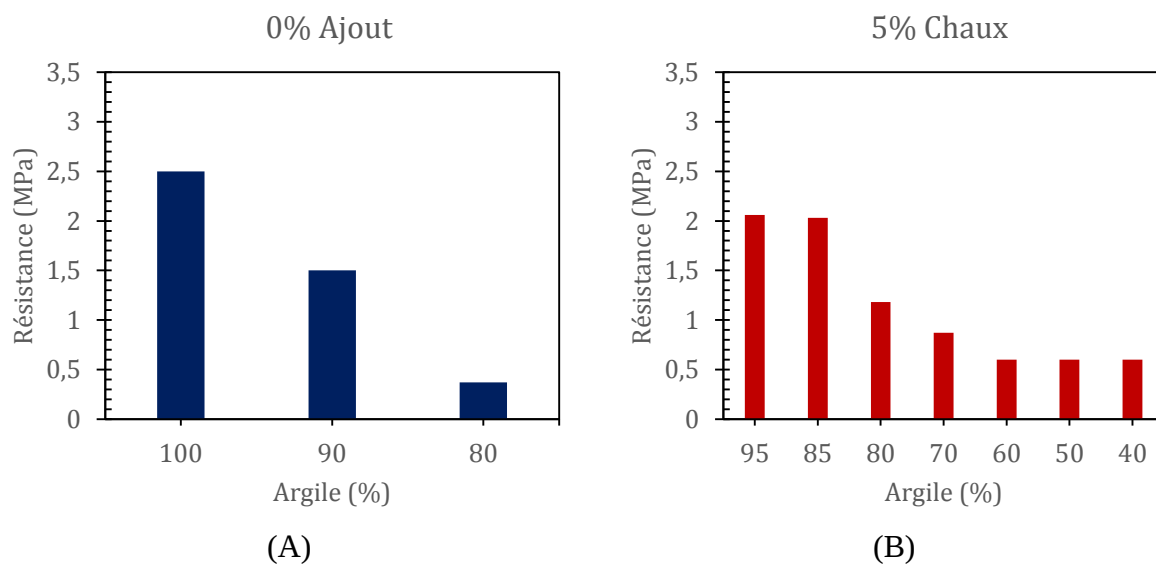
Figure III.23 : Résistivité thermique en fonction de la teneur en argile pour les différentes formulations

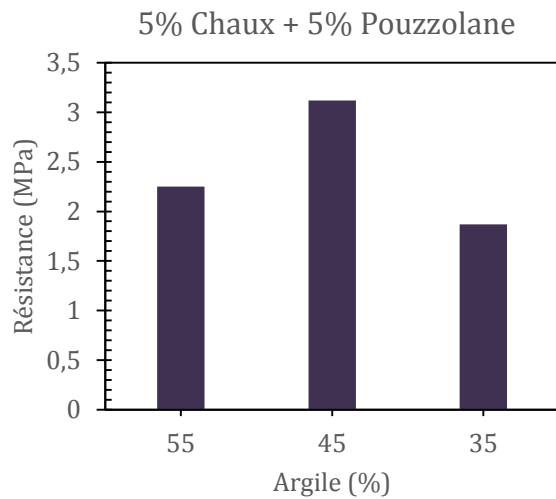
L'évolution de la résistivité thermique du mortier de terre en fonction de la teneur en argile et des ajouts (**Figure III.23**) est directement liée à l'inverse de la conductivité thermique : plus un matériau est isolant, plus sa résistivité est élevée. En l'absence d'ajout, on observe une augmentation progressive de la résistivité lorsque la teneur en argile diminue, avec un pic marqué vers les faibles teneurs en argile (matériau plus sableux et poreux), tandis que l'argile pure présente la résistivité la plus faible, confirmant son caractère conducteur. L'ajout de 5 % de chaux élève globalement la résistivité par rapport au mélange sans ajout, avec des valeurs relativement stables autour de 150 à 200 °C.cm/W quelle que soit la teneur en argile, traduisant un effet homogénéisateur de la chaux sur les performances isolantes. L'ajout combiné de 5 % de chaux et 5 % de pouzzolane conduit aux résistivités les plus élevées, atteignant localement des valeurs très importantes, en raison de la très faible conductivité de cette formulation. Ainsi, la **formulation la plus optimale** pour maximiser la résistivité thermique, donc l'isolation, est celle associant **5 % de chaux et 5 % de pouzzolane**, quelle que soit la teneur en argile. À l'inverse, l'**argile pure sans ajout** présente la résistivité la plus faible, ce qui en fait le matériau le moins isolant de l'étude.

7.10 Résistance la compression :

La Figure III.24 présente l'évolution de la résistance à la compression (à 28 jours) des différentes formulations en fonction du pourcentage d'argile. Pour le mélange (0 % d'ajout) et la formulation contenant 5 % de chaux seule, on observe que la résistance à la compression diminue à mesure que la teneur en argile diminue. En revanche, la formulation enrichie de 5 % de chaux et 5 % de pouzzolane affiche un comportement distinct, caractérisé par un pic de résistance maximale pour une teneur optimale en argile de 45 %.

D'une manière générale, cette formulation (ajout de chaux-pouzzolane) développe les performances mécaniques les plus élevées (**3,12 MPa**) parmi l'ensemble des mélanges testés. Cette supériorité est directement attribuable au développement de la réaction pouzzolanique au cours de la cure, favorisant la formation d'hydrates cimentaires. Le maximum enregistré à 45 % d'argile met en évidence l'existence d'un optimum microstructural : à ce seuil précis, l'équilibre entre la matrice argileuse, le squelette sableux et la pouzzolane permet d'atteindre une compacité maximale et d'optimiser la cinétique de la réaction pouzzolanique, se traduisant par une amélioration substantielle de la résistance à la compression.





(C)



(D)

Figure III.24 Evolution de la résistance à la compression pour les différentes formulations (A, B, C) et Essai de compression (D)

7.11 Résistance la traction par flexion :

L'analyse de la résistance à la traction (à 28 jours) par flexion (**Figure III.25**) met en évidence deux comportements distincts selon la nature de la stabilisation. Pour le mélange témoin (0 % d'ajout) et la formulation contenant 5 % de chaux seule, la résistance diminue de manière continue et linéaire à mesure que la teneur en argile décroît. Ce phénomène s'explique par le fait que l'argile constitue le liant unique ou principal assurant la cohésion intergranulaire ; sa réduction au profit du sable prive le matériau de sa matrice cimentaire naturelle, ce qui affaiblit sa capacité à reprendre les efforts d'extension. À l'inverse, la formulation associant 5 % de chaux et 5 % de pouzzolane affiche un comportement singulier caractérisé par un pic de résistance maximale à une teneur optimale en argile de 45 %. À ce seuil précis, l'équilibre microstructural entre le squelette de sable et la fraction fine est idéalement atteint, offrant les conditions optimales pour le développement de la réaction pouzzolanique. Les hydrates cimentaires ainsi formés viennent combler les vides et ponter efficacement les pores, tandis qu'aux extrémités (35 % et 55 % d'argile), un manque de liant ou un excès de fines nuit à la compacité et à l'efficacité de cette activation chimique.

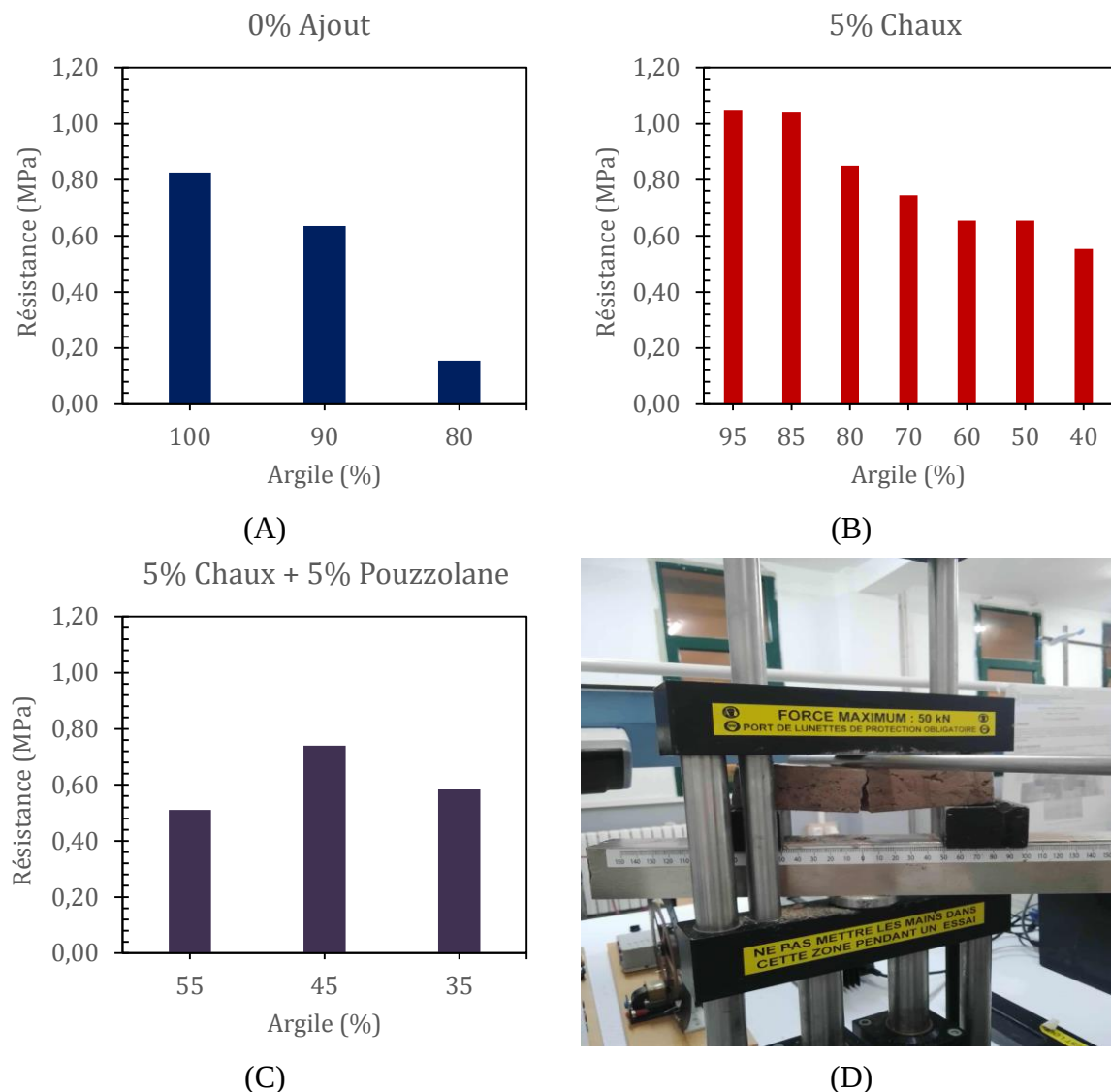


Figure III.25 : Evolution de la résistance à la traction par flexion pour les différentes formulations (A, B, C) et Essai de traction par flexion (D)

8. Conclusion :

Dans ce chapitre, plusieurs essais ont été menés sur les trois formulations principales après avoir rigoureusement déterminé leur teneur en eau optimale. Les résultats obtenus sur les mortiers à l'état frais révèlent un excellent comportement vis-à-vis du retrait et la stabilité pour le mélange stabilisé à 5 % de chaux et 5 % de pouzzolane. Cette même formulation affiche également les meilleures performances en termes de résistance mécanique. Par ailleurs, l'analyse des propriétés thermiques met en évidence un compromis fondamental entre l'isolation et l'inertie ; la formulation combinant 5 % de chaux et 5 % de pouzzolane optimise la résistance thermique au détriment de l'inertie, tandis que la matrice argileuse pure (sans ajout) maximise

l'inertie mais présente un pouvoir isolant plus faible. Enfin, si la stabilisation à la chaux seule montre des résultats limités, l'action conjointe de la pouzzolane s'avère particulièrement efficace. En conclusion, au vu de cette étude expérimentale, il est recommandé de retenir la formulation optimale suivante : 45 % d'argile et 45 % de sable, stabilisés avec 5 % de chaux et 5 % de pouzzolane.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Ce travail de recherche confirme l'intérêt technique et environnemental de valoriser des matériaux locaux pour concevoir des mortiers de revêtement respectueux de l'environnement. Les essais mettent en évidence que la terre crue utilisée à l'état naturel souffre d'un fort retrait au séchage et d'une sensibilité critique à l'eau qui provoque sa dégradation et sa destruction totale en immersion. Si l'incorporation de sable permet de stabiliser les variations de volume en formant un squelette granulaire rigide, c'est l'action combinée de la chaux et de la pouzzolane qui transforme véritablement le comportement du matériau. Ce traitement binaire crée un réseau interne solide qui empêche la dissolution, maintient parfaitement la forme des éprouvettes sous l'eau et améliore considérablement leur durabilité face à l'usure et à l'abrasion. Les résultats de notre étude mettent clairement en évidence une formulation idéale, combinant l'argile et le sable en proportions égales avec les deux stabilisants et en particulier la pouzzolane. À cet équilibre textural précis, le mortier atteint ses meilleures performances mécaniques, limite son retrait à long terme à sa valeur plancher et offre un excellent pouvoir isolant thermique au détriment de sa capacité à stocker la chaleur. Cette étude valide ainsi une formule de mortier à la fois durable, résistante et efficace, tout à fait adaptée pour des revêtements protecteurs de surface dans le bâtiment.

REFERENCE

Référence

- [1] J. Paulus, "Construction en terre crue : dispositions qualitatives, constructives et architecturales – Application à un cas pratique : Ouagadougou," Mémoire de Master, Université de Liège, Belgique, 2015.
- [2] L. A. Mango Itulamya, "Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée," Mémoire de Master, Université de Liège, Belgique, 2019.
- [3] K. A. J. Ouedraogo, "Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux," Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier – Toulouse III, France, NNT: 2019TOU30199, 2019.
- [4] L. Guerin, *Principes directeurs pour l'emploi de la terre crue*, Bureau International du Travail (BIT), International Labour Office, Genève, 1985.
- [5] D. Gauzin-Müller et M. Fuchs, "Construire en terre coulée : une révolution ?", *D'Architecture*, n°. 278, 2020.
- [6] Cycle Terre, "Cycle Terre : Fabrique de matériaux en terre crue," 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cycle-terre.eu>
- [7] O. Izemmouren, "Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée," Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2016.
- [8] C. Blanchard, "Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués," Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 2000.
- [9] AFNOR, *Caractérisation des déchets - Lixiviation - Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues - Partie 2 : essai en bâchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 4 mm*, Norme NF EN 12457-2, 2002.
- [10] CEREMA, *Acceptabilité environnementale des matériaux alternatifs en technique routière — Évaluation environnementale des sédiments et des terres excavées*, Bron: Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), France, 2019.
- [11] L. Rinino, "TERRE : freins et tensions de la filière terre crue française," Rapport d'étude, 2021.
- [12] V. Galmiche, *Construction et réhabilitation en terre crue : points de vigilance*, Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, France, 2019.
- [13] U. de Filippis, "Stabilisation de la terre par activation alcaline : Étude des phénomènes physicochimiques et de leur influence sur les propriétés d'usage," Thèse de doctorat, Université de Lyon, France, NNT: 2021LYSEI112, 2021.
- [14] O. Bouchenafa, "Mécanosynthèse et matériaux de construction : Optimisation et application pour la clinkérisation et la géopolymérisation," Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France, 2019.

Référence

- [15] H. Houben et H. Guillaud, *Traité de construction en terre*, CRA Terre, Éditions Parenthèses, Marseille, France, 2006.
- [16] M. Venuat, *Le traitement des sols à la chaux et au ciment*, Châtillon-sous-Bagneux: Édité par l'auteur, France, 1980.
- [17] P. Doat, A. Hays, H. Houben, S. Matuk, et F. Vitoux, *Construire en terre*, Éditions Alternatives et Parallèles, collection An Architecture, Paris, France, 1979.
- [18] N. T. Tran, "Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière," Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, 2009.
- [19] P. Moszkowicz et R. Barna, "Stabilisation - solidification des déchets," *Techniques de l'Ingénieur*, vol. G 04, article G 2 080, 2001.
- [20] United Nations, *Earth Construction Technology*, Nairobi, Kenya: United Nations Centre for Human Settlements (UNCHS), 1992.
- [21] F. G. Bell, "Lime stabilization of clay minerals and soils," *Engineering Geology*, vol. 42, n°. 4, pp. 223-237, 1996.
- [22] J. F. Jarrige, "Chronology of the Earlier Periods of the Greater Indus as seen from Mehrgarh, Pakistan," dans *South Asian Archaeology*, B. Allchin, Éd. Cambridge University Press, 1989, pp. 21-28.
- [23] A. Le Roux, "Contribution à l'étude du traitement à la chaux des matériaux argileux," Thèse de doctorat, Université des Sciences d'Orsay, France, 1969.
- [24] A. Le Roux, "Contribution à l'étude du traitement à la chaux des matériaux argileux," Thèse de doctorat, Université des Sciences d'Orsay, France, 1969.
- [25] M. Chauquette, "La stabilisation à la chaux des sols argileux du Québec," Thèse de Ph.D., Université Laval, Québec, Canada, 1988.
- [26] J. Locat, M. A. Bérubé, et M. Chauquette, "Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development," *Revue canadienne de géotechnique*, vol. 27, n°. 3, pp. 294-304, 1990.
- [27] C. D. F. Rogers, S. Glendinning, et N. Dixon, Éd., *Proceedings of the seminar on Lime Stabilization*, Loughborough University, Civil & Building Engineering, TRB, National Research Council, Washington, D.C., State of the art report 5, 1987.
- [28] A. Kézdi, *Stabilized Earth Roads, Developments in geotechnical engineering 19*, New York, NY: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [29] R. K. Moore, "Lime Stabilization," Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., State of the art report 5, 1987.

Référence

- [30] Furian, et al., "Hydration and pozzolanic reactions of aluminosilicate materials and lime," dans *Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, France, Vol. IV, pp. 78-85, 1980.
- [31] A. Lasledj, "Traitement des sols argileux à la chaux : processus physico-chimique et propriétés géotechniques," Thèse de doctorat, Université d'Orléans, France, 2009.
- [32] F. De Larrard, "Formulation des bétons et propriétés des bétons à très hautes performances," Rapport de recherche interne LCPC, n°. 149, Paris, France, 1988.
- [33] R. Anger, "Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction," Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, NNT: 2011ISAL0154, 2011.
- [34] G. Giuffrida, R. Caponetto, et F. Nocera, "Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials: A Literature Review," *Sustainability*, vol. 11, n°. 19, p. 5342, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11195342>
- [35] A. Lam, "Étude de terres excavées stabilisées par des liants à base de laitier: corrélation des propriétés physico-chimiques, mécaniques, thermiques et hygrothermiques," Thèse de doctorat, Université Gustave Eiffel, France, 2024.
- [36] AFNOR, *Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique*, Norme NF P 18-459, 2010.
- [37] K. Lachebi, "Étude de la compacité du béton en fonction de la granularité," Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2021.
- [38] S. Messaadi et H. Zaidi, "Effet du sable sur les caractéristiques mécaniques du béton de terre stabilisée," Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arréridj, Algérie, 2019.
- [39] A. Cuccurullo, D. Gallipoli, A. W. Bruno, C. Augarde, P. Hughes, et C. La Borderie, "Influence of soil grading on the hygro-mechanical properties of hyper-compacted earth for masonry construction," *Industrial Crops and Products* / Conférence de recherche, 2018.
- [40] F. McGregor, A. Heath, E. Fodde, et A. Shea, "Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks," *Building and Environment*, vol. 75, pp. 11-18, 2014.
- [41] O. Helson, "Comportement thermo-hydro-mécanique et durabilité des bétons de sol : influence des paramètres de formulation et conditions d'exposition," Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France, NNT: 2017CERG0860, 2017.
- [42] AFNOR, *Méthodes d'essais des ciments*, Norme NF EN 196, 2016.
- [43] AFNOR, *Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206*, Norme NF EN 206/CN, 2014.

Référence

- [44] O. Izemmouren, A. Guettala, et S. Guettala, "Mechanical Properties and Durability of Lime and Natural Pozzolana Stabilized Steam-Cured Compressed Earth Block Bricks," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 33, pp. 1321–1333, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9904-6>
- [45] R. Bahar, M. Benazzoug, et S. Kenai, "Performance of compacted cement-stabilised soil," *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, n°. 7, pp. 811-820, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003>
- [46] A. Amriou, M. Bencheikh, H. Ziani, L. Guelmine, et S. Deboucha, "Effet de la teneur de sable et du gravier sur les caractéristiques mécaniques du béton d'argile stabilisé," *Revue des Matériaux*, Université de Bordj Bou Arréridj / Université de M'sila, 2019.
- [47] S. Wild, J. M. Kinuthia, G. I. Jones, et D. D. Higgins, "Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils," *Engineering Geology*, vol. 51, n°. 1, pp. 37-53, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00039-8)
- [48] O. Izemmouren et A. Guettala, "Effet du laitier de haut fourneau sur les propriétés d'ingénierie des briques de terre comprimée à base d'un sol portant de sulfate," dans *Conférence Matériaux 2014 – Colloque Écomatériaux*, Montpellier, France, 2014.
- [49] C. Flament, "Valorisation des fines de lavage de granulats : Application à la construction en terre crue," Thèse de doctorat, Université d'Artois, Béthune, France, 2013.
- [50] J. L. Izard, *L'inertie thermique dans le bâtiment*, Laboratoire ABC ENSA-Marseille, ENVIROBAT-Méditerranée, 2006.
- [51] F. Munaretto, "Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments," Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, NNT: 2014ENMP0011, 2014.
- [52] L. Zhang, A. Gustavsen, B. P. Jelle, L. Yang, T. Gao, et Y. Wang, "Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks," *Construction and Building Materials*, vol. 151, pp. 504-511, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.047>
- [53] Y. Millogo, J. C. Morel, J. E. Aubert, et K. Ghavami, "Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 52, pp. 71–78, 2014.
- [54] D. Medjelekh, L. Ulmet, et F. Dubois, "Characterization of hygrothermal transfers in the unfired earth," *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 487–492, 2017.
- [55] M. Indekeu, M. Woloszyn, A. C. Grillet, L. Soudani, et A. Fabbri, "Towards Hygrothermal characterization of rammed earth with small-scale dynamic methods," *Energy Procedia*, vol. 132, pp. 297–302, 2017.

Référence

- [56] M. Hall et D. Allinson, "Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials," *Building and Environment*, vol. 44, n°. 9, pp. 1935-1942, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.007>
- [57] H. Cagnon, J. E. Aubert, M. Coutand, et C. Magniont, "Hygrothermal properties of earth bricks," *Energy and Buildings*, vol. 80, pp. 208-217, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.024>
- [58] A. M. Tang, Y. J. Cui, et T. T. Le, "A study on the thermal conductivity of compacted bentonites," *Applied Clay Science*, vol. 41, n°. 3-4, pp. 181-189, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.11.001>
- [59] E. M. Sterling, A. Arundel, et T. D. Sterling, "Criteria for human exposure to humidity in occupied buildings," *ASHRAE Transactions*, vol. 91, n°. 1, pp. 611-622, 1985.
- [60] M. Jermanet R. Černý, "Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials," *Energy and Buildings*, vol. 53, pp. 39-46, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.002>
- [61] ISO, *Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau - Méthode de la coupelle*, Norme EN ISO 12572, 2016.
- [62] Ministère de la Transition Écologique, "Annexe III : Règles Th-Bat 2020 - Données d'entrée au calcul de la performance énergétique," dans *Réglementation Environnementale RE 2020*, Paris, France, 2020.
- [63] Y. E. Belarbi, M. Sawadogo, P. Poullain, N. Issaadi, A. E. A. Hamami, S. Bonnet, et R. Belarbi, "Experimental Characterization of Raw Earth Properties for Modeling Their Hygrothermal Behavior," *Buildings*, vol. 12, n°. 5, p. 648, 2022. <https://doi.org/10.3390/buildings12050648>
- [64] C. Rode, R. H. Peuhkuri, K. K. Hansen, B. Time, K. Svennberg, J. Arfvidsson, et T. Ojanen, "NORDTEST Project on Moisture Buffer Value of Materials," dans *Proceedings of the 26th AIVC Conference*, Brussels, Belgium, 2005.
- [65] M. Kohandelnia, "Development of self-consolidating earth concrete (SCEC) with improved multifunctional performance for green construction," Thèse de doctorat encotutelle, Université de La Rochelle (France) et Université de Sherbrooke (Québec, Canada), NNT: 2023LAROS011, 2023.
- [66] A. Cuccurullo, D. Gallipoli, A. W. Bruno, C. Augarde, P. Hughes, et C. La Borderie, "Influence of soil grading on the hygro-mechanical properties of hyper-compacted earth for masonry construction," *Construction and Building Materials*, vol. 182, pp. 118-130