

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté : Sciences et Technologie
Département : Génie civil et d'Hydraulique
Laboratoire de domiciliation : Génie civil et d'Hydraulique

THÈSE

En Vue de l'Obtention du Diplôme de Doctorat en Troisième Cycle

Domaine : Sciences et Technologie Filière : Génie civil
Spécialité : Géotechnique

Présentée par

NOUAOURIA Abdessalam

Intitulée

Valorisation des sols fins en matériau de construction

Soutenue le : 26 Juin 2024.

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mr ROUAIGUIA Ammar	Professeur	Univ. 8 Mai 1945- Guelma	Président
Mr NOUAOURIA M. Salah	Professeur	Univ. 8 Mai 1945- Guelma	Encadreur
Ms BOUCHEMELLA Salima	MCA	Univ. M.Chérif Messaadia-Souk Ahras	Co-encadreur
Mr BOUTELDJA Fathe	MCA	Univ. 8 Mai 1945- Guelma	Examineur
Mr MESSAST Salah	Professeur	Université 20 août 1955-Skika	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

REMERCIEMENTS

Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce travail,

D'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de mon père, je le remercie pour le goût à l'effort qu'il a suscité en moi et par sa rigueur, celui qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation et de ses dévouements,

Un merci particulier à Ma très chère mère elle qui m'a doté d'une éducation digne, son soutien et amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect pour les sacrifices que vous avez consenti pour moi, que ce travail modeste soit l'exaucement de vos vœux tant formulés,

À Mes frères Lokman Hatem Sohayb,

Je tiens également à exprimer une marque d'attention à ma fiancée pour son soutien inestimable à chacune des étapes de ce périple.

DEDICACE

I dedicate this thesis to my loved ones

Résumé

Dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, les matériaux de construction en terre crue représentent une alternative prometteuse au béton de ciment, contribuant à réduire les émissions de CO₂ dans le secteur de la construction. Pour cette étude, nous avons examiné l'utilisation de deux pourcentages de stabilisant à base de bio-liant, spécifiquement la gomme de caroube (CG), soit 1% et 2%, dans les matériaux de construction en terre crue. Avant de commencer nos expérimentations, nous avons sélectionné un sol spécifique pour l'utiliser dans la fabrication des briques en terre compressée. Notamment, ce même sol est utilisé comme matière première dans la fabrication des briques en terre cuite dans la zone de Ben Djerrah (briqueterie El Ryad). Nous avons procédé à une identification et à une classification approfondie de ce sol pour assurer sa compatibilité avec notre processus de fabrication. De plus, avant d'utiliser ce sol, nous avons vérifié sa conformité aux normes recommandées pour la fabrication des briques en terre compressée. Cette vérification a porté sur des aspects tels que la granulométrie du sol, les limites d'Atterberg, le compactage, ainsi que la résistance à la compression non confinée. Ces étapes étaient cruciales pour garantir que le sol sélectionné répondait aux exigences nécessaires pour la fabrication des briques en terre compressée, conformément aux normes établies, assurant ainsi la qualité et la durabilité des produits finaux. À travers des essais de résistance à la compression non confinée, des essais de goutte et d'immersion, nous avons évalué les performances de la gomme de caroube. Les biopolymères comme la CG présentent des avantages par rapport au ciment, notamment une consommation d'énergie et une empreinte carbone plus faibles, et proviennent de ressources renouvelables dans le monde entier. Des études antérieures ont indiqué que des biopolymères similaires peuvent offrir des propriétés mécaniques adaptées. Nos résultats montrent que la gomme de caroube peut améliorer efficacement la durabilité et la résistance mécanique des matériaux en terre, offrant ainsi une solution écologique prometteuse pour des pratiques de construction durables.

Mots clés: Construction en terre crue, Bio-liant, Gomme de caroube, la résistance mécanique, durabilité.

Abstract

In the fight against climate change, raw earth construction materials represent a promising alternative to cement concrete, helping to reduce CO₂ emissions in the construction sector. For this study, we examined the use of two percentages of bio-binder stabilizer, specifically locust bean gum (CG), i.e. 1% and 2%, in raw earth construction materials. Before starting our experiments, we selected a specific soil to use in the manufacture of compressed earth bricks. In particular, this same soil is used as a raw material in the manufacture of baked earth bricks in the Ben Djerrah area (El Ryad brickworks). We have carried out an identification and classification of this soil to ensure its compatibility with our manufacturing process. In addition, before using this soil, we checked its compliance with the standards recommended for the manufacture of compressed earth bricks. This verification covered aspects such as soil grain size, Atterberg limits, compaction, as well as unconfined compressive strength. These steps were crucial to ensure that the selected soil met the necessary requirements for the manufacture of compressed earth bricks, in accordance with established standards, thereby ensuring the quality and durability of the final products. Through unconfined compressive strength tests, drop and immersion tests, we evaluated the performance of locust bean gum. Biopolymers like CG have advantages over cement, including lower energy consumption and carbon footprint, and are sourced from renewable resources around the world. Previous studies have indicated that similar biopolymers can offer adapted mechanical properties. Our results show that locust bean gum can effectively improve the durability and mechanical strength of earthen materials, providing a promising eco-friendly solution for sustainable construction practices.

Keywords: Raw earth construction, Bio-binder, locust bean gum, mechanical strength, durability.

ملخص

في إطار مكافحة تغير المناخ، تمثل مواد البناء الترابية الخامة بديلاً واعداً للخرسانة الأسمنتية، مما يساعد على تقليل انبعاث ثاني أكسيد الكربون في قطاع البناء.

في هذه الدراسة قمنا بدراسة استخدام نسبتيين من المثبت الحيوي، وتحديدًا صمغ الخروب (CG)، أي 1% و2%، في مواد البناء الترابية الخامة. قبل البدء بتجاربنا، قمنا باختيار تربة معينة لاستخدامها في صناعة الطوب الترابي المضغوط وعلى وجه الخصوص، يتم استخدام هذه التربة نفسها كمادة أولية في صناعة آجر الطين بمنطقة بن جراح (مصانع قرميد الرياض). لقد قمنا بتحديد وتصنيف شامل لهذه التربة لضمان توافقها مع عملية التصنيع لدينا. بالإضافة إلى ذلك، قبل استخدام هذه التربة، قمنا بفحص مدى مطابقتها للمعايير الموصى بها لتصنيع الطوب الترابي المضغوط. غطى هذا التحقق عدة جوانب مثل حجم حبيبات التربة، وحدود أتربيرج، والدمك، بالإضافة إلى قوة الضغط غير المحصورة. كانت هذه الخطوات حاسمة لضمان تلبية التربة المختارة للمتطلبات اللازمة لتصنيع الطوب الترابي المضغوط، وفقاً للمعايير المعمول بها، وبالتالي ضمان جودة المنتجات النهائية ومثانتها. من خلال اختبارات قوة الضغط غير المحصور، واختبارات السقوط والغمر، قمنا بتقييم أداء صمغ الجراد. تتمتع البوليمرات الحيوية مثل CG بمزايا مقارنة بالأسمنت، بما في ذلك انخفاض استهلاك الطاقة والتأثير الكربوني، ويتم الحصول عليها من الموارد المتجددة حول العالم. أشارت الدراسات السابقة إلى أن البوليمرات الحيوية المماثلة يمكن أن تقدم خصائص ميكانيكية مناسبة. تظهر نتائجنا أن صمغ الخروب يمكن أن يحسن بشكل فعال المتانة والقوة الميكانيكية للمواد الترابية، مما يوفر حلاً واعداً وصديقاً للبيئة لممارسات البناء المستدامة.

الكلمات المفتاحية : بنية ترابية خام، مادة رابطة حيوية، صمغ الخروب، قوة ميكانيكية، متانة.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	I
Résumé	III
Abstract	IV
ملخص	V
TABLE DES MATIÈRES	VI
LISTES DES TABLEAUX.....	X
LISTES DES FIGURE.....	XII
Notations et Symboles.....	XV
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES CONSTRUCTIONS EN TERRE CRUE ET LES LIANTS

3

Introduction	4
I.1 Généralité sur les constructions en terre crue	4
I.1.1 Contexte historique.....	4
I.1.2 Les techniques de construction en terre crue.....	6
I.1.2.1 Technique de pisé	6
I.1.2.2 Technique de torchis	7
I.1.2.3 Technique de bauge.....	9
I.1.2.4 Technique de l'adobe	10
I.1.2.5 Brique de terre compressée	11
I.1.3 Normes, Recommandations, Critères de Sélection des Matériaux.....	14
I.1.3.1 Critères de choix des matériaux	15
I.1.3.1.1 Distribution granulométrique	15
I.1.3.1.2 La plasticité	17
I.1.3.1.3 Compactage.....	17
I.1.3.1.4 Résistance à la compression simple.....	18
I.1.4 Avantages de la construction en terre.....	19
I.1.5 Inconvénients de la construction en terre	21
I.2 Généralités sur les liants	21
I.2.1 Les liants minéraux	21
I.2.2 Les polymères organiques naturels (Les liants organiques).....	24

I.2.2.1	Les polysaccharides.....	25
I.2.2.1.1	Polysaccharides d'origine végétale.....	25
I.2.2.1.2	Polysaccharides animale :.....	27
I.2.2.1.3	Polysaccharides d'origine microbienne :.....	28
I.2.2.2	Les protéines.....	30
I.2.2.2.1	Les protéines d'origine animale.....	31
I.2.2.2.2	Les protéines végétales.....	32
I.2.2.3	Les lipides.....	33
I.2.2.4	Les tanins.....	33
I.3	La stabilisation du sol pour la construction	34
I.3.1	La stabilisation aux liants minéraux	35
I.3.1.1	Effet sur les résistances mécaniques de la brique en terre compressé(BTC)	35
I.3.1.1.1	Stabilisation au ciment	36
I.3.1.1.2	Stabilisation à la chaux.....	38
I.3.1.1.3	Stabilisation avec des liants minéraux alternatifs.....	40
I.3.1.2	Effets sur la durabilité	42
I.3.2	La stabilisation aux liants organiques.....	43
I.3.2.1	Effet sur les résistances mécaniques.....	43
I.3.2.2	Effets sur la durabilité	46
I.3.3	Conclusion.....	47
Conclusion.....		48
 CHAPITRE II : MATIERES ET PROCEDURES EXPERIMENTALES.....		49
Introduction.....		50
II.1	Matières premières	50
II.1.1	Le sol.....	50
II.1.2	Le bio-liant	51
II.1.2.1	Choix du bio-liant.....	51
II.1.2.1.1	Évaluation du bio-liant en fonction des critères de sélection.	53
II.1.2.2	Identification du bio-liant utilisé (la gomme de caroube).	53
II.1.2.3	Utilisation des graines de caroube.....	54
II.2	Procédures expérimentales	55
II.2.1	Procédure de l'extraction de la gomme de caroube.....	55

II.2.2	Caractérisation géotechnique.....	57
II.2.2.1	Analyse granulométrique.....	57
II.2.2.2	Détermination des limites d’Atterberg	58
II.2.2.3	Limite de Retrait linéaire.....	60
II.2.2.4	Valeur au bleu de méthylène du sol	61
II.2.2.5	Détermination de l’Optimum Proctor Normal.....	62
II.2.3	Caractérisation chimique et minéralogique	63
II.2.3.1	La teneur en matière organique	63
II.2.3.2	Le pH du sol	64
II.2.3.3	Diffraction des Rayons X (DRX).....	65
II.2.4	Confection des éprouvettes.....	65
II.2.5	Essais de résistance mécanique	66
II.2.5.1	Essai de compression simple non confinée	66
II.2.5.2	Essai de traction par flexion 3 points	67
II.2.6	Les essais de durabilité.....	68
II.2.6.1	Essai de Drip test.....	68
II.2.6.2	Essai Dip test.....	69
	Conclusion.....	70

CHAPITRE III : CARACTERISATION ET VERIFICATION DU SOL CONFORMÉMENT AUX NORMES DE BTC..... 71

	Introduction	72
III.1	Caractérisation du sol	72
III.1.1	Caractérisation géotechnique des sols.....	72
III.1.1.1	Analyse granulométrique.....	72
III.1.1.2	Les limites d’Atterberg.....	73
III.1.1.3	Teneur en matières organiques.....	74
III.1.1.4	Limite de Retrait linéaire LR.....	75
III.1.1.5	La valeur au bleu de méthylène.....	75
III.1.1.6	Essais de compactage du sol de Ben Djerrah (BD).	76
III.1.1.7	Bilan des caractéristiques géotechniques et la classification du sol.....	77
III.1.2	Caractérisation chimique du sol	79
III.1.2.1	Diffraction des Rayons X.....	79

III.1.2.2	pH du sol	81
III.2	Positionnement du sol (BD) par rapport aux recommandations pour les BTC	81
III.2.1	Vis-à-vis de la granulométrie	81
III.2.2	Vis-à-vis des limites d'Atterberg.....	82
III.2.3	Vis-à-vis du compactage	83
III.2.4	Vis-à-vis de la résistance à la compression simple (UCS) du sol BD	84
III.2.5	Concernant l'utilisation du sol (BD) dans les BTC.....	85
Conclusion.....		85
 CHAPITRE IV : COMPORTEMENT MECANIQUE ET DURABILITE.....		86
 Introduction		 87
IV.1	Comportement mécanique des briques en terre compressée.....	87
IV.1.1	Essai de compression simple.....	87
IV.1.2	Essai de flexion à 3 points	90
IV.2	Durabilité des briques en terre compressé	92
IV.2.1	Essai de Drip test.....	92
IV.2.2	Dip test	95
Conclusion.....		97
Conclusion générale et perspective		98
Référence.....		102

LISTES DES TABLEAUX

CHAPTIRE I : GENERALITE SUR LES CONSTRUCTIONS EN TERRE CRUE ET LES LIANTS

Tableau I.1 Classification granulométrique des sols selon ASTM D2487[3].....	16
Tableau I.2 bibliographie sur les BTC stabilisées au ciment (fc: résistance à compression, n.m: non mesurée)[38].....	36
Tableau I.3 : Tableau I.5 bibliographie sur les BTC stabilisées à la chaux.[38].	39
Tableau I.4 bibliographie sur les briques en terre crue stabilisées avec des liants minéraux alternatifs.[38].	40
Tableau I.5 bibliographie sur les BTC stabilisées avec des bio-liants.[38].....	44
Tableau I.6 la tenue à l'eau de la brique en terre compressé stabilisé avec des bio-liants .[38]	46

CHAPITRE II : MATIERES PREMIERES ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

Tableau II. 1 La disponibilité locale des matériaux choisies.....	52
Tableau II. 2 Le cout des matériaux choisies.	52
Tableau II. 3 L'effet des matériaux choisies sur la résistance à la compression du sol.	53
Tableau II. 4 L'utilisations de la graine de caroube dans les domaines industriels.....	54

CHAPITRE III : CARACTERISATION ET VERIFICATION DU SOL CONFORMÉMENT AUX NORMES DE BTC

Tableau III. 1 Classe granulaire du sol étudié.	73
Tableau III. 2 Les limites d'Atterberg de certaines argiles d'après (Monaco A. et Chassefiere B. 1976)[4].....	74
Tableau III. 3 Résultat de l'essai de la limite de retrait linéaire.	75
Tableau III. 4 Tableau récapitulatif de l'essai VBS.	75
Tableau III. 5 Résultats des essais Proctor normal et Proctor modifié.....	76
Tableau III. 6 Caractéristiques géotechniques du sol étudié.	77
Tableau III. 7 les composants du sol BD.....	79
Tableau III. 8 Les résultats de la mesure de PH du sol.	81
Tableau III. 9 Teneurs en eaux initiales et les poids volumiques secs maximales des BTC [13]–[15].	83

CHAPITRE IV : COMPORTEMENT MECANIQUE ET DURABILITE

Tableau VI. 1 Masse de chaque composant des mélanges sol-liant.....	88
Tableau VI. 2 Résultats des essais de résistance à la compression simple.....	88
Tableau VI. 3 La résistance à la flexion 3 points des BTC.	91

Tableau VI. 4 Classification de briques en terre compressée selon leur érodabilité par Frencham [6] et NZDS 4298[4]..... 93

LISTES DES FIGURE

CHAPTIRE I : GENERALITE SUR LES CONSTRUCTIONS EN TERRE CRUE ET LES LIANTS

Figure I.1 les différents procédure de construction à partir du matériau terre[2].....	6	
Figure I.2 Technique de pisé	7	
Figure I.3 Une école construite en pisé à Bonbaden, (en Allemagne)[4].....	7	
Figure I.5 Construction d'une maison en colombage et torchis.	8	
Figure I.6 Système de construction en terre crue empilée (bauge).	9	
Figure I.7 Construction en terre crue en bauge coffrée	10	
Figure I.8 Les gratte-ciels en terre, Shibam au Yémen[4].....	11	
Figure I.9 Stockage des adobe.....	11	
Figure I.10 Maison privée construite par des BTC à Mayotte (Mamoudzou)[4].	13	
Figure I.11 Bâtiment en brique de terre stabilisée sur 4 étages en Inde[4].	13	
Figure I.12 Maison de brique de terre compressée.....	13	
Figure I.13 Presse Manuelle de BTC	Figure I.14 Presse Mécanique de BTC	14
Figure I.15 Les zones granulométriques recommandées pour construire en BTC, en Pisé [4].....	17	
Figure I.16 Les zones de plasticité recommandées pour construire en BTC, en Pisé ou en BTM [4]. .	17	
Figure I.17 Les zones de compactage recommandés pour construire en BTC, en Pisé ou en adobe[2].	18	
Figure I.18 Les valeurs de la résistance à la compression de la terre crue (non traitée) séchée à l'air libre [3].	19	
Figure I.19 Les quatre grandes familles de biopolymères [31].	24	
Figure I.20 schéma de deux chaînes de molécules de cétose et d'aldose.....	25	
Figure I.21 Structures de l'amylopectine et de l'amylose.	26	
Figure I.22 Configuration fondamentale des macromolécules constitutives des farines de caroube et de guar [33].	27	
Figure I.23 Schéma d'extraction de la chitosane à partir de la chitine [35].....	28	
Figure I.24 Structure du xanthane [33].....	29	
Figure I.25 Les chaînes d'alginate forment des « boîtes d'œufs » dont les œufs sont les ions calcium (en rouge)[33].....	30	
Figure I.26 Représentation d'une chaîne de protéine[38].	31	
Figure I.27 des micelles de caséines [34].....	32	
Figure I.28 La grande famille des lipides (PENSER SENTE).....	33	

CHAPITRE II : MATIERES PREMIERES ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

Figure II.1 Vue par satellite de la briqueterie de Ben Djerrah et les 5 points du prélèvement du sol ...	51	
Figure II.2 Gisement de Kaolin de Ben Djerrah.....	51	
Figure II.3 Photographies des différentes étapes de décortilage des graines : (a : macération dans l'acide sulfurique, b : acide sulfurique, c : carbonisation).....	55	
Figure II. 4 Photographies des différentes étapes de décortilage des graines : (a : macération dans l'acide sulfurique, b : acide sulfurique, c : carbonisation).....	56	
Figure II. 5 Broyage de l'endosperme pour obtenir de la Gomme de caroube.	56	
Figure II. 6 Tamis dans l'ordre décroissant	Figure II. 7 Tamisage du sol étudié.....	57
Figure II. 8 Matériel utilisé pour la sédimentation	58	
Figure II. 9 Variation du diagramme de consistance d'un sol fin en relation avec sa teneur en eau.	58	
Figure II. 10 Matériel utilisé dans l'essai de Limite de liquidité.	59	
Figure II. 11 Pâte formée et divisée en deux	Figure II. 12 Sol se referme sur une longueur de 13 mm après être tombé plusieurs fois.....	59
Figure II. 13 Matériel utilisé dans l'essai de Limite de Retrait linéaire.....	60	
Figure II. 14 Échantillon de limite de retrait Après avoir atteint la limite de retrait linéaire maximale.	61	
Figure II. 15 Équipement pour l'essai	Figure II. 16 Taches de bleu de méthylène.	61
Figure II. 17 Seuils de VBS correspondant aux différents types de sols.....	62	
Figure II. 18 Échantillon du sol après la calcination.	63	
Figure II. 19 Le mélange du sol avec la solution tampon.....	64	
Figure II. 20 Le PH-mètre utiliser pour la mesure de PH du sol.	65	
Figure II. 21 Le processus de compactage statiques des éprouvettes cylindriques avec la machine UNIFRAME	66	
Figure II. 22 Les éprouvettes parallélépipédiques et le moule de confection	66	
Figure II. 23 Essai de compression non-confiné sur un éprouvette cylindrique.	67	
Figure II. 24 Essai de flexion 3 points.....	68	
Figure II. 25 Vue générale de l'équipement pour le test d'érosion par goutte.	69	
Figure II. 26 Configuration de test pour les essais d'immersion.	70	

CHAPITRE III : CARACTERISATION ET VERIFICATION DU SOL CONFORMÉMENT AUX NORMES DE BTC

Figure III. 1 Courbes granulométriques du sol de Ben Djerrah.	73
Figure III. 2 Positionnement du sol (BD) sur le diagramme de plasticité.	74
Figure III. 3 Classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène.....	76
Figure III. 4 Courbes de l'essai Proctor normal et Proctor modifié.	76

Figure III. 5 Classification du sol (BD) selon (L.C.P.C).....	78
Figure III. 6 Classification du sol (BD) selon (G.T.R).....	79
Figure III. 7 Diagramme de diffraction des rayons X du sol (BD)	80
Figure III. 8 Distribution granulométrique du sol et le fuseau recommandé pour la BTC.....	82
Figure III. 9 Limites d'Atterberg du sol et le fuseau recommandé pour BTC	83
Figure III. 10 Essai de compactage (SPO et MPO) du sol et le fuseau recommandé pour BTC.	84

CHAPITRE IV : COMPORTEMENT MECANIQUE ET DURABILITE

Figure VI. 1 La résistance à la compression non confinée pour tous les spécimens avec le seuil minimum recommandé par (NF-XP-P13-901) [1].	89
Figure VI. 2 Courbes des effets du dosage et du temps de durcissement sur la moyenne de la résistance à la compression simple.	90
Figure VI. 3 La résistance à la traction pour tous les spécimens.....	92
Figure VI. 4 Profondeur de l'érosion des éprouvettes non-traité	93
Figure VI. 5 Profondeur de l'érosion des éprouvettes traité avec 1% de la gomme de caroube.	94
Figure VI. 6 Profondeur de l'érosion des éprouvettes traité avec 2% de la gomme de caroube.	94
Figure VI. 7 Profondeur moyenne de l'érosion après le Drip test.	95
Figure VI. 8 Perte de masse pour toutes les briques après le Dip test.	96
Figure VI. 9 Conditions des briques après l'essai Dip test : (a) brique non-traité, (b) brique stabilisée avec 1% de la gomme de caroube (c) brique stabilisée avec 2% de la gomme de caroube.	96

NOTATIONS ET SYMBOLES

ASTM: American Society for Testing and Materials.

BD : Ben Djerrah.

BTC: Brique de Terre crue Compressée.

BTM: Bloc de Terre Moulé.

DRX: L'essai de Diffraction des Rayons X.

GC: Gomme de caroube.

GTR: Guide De Terrassement Routier.

IP: Indice de plasticité.

LP: Limite de plasticité.

LL: Limite de liquidité.

LCPC: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

LHF: Laitier de Haut Fourneau.

OPN: Optimum Proctor Normal.

OPM: Optimum Proctor Modifié.

VBS: Valeur de Bleu de Méthylène.

Wopt : La teneur en eau optimum.

ρ_d : Masse volumique sèche.

ρ_h : Masse volumique humide.

R_c : résistance à la compression simple.

R_t : résistance à la traction.

Introduction générale

La construction durable a émergé comme une préoccupation majeure dans le contexte actuel de préoccupation croissante pour l'environnement et la gestion responsable des ressources naturelles. Dans cette perspective, les briques en terre compressée traitées avec des bio-liants ont suscité un intérêt considérable en tant qu'alternative écologique aux méthodes de construction traditionnelles.

L'utilisation de ces briques offre une solution prometteuse pour réduire l'impact environnemental de l'industrie de la construction, en réduisant la consommation de ressources naturelles et en limitant les émissions de CO₂ à effet de serre associées aux matériaux de construction conventionnels.

Les briques en terre compressée, en tant que matériau de construction, présentent divers avantages. Elles sont fabriquées à partir de ressources locales abondantes, offrant ainsi une solution économique et durable. De plus, ces briques ont une empreinte carbone réduite par rapport aux matériaux traditionnels, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique. Cependant, pour maximiser ces avantages, il est essentiel de développer des formulations efficaces et respectueuses de l'environnement, notamment en utilisant des bio-liants.

Avant d'entreprendre la fabrication des briques en terre compressée, une étape cruciale réside dans la caractérisation et la préparation du sol. Cela implique une vérification minutieuse de la granulométrie, des limites d'Atterberg et du compactage du sol. Ces paramètres jouent un rôle déterminant dans la qualité finale des briques et leur capacité à résister aux contraintes environnementales et mécaniques.

L'objectif central de cette thèse est de rechercher un bio-liant approprié pour stabiliser les briques en terre compressée, tout en étudiant attentivement leur résistance mécanique et leur durabilité. Ce processus implique l'exploration de divers matériaux organiques et minéraux susceptibles de servir de liants, avec une attention particulière portée à leurs performances environnementales et à leur impact sur la qualité des briques.

Ce travail thèse est divisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre de cette thèse vise à contextualiser cette recherche en présentant une revue explicative de la littérature sur la construction en terre crue et les bio-liants, avec un accent particulier sur l'intégration de ces liants dans le domaine du Génie Civil. Ce chapitre examine les avantages historiques de cette méthode de construction, met en évidence les défis qui ont entravé son adoption à grande échelle, et discute des innovations récentes qui ont ravivé son attrait. Cette analyse approfondie citera les bases nécessaires pour comprendre la position actuelle des briques en terre compressée traitées avec des bio-liants dans le paysage de la construction durable.

Dans le deuxième chapitre, nous plongerons dans le contexte expérimental de cette thèse. Une attention particulière sera portée aux matériaux spécifiques utilisés dans la fabrication des briques en terre compressée et à la méthodologie précise adoptée pour atteindre les objectifs de cette recherche. Les choix de bio-liants et leur impact sur les propriétés finales des briques seront examinés en détail, soulignant l'importance cruciale de cette étape préliminaire dans la recherche de solutions durables.

Le troisième chapitre sera entièrement dédié à la présentation des résultats des essais de caractérisation. Ces essais joueront un rôle fondamental dans la compréhension des propriétés physiques et chimiques des briques en terre compressée stabilisées avec différents types de liants. Les conclusions tirées de cette phase de recherche orienteront le processus de formulation, cherchant à maximiser la résistance et la durabilité tout en minimisant l'impact environnemental.

Le quatrième chapitre analysera en détail les résultats des essais mécaniques et de durabilité. Cette section permettra de quantifier les performances à long terme des briques en terre compressée, évaluant leur capacité à résister aux contraintes structurelles et environnementales. Les données générées dans ce chapitre seront essentielles pour tirer des conclusions solides sur la faisabilité et l'efficacité des briques en terre compressée traitées avec des bio-liants en tant que matériaux de construction durables.

Enfin, ce travail de thèse se terminera par une conclusion générale de nos travaux et une présentation de nombreuses perspectives possibles.

CHAPTIRE I : GENERALITE SUR
LES CONSTRUCTIONS EN TERRE
CRUE ET LES LIANTS

Introduction

L'exploration des techniques de construction traditionnelles et des matériaux durables est devenue impérative à l'ère de la durabilité environnementale. Parmi ces approches, les constructions en terre crue et l'utilisation de bio-liants représentent des domaines de recherche cruciaux, marqués par leur ancrage historique et leur pertinence contemporaine. Ce chapitre est consacré à une analyse approfondie de l'état actuel des connaissances dans ce domaine dynamique, où la convergence entre tradition et innovation ouvre la voie à des procédés de construction plus respectueuses de l'environnement.

Nous débuterons par une exploration des fondements de constructions en terre crue, plongeant dans les nuances de cette méthode ancestrale. Les propriétés uniques de la terre crue, en tant que matériau de construction, seront disséquées, mettant en lumière sa polyvalence et sa durabilité. En parallèle, nous explorerons l'évolution contemporaine de ces pratiques, mettant en évidence les défis et les opportunités rencontrés par les artisans et les chercheurs.

Une attention particulière sera ensuite accordée aux bio-liants, agents stabilisateurs d'origine organique ou minérale utilisés pour renforcer la cohésion des structures en terre crue. L'exploration des propriétés de ces bio-liants, ainsi que de leurs implications environnementales, constituera un élément essentiel de notre examen. Nous examinerons les recherches récentes qui explorent de nouveaux horizons dans le domaine des bio-liants, envisageant ainsi des perspectives novatrices pour la construction durable.

Ce chapitre se veut être une plongée approfondie dans l'univers fascinant des constructions en terre crue et des bio-liants, offrant un aperçu critique des avancées récentes, des défis persistants, et des opportunités émergentes dans ce domaine en constante évolution.

I.1 Généralité sur les constructions en terre crue

I.1.1 Contexte historique

L'utilisation de la terre crue dans la construction remonte à l'aube de la civilisation et est profondément ancrée dans l'histoire architecturale mondiale. Des exemples remarquables de constructions en terre crue datent de l'Antiquité, illustrant la capacité des anciennes civilisations à exploiter de manière ingénieuse les ressources naturelles disponibles.

L'une des premières manifestations de cette technique remonte à la Mésopotamie antique, où l'argile abondante des rivières Tigre et Euphrate a été utilisée pour construire des briques

d'adobe. Ces briques crues, séchées au soleil, ont été employées pour ériger des édifices remarquables, tels que les ziggourats, des temples étagés qui ont joué un rôle essentiel dans la vie culturelle et religieuse de la région.

Les constructions en terre en Afrique incarnent une riche tradition architecturale, reflétant une ingéniosité adaptative aux divers climats du continent. De la Mauritanie au Mali en passant par le Niger, l'utilisation du banco, un mélange d'argile, de sable et de fibres végétales, caractérise de nombreuses habitations. Au Mali, les maisons en banco, souvent agrémentées de motifs artistiques, sont emblématiques, tout comme les structures épaisses en banco au Niger, offrant une résistance robuste aux conditions climatiques arides. En Égypte ancienne, l'utilisation de la brique crue, appelée "boue de Nil", était une pratique courante pour la construction de maisons et d'infrastructures. Les anciens Égyptiens ont également exploité la technique du pisé, comprimant la terre crue pour créer des murs robustes.

Les constructions en terre ont une histoire profondément enracinée en Algérie, trouvant leur place tant dans les régions arides que dans les zones rurales. Les ksour d'Algérie, des ensembles architecturaux uniques, témoignent de cette tradition ancienne qui perdure depuis 12 à 15 siècles, avec Timimoune (Adrar) abritant le grand ksar en terre d'Algérie. Au cours des décennies, l'Algérie a réalisé divers programmes de construction en terre, notamment dans les années 70, comme en témoigne [1]. Le CAPterre (le Centre Algérien du Patrimoine Culturel Bâti en Terre), basé à Timimoune (Adrar), joue un rôle crucial dans la promotion des architectures en terre en Algérie. Ce centre est subdivisé en deux départements techniques, l'un se dédiant à la recherche sur les techniques de construction et les matériaux, soulignant ainsi l'engagement continu en faveur de la conservation et de la promotion de cette riche tradition architecturale en Algérie.

L'Asie offre également une riche histoire de constructions en terre crue. En Chine, les maisons en terre crue, notamment celles de la région du Shaanxi, ont été des exemples durables de l'utilisation judicieuse des ressources locales. Au Japon, la technique du "wattle and daub" a été employée pour créer des parois légères et isolantes à base de terre crue.

Au Moyen Âge en Europe, le torchis, une combinaison de terre, de paille et de fibres végétales, a été utilisé pour construire des maisons à colombages, démontrant la diversité des techniques liées à la terre crue dans différentes régions du monde.

Le renouveau de l'intérêt pour les constructions en terre crue au XIX siècle s'appuie sur cette riche histoire. Les architectes contemporains s'inspirent des pratiques ancestrales tout en explorant de nouvelles approches pour renforcer la durabilité des constructions en terre crue. Cette démarche s'inscrit dans le contexte actuel de préoccupations environnementales et de recherche de solutions durables pour l'avenir de l'architecture. Ainsi, l'utilisation de la terre crue dans la construction transcende le simple aspect pratique pour devenir une source d'inspiration, offrant des leçons tirées de l'histoire pour guider les innovations présentes et futures dans le domaine de la construction durable.

I.1.2 Les techniques de construction en terre crue

Les modalités de construction en terre crue présentent une diversité inhérente, déterminée par les caractéristiques géographiques, les ressources locales et les préférences culturelles. Ci-après, sont énumérées quelques-unes des méthodes de construction en terre crue fréquemment adoptées[2], voir Figure I.1.

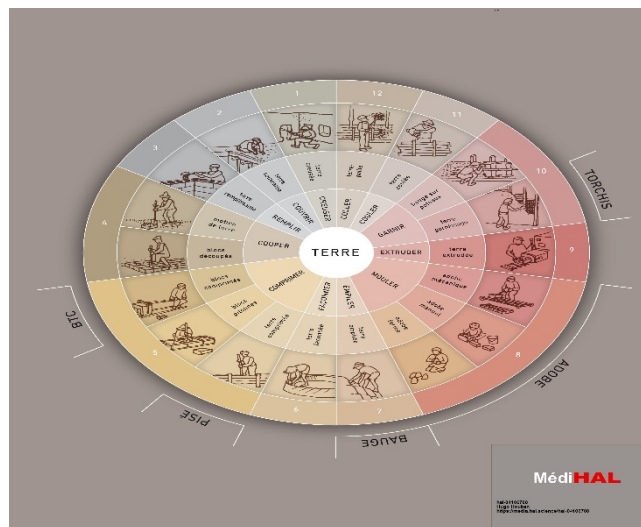


Figure I.1 les différents procédures de construction à partir du matériau terre[2].

I.1.2.1 Technique de pisé

La technique de construction en pisé, ancienne et respectueuse de l'environnement, repose sur l'utilisation de terre crue mélangée à d'autres composants tels que l'argile, le sable, et parfois des fibres végétales. Le processus débute par la préparation minutieuse de la terre, qui est tamisée pour retirer les éléments impurs et obtenir une matière homogène. Cette mixture est ensuite placée dans un coffrage en bois, déterminant la forme et l'épaisseur du mur à construire. Chaque couche de terre est compactée fermement à l'aide d'un pilon manuel, pour créer une paroi solide.

Le mur ainsi formé est laissé à sécher naturellement, un processus qui peut prendre plusieurs semaines. La technique du pisé offre non seulement une durabilité structurelle mais aussi d'excellentes propriétés d'isolation thermique, adaptant la construction aux variations climatiques. La finition peut varier, allant du mur brut à une couche de finition à base de terre crue pour une surface plus lisse. Bien que les constructions en pisé aient été historiquement répandues dans diverses régions du globe, leur popularité persiste aujourd'hui en raison de leur caractère durable, de leurs qualités isolantes, et de leur intégration harmonieuse avec l'environnement local[3], voir Figure I.2 et Figure I.3.

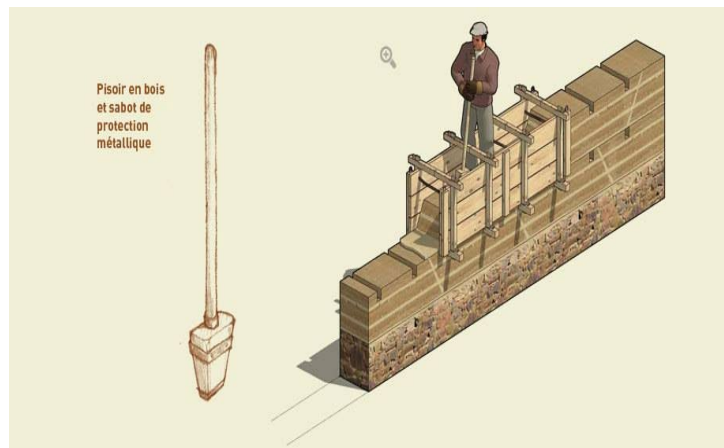


Figure I.2 Technique de pisé



Figure I.3 Une école construite en pisé à Bonbaden, (en Allemagne)[4].

I.1.2.2 Technique de torchis

Le torchis est une technique de construction ancienne qui utilise un mélange de terre crue, de paille et parfois d'autres fibres végétales. Ce matériau est appliqué sur une ossature en bois pour

créer des murs légers et isolants. Le processus commence par la préparation d'une mixture, où la terre crue est mélangée avec de la paille hachée ou d'autres fibres pour renforcer la cohésion. Ce mélange est ensuite appliqué en couches sur une structure en bois, formant ainsi les parois du bâtiment. Le torchis, souvent associé à des maisons à colombages, offre des propriétés thermiques régulatrices, assurant une isolation naturelle contre le froid et la chaleur[5]. En plus, de ses avantages en termes d'isolation, le torchis est apprécié pour son caractère écologique, puisqu'il utilise des matériaux disponibles localement. La finition du torchis peut varier, allant d'une surface rugueuse à une finition plus lisse et esthétique. Cette technique de construction a été historiquement utilisée dans diverses régions du monde, notamment en Europe, et fait actuellement l'objet d'un nouvel intérêt en raison de sa durabilité et de ses propriétés écologiques [4], voir Figure I.4.



Figure I.4 Technique de torchis.

La technique du torchis a été historiquement utilisée dans plusieurs régions du monde, et son application s'est étendue à différentes cultures et climats, voir Figure I.5.



Figure I.4 Construction d'une maison en colombage et torchis.

I.1.2.3 Technique de bauge

La technique de construction en bauge implique l'agencement de masses de terre grossière rendue malléable par l'incorporation de fibres naturelles[4]. Ces masses sont superposées et légèrement tassées à l'aide des mains ou des pieds, formant ainsi des murs monolithiques. Les surfaces verticales prennent forme grâce à des découpes réalisées après séchage, lorsque le matériau n'a pas encore atteint une dureté excessive, voir Figure I.6.

En Afghanistan, on observe la construction d'habitats ruraux fortifiés réalisés en utilisant la technique de la bauge, où des boules de terre sont empilées en levées de terre puis ajustées.

En France, la méthode de construction rurale implique l'empilement à la fourche de blocs de terre plastique, similaire aux murs en pisé, et généralement façonnée manuellement.

Cette approche consiste à améliorer la terre en y ajoutant des fibres de natures diverses, formant des boules similaires à de la pâte à modeler, qui sont ensuite empilées les unes sur les autres à l'aide des mains ou des pieds.

La bauge est intégrée dans une structure en bois, parfois utilisée dans des cas particuliers tels que les plafonds, comme la figure Figure I.7 montre.

Dans la plupart des régions du monde, la construction en bauge est complètement façonnée à la main, donnant l'aspect d'une sculpture géante[4].



Figure I.5 Système de construction en terre crue empilée (bauge).



Figure I.6 Construction en terre crue en bauge coffrée

I.1.2.4 Technique de l'adobe

Les briques d'adobe représentent des éléments de construction façonnés à partir de terre crue, soit moulée sous forme de pâte plastique, soit modelée à la main, sans subir de processus de compression. Ce matériau est enrichi de fibres naturelles ou de sable, puis laissé à sécher à l'air libre pendant une période de plusieurs semaines. L'utilisation d'adobes remonte à l'une des plus anciennes pratiques de l'architecture durable, comme en témoignent les hiéroglyphes égyptiens[6],[7]. La méthode de construction en adobe persiste encore de nos jours, avec une large diffusion en Amérique du Sud, particulièrement au Pérou[8].

- L'adobe, par des méthodes simples, permet d'ériger rapidement un logement, synonyme d'une exécution rapide, assurant ainsi un niveau de confort de vie optimal.
- Les tous premiers gratte-ciel du monde se trouvent à Shibam Hadhramaut au Yémen, comprenant plus de cinq cent gratte-ciels construits en terre crue (adobe), dont certains s'étendent sur 8 étages (voir Figure I.8)[4].
- Cette technique implique le mélange de terre crue humide, enrichie de pailles ou d'autres fibres, façonnée manuellement à la main ou dans des moules parallélépipédiques. Les dimensions des blocs sont assimilées à celles des briques ordinaires[4].
- L'adobe offre la possibilité de construire des arcs, des voûtes et des coupoles. La construction des adobes s'effectue presque sans recours à des outils, ce qui la rend extrêmement économique.
- Cette méthode de construction présente un faible coût de production, avec la possibilité de mettre en place une production de masse (voir Figure I.9).



Figure I.7 Les gratte-ciels en terre, Shibam au Yémen[4].



Figure I.8 Stockage des adobe.

I.1.2.5 Brique de terre compressée

Au cours des dernières décennies, la terre en tant que matériau de construction a souvent été reléguée au second plan, supplantée par des matériaux industriels tels que le béton armé, l'acier et la charpente métallique, en particulier pendant la révolution industrielle. Toutefois, une évolution marquante s'opère actuellement, ramenant la terre au premier plan en tant que matériau de construction indispensable, ceci en raison de ses avantages économiques et environnementaux considérables. Contrairement aux matériaux à base de ciment, la terre requiert seulement 1% de l'énergie nécessaire pour leur extraction, leur transport et leur production [9]. De plus, la terre peut répondre aux normes contemporaines de confort. Par

ailleurs, la gestion des sédiments de dragage évolue vers la valorisation plutôt que l'immersion et le dépôt.

Au sein des techniques de construction en terre, la brique de terre crue compressée (BTC) émerge comme une méthode innovante et contemporaine, s'apparentant aux pisés en briques et aux adobes, mais distinguée par le processus de compression visant à densifier la terre. Cette technique, soumise à des niveaux élevés de recherche scientifique et technologique, offre des avantages remarquables, créant un écosystème social, économique et écologique. La brique de terre s'avère un matériau exceptionnel lorsque ses caractéristiques et performances sont intégrées dès la conception d'un ouvrage[4].

Aujourd'hui, les édifices construits en BTC s'intègrent pleinement dans le tissu urbain, devenant une composante incontournable du paysage physique et social, comme en témoignent des exemples à Mayotte, île française (Mamoudzou) (voir Figure I.10), et un bâtiment en BTC de 4 étages en Inde (voir Figure I.11). La brique ou bloc de terre crue compressée (BTC) représente la terre humide compressée à une densité relativement élevée dans un moule parallélépipédique, suivant les dimensions d'une brique standard. Cette méthode, largement applicable, répond de manière significative aux besoins locaux, notamment dans le sud de l'Algérie (Adrar, Béchar, Tamanrasset et Ouargla, etc.), où les faibles précipitations rendent les blocs de terre comprimée stabilisée moins nécessaires (voir Figure I.12).

Le processus de fabrication implique la compression de la terre en blocs (ou briques) à l'aide de presses, parmi lesquelles on distingue les presses manuelles transportables qui appliquent des charges statiques de 1 à 2 MPa, produisant entre 500 et 1000 blocs par jour (voir Figure I.13). Les presses mécaniques, quant à elles, appliquent des charges statiques allant de 2 à 15 MPa, et leur rendement dépend de la puissance de la presse (voir Figure I.14) [10],[11].

Les blocs obtenus peuvent être stockés immédiatement, éliminant ainsi la nécessité de vastes aires de production comme c'est le cas pour les adobes qui doivent sécher avant leur utilisation. Les nouvelles formes des BTC peuvent améliorer les contacts entre les blocs, renforçant ainsi leur résistance parasismique.

D'un point de vue thermique, la BTC excelle. Elle accumule la chaleur pendant la journée et la diffuse la nuit, offrant une alternative efficace à la climatisation. Par ailleurs, la construction en BTC contribue à la monétarisation des populations, générant ainsi des emplois et participant activement à l'économie locale.

La fabrication de BTC représente une évolution remarquable dans le domaine de la construction et de l'architecture en terre. Ainsi, l'utilisation d'un sol comme matériau de construction pour fabriquer des briques de terre crue compressée doit répondre à plusieurs critères pour garantir son succès et sa durabilité.



Figure I.9 Maison privée construite par des BTC à Mayotte (Mamoudzou)[4].



Figure I.10 Bâtiment en brique de terre stabilisée sur 4 étages en Inde[4].



Figure I.11 Maison de brique de terre compressée.



Figure I.12 Presse Manuelle de BTC



Figure I.13 Presse Mécanique de BTC

I.1.3 Normes, Recommandations, Critères de Sélection des Matériaux

Dans cette section dédiée à l'utilisateur, nous explorerons les directives fondamentales, les conseils pratiques, et les critères de choix des matériaux, en mettant la lumière sur le domaine spécifique de la construction en terre. Les normes générales relatives à cette discipline servent de références incontournables pour répondre aux exigences spécifiques du cadre réglementaire et des pratiques culturelles de la construction, contribuant ainsi à améliorer les propriétés des matériaux employés dans ces structures.

Au fil des années, plusieurs normes ont été émises à travers le monde, démontrant un engagement international envers la promotion de constructions en terre sûres et durables. Des exemples incluent les normes publiées aux États-Unis pour les adobes [12], en France pour les BTC [13], en Nouvelle-Zélande pour les adobes [14], pour les BTC et pisé [15], en Afrique pour les BTC [16], au Zimbabwe pour les pisés [17]. Ces normes créent un environnement propice à l'acceptation des nouvelles constructions en terre en établissant des références partagées.

Pour une adoption étendue des matériaux en terre, il est impératif de disposer de recommandations claires et de méthodes simples d'identification et de caractérisation des terres. Ces recommandations devraient directement se rapporter aux propriétés de résistance des matériaux structuraux une fois mélangés, séchés, ou compactés. La connaissance approfondie du matériau, de ses caractéristiques, propriétés, et performances, ainsi que des particularités des techniques de construction utilisées, est essentielle. Adopter des systèmes constructifs simples et compatibles avec les propriétés du matériau, tels que la résistance à la compression et la

faible résistance à la traction, flexion et cisaillement, devient une nécessité. En parallèle, l'adoption de principes de conception et de solutions techniques propres à la construction en terre favorise des constructions durables et adaptées.

En référence à des documents techniques influents, les normes en Espagne pour les BTC [18], adobes et le pisé en Australie [17], [18] ; ainsi que d'autres travaux pour les adobes BTC et les Pisés en Europe [11], [19],[20], offrent des bases essentielles pour guider les praticiens vers des choix de matériaux judicieux et des pratiques de construction efficaces.

I.1.3.1 Critères de choix des matériaux

Les critères de sélection des matériaux sont des éléments clés dans le processus de choix des composants de construction. Ils impliquent une évaluation approfondie des caractéristiques intrinsèques des matériaux, guidée par des considérations telles que la résistance mécanique, la durabilité, la conductivité thermique, et la disponibilité locale. La sélection des matériaux s'inscrit également dans le respect des normes et des recommandations spécifiques à chaque type de construction, contribuant ainsi à garantir la qualité, la sécurité et la durabilité des structures. Les critères incluent également des considérations pratiques telles que la facilité de mise en œuvre, l'impact environnemental, et la compatibilité avec les techniques de construction spécifiques. En somme, le processus de choix des matériaux repose sur une approche globale qui prend en compte des aspects techniques, environnementaux, et économiques pour garantir des résultats optimaux dans la réalisation des projets de construction.

I.1.3.1.1 Distribution granulométrique

Le choix judicieux d'un matériau en terre pour la construction débute par une évaluation attentive de sa distribution granulométrique, une caractéristique cruciale qui influence directement ses propriétés. La terre, en tant que matériau granulaire, présente une diversité significative dans la taille de ses particules, avec une plage potentielle de plus de 105 entre les granulats les plus gros et les argiles plus fines. La granulométrie définit la texture du sol, et sa détermination repose souvent sur des méthodes courantes telles que l'analyse granulométrique et la sédimentométrie. Ces approches consistent à séparer les diverses fractions du matériau et à les évaluer en pourcentage pondéral par rapport à l'échantillon global. Initialement, on distingue les éléments grossiers, tels que les graviers et les cailloux, avec un diamètre supérieur à 2 mm, des classes granulométriques traditionnelles, comprenant les sables, les limons et les

argiles, caractérisées par un diamètre inférieur à 2 mm, Le Tableau I.1 offre une représentation détaillée de ces différentes fractions, fournissant ainsi des données essentielles pour orienter le choix du matériau en fonction de sa distribution granulométrique spécifique.

Tableau I.1 Classification granulométrique des sols selon ASTM D2487[3].

Terre fine					Éléments grossiers	
<2µm	2µm - 20µm	20µm - 50µm	50µm - 200µm	200 µm - 2mm	2mm-2cm	>2cm
Argile	Limons fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier	Gravier	Cailloux

La répartition granulométrique exerce une influence prépondérante sur un éventail considérable de propriétés. Plusieurs chercheurs ont minutieusement analysé des documents techniques, incluant des normes et des recommandations internationales [3], [15], [23], [24], traitant de la distribution granulométrique des matériaux en terre. En se fondant sur ces références normatives [11], [18], [21], [25], [26], ces chercheurs ont abouti à la conclusion que les spécifications liées à la dimension des particules se révèlent être plus contraignantes pour des applications telles que la construction en pisé, la fabrication de briques de terre moulée (comme l'adobe), et la production de blocs de terre compressée (BTC).

La Figure I.15 montre les limites inférieure et supérieure de la distribution granulométrique des matériaux en terre (BTC, Pisé, BTM) selon les normes et les recommandations [18], [21], [25].

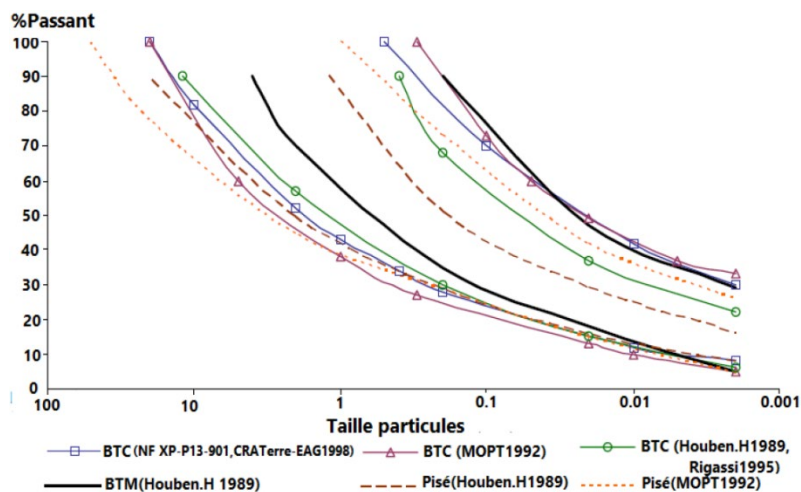


Figure I.14 Les zones granulométriques recommandées pour construire en BTC, en Pisé [4].

I.1.3.1.2 La plasticité

La plasticité du matériau, définie par des paramètres tels que la limite de liquidité (LL), la limite de plasticité (PL), et l'indice de plasticité (PI), toutes mesurées selon les normes d'Atterberg, jouent un rôle crucial dans la garantie de la résistance optimale des matériaux de terre face aux contraintes mécaniques et à l'interaction avec l'eau. Il est impératif de choisir des limites appropriées pour les briques de terre, en conformité avec la norme [21], afin de préserver une plasticité minimale assurant une cohésion entre les grains du matériau lors du processus de compactage ($2\mu\text{m} \leq 5\%$). La plasticité du sol est étroitement corrélée à la teneur en argiles et à leur capacité d'adsorption d'eau, comme explicitement illustré dans la Figure I.16. Ce paramètre essentiel joue un rôle déterminant dans la sélection des matériaux, influençant directement leur comportement et leurs performances dans diverses applications de construction en terre.

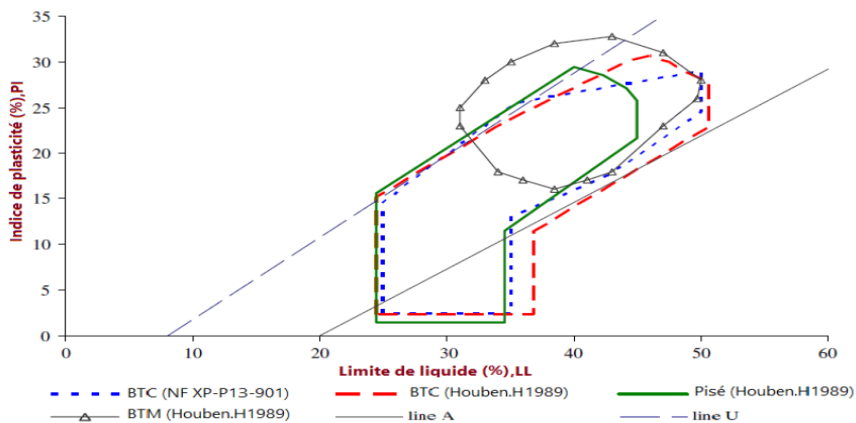


Figure I.15 Les zones de plasticité recommandées pour construire en BTC, en Pisé ou en BTM [4].

I.1.3.1.3 Compactage

Diverses recherches ont examiné le lien entre la densité du matériau en terre et l'effort de compactage, mettant en évidence l'importance de la teneur en eau optimale pour atteindre une masse volumique maximale. Les essais de Proctor normal ou modifié sont couramment employés afin de sélectionner les types de terre appropriés à la fabrication des briques en terre (BTC). Il est à noter que ces essais ne sont pas préconisés pour déterminer la teneur en eau optimale spécifique à la BTC. Des travaux antérieurs ont déconseillé leur usage pour les sols argileux [23], préférant plutôt le compactage statique dans de tels cas. (P'kla, 2002) a démontré que le compactage statique s'avère plus efficace dans ces situations [24].

La Figure I.17 expose les plages de compactage recommandées pour la construction en BTC, en pisé, ou en adobe, conformément aux recommandations [2],[22]. Ces directives fournissent des lignes directrices essentielles pour choisir les conditions de compactage idéales, impactant directement la qualité et la performance des matériaux de construction en terre.

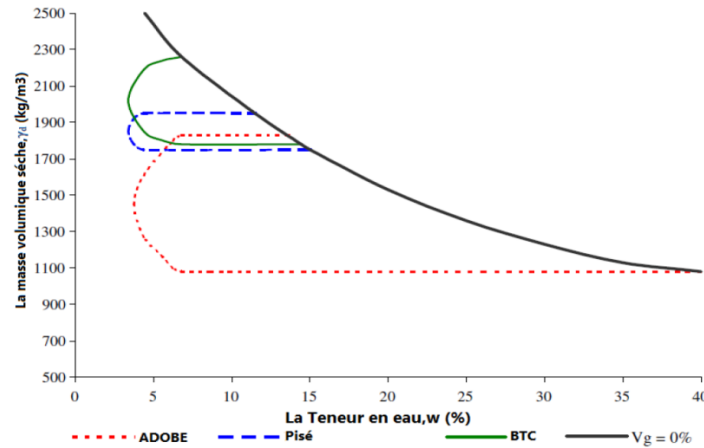


Figure I.16 Les zones de compactage recommandés pour construire en BTC, en Pisé ou en adobe[2].

I.1.3.1.4 Résistance à la compression simple

La capacité à supporter la compression simple des matériaux en terre crue non stabilisée, séchée à l'air libre, présente une plage variée, allant de quelques dixièmes de MPa. Les valeurs spécifiques varient, avec des niveaux estimés entre 0.5 et 1.5 MPa pour la bauge, 1 à 2.5 MPa pour l'adobe, et atteignent quelques MPa pour le pisé, oscillant entre 1 et 4 MPa. Les blocs de terre compressée BTC exhibent une plage encore plus étendue, variant de 1 à 7 MPa, comme indiqué dans la Figure I.18 [3].

Cependant, le secteur de la construction en terre crue est confronté à une lacune significative en matière de normes réglementaires spécifiques, en particulier en ce qui concerne la résistance à la compression simple, une propriété mécanique cruciale soumise à des exigences réglementaires rigoureuses. Conformément aux critères énoncés dans la norme [13], il est impératif que la résistance à la compression simple des blocs de terre compressée (BTC) atteigne ou dépasse 1.6 MPa.

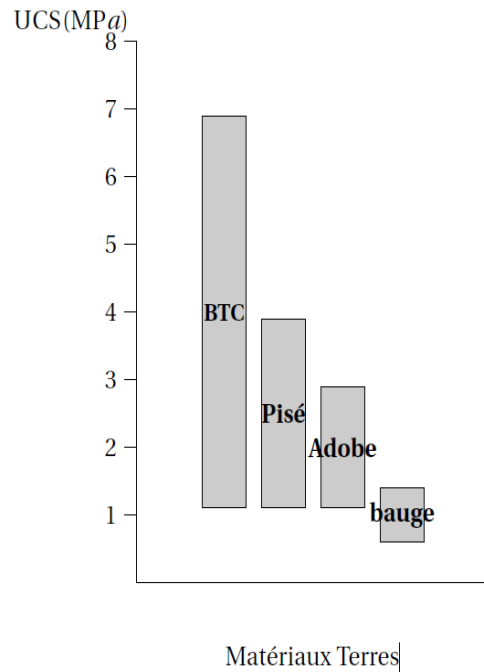


Figure I.17 Les valeurs de la résistance à la compression de la terre crue (non traitée) séchée à l'air libre [3].

I.1.4 Avantages de la construction en terre

Les avantages des constructions en matériau terre sont nombreux tels que :

- **Durabilité écologique :** Les constructions en terre utilisent un matériau naturel, abondant et renouvelable, ce qui les rend écologiquement durables. Elles contribuent à réduire l'empreinte écologique en limitant l'utilisation de ressources non renouvelables.
- **Performance thermique :** La terre possède d'excellentes propriétés thermiques, offrant une isolation naturelle contre la chaleur et le froid. Cela peut conduire à des bâtiments économes en énergie et offrant un confort thermique.
- **Adaptabilité culturelle :** Les techniques de construction en terre varient dans le monde entier en fonction des traditions culturelles et des ressources locales. Cela permet une grande diversité architecturale et une adaptation aux contextes régionaux.
- **Faible coût :** Les matériaux en terre sont souvent peu coûteux, et les techniques de construction peuvent être accessibles aux communautés à faibles revenus. Cela peut contribuer à la réduction des coûts de construction.

- Santé et bien-être : Les constructions en terre peuvent offrir un environnement intérieur sain en régulant l'humidité et en permettant une bonne qualité de l'air intérieur. De plus, l'utilisation de matériaux naturels peut réduire les risques allergènes.
- Réduction des déchets : La construction en terre peut minimiser la production de déchets de construction, car elle peut être réalisée avec des techniques qui ne génèrent que peu ou pas de déchets.
- Création d'emplois : Les constructions en matériau terre, en raison de leur nature souvent artisanale et locale, peut renforcer l'économie locale en créant des emplois dans le secteur de la construction. Cela favorise le développement économique et renforce les compétences au niveau communautaire.
- Réduction des émissions de CO2 : Comparées à certaines méthodes de construction conventionnelles qui nécessitent des processus énergivores et l'utilisation intensive de matériaux manufacturés, les constructions en terre ont le potentiel de réduire les émissions de dioxyde de carbone. La production de matériaux en terre nécessite généralement moins d'énergie et peut contribuer à une empreinte carbone plus faible dans le secteur de la construction
- Engagement communautaire : La construction en terre peut impliquer la communauté locale dans le processus de construction, renforçant ainsi le sentiment d'appartenance et de responsabilité envers les structures.
- Esthétique et créativité : La terre offre une palette de couleurs et de textures variée, permettant une grande créativité architecturale. Cela peut conduire à des bâtiments esthétiquement uniques.

I.1.5 Inconvénients de la construction en terre

Bien que la construction en terre présente de nombreux avantages, elle comporte également certains inconvénients, notamment :

- Sensibilité à l'eau : Les constructions en terre peuvent être sensibles à l'eau dans certaines conditions climatiques extrêmes, comme des pluies torrentielles, la construction en terre peut être vulnérable à l'érosion ou à d'autres dommages liés au climat. Des précautions supplémentaires doivent être prises dans ces environnements.
- Entretien fréquent : Certaines constructions en terre nécessitent un entretien régulier pour éviter des problèmes tels que le compactage du sol, les fissures ou l'érosion. Cela peut représenter un défi, en particulier dans des conditions climatiques difficiles.
- Durée de construction prolongée : La construction en terre peut nécessiter plus de temps par rapport aux méthodes de construction modernes, en particulier si des techniques traditionnelles et manuelles sont utilisées. Cela peut entraîner des délais plus longs pour les projets de construction.
- Manque de normes : Il peut y avoir un manque de normes universelles pour la construction en terre, ce qui peut entraîner des variations dans la qualité de construction et des défis pour garantir la conformité aux normes de sécurité. Heureusement, les études récentes permettent de couvrir cette lacune.

I.2 Généralités sur les liants

I.2.1 Les liants minéraux

Les liants minéraux sont des substances utilisées dans la construction pour créer une liaison chimique ou physique entre les particules d'autres matériaux, formant ainsi une masse solide et cohésive. Ces liants sont généralement dérivés de sources minérales naturelles ou peuvent être synthétisés. Ils sont essentiels pour solidifier et consolider des matériaux comme les agrégats, le sable, ou d'autres substances utilisées dans la construction.

Dans les constructions en béton, le liant hydraulique le plus couramment utilisé est le ciment Portland. Il est mélangé avec du sable, des gravillons et de l'eau pour former le béton, qui durcit et acquiert sa résistance avec le temps. Les liants hydrauliques sont essentiels dans la production

de béton, offrant des propriétés mécaniques robustes et une grande durabilité, ce qui en fait un matériau de construction très prisé dans divers projets architecturaux et infrastructurels.

Quant aux constructions en terre, la notion de liants hydrauliques peut également être applicable. La chaux hydraulique, par exemple, est parfois utilisée comme liant dans les mélanges de terre stabilisée. Elle peut améliorer la cohésion et la résistance de la terre sans sacrifier complètement ses caractéristiques naturelles. Cependant, les liants hydrauliques dans les constructions en terre sont généralement utilisés de manière plus modérée par rapport aux bétons conventionnels, afin de préserver les avantages écologiques et les propriétés spécifiques des constructions en terre crue.

- Ciment :

Le ciment est un matériau de construction essentiel. Il est obtenu par le broyage fin d'un mélange de matières premières telles que le calcaire, l'argile, le sable et le minerai de fer. Après le broyage fin de ces matières premières, la poudre résultante subit un processus de préchauffage avant d'être introduite dans un four rotatif. À des températures élevées d'environ 1450 °C, la poudre préchauffée subit la clinkérisation, donnant naissance au clinker de ciment. Ce clinker est ensuite finement broyé avec du gypse pour produire le ciment final. Enfin, le ciment est conditionné en sacs ou stocké en vrac, prêt à être distribué pour une utilisation dans diverses applications de construction.

Le ciment est le composant principal du béton, agissant comme le liant qui maintient les agrégats ensemble. Lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, le ciment subit une réaction chimique d'hydratation qui forme une matrice solide, généralement appelée gel C-S-H (calcium-silicate-hydrate). Cette matrice confère au béton sa résistance, sa durabilité et sa capacité à prendre différentes formes.

Les émissions exactes de dioxyde de carbone (CO₂) dans la fabrication du ciment peuvent varier en fonction de divers facteurs, y compris le type de procédé de fabrication utilisé, l'efficacité énergétique des installations, les matières premières utilisées, etc. Cependant, en général, la production de ciment est connue pour être une source significative d'émissions de CO₂.

Selon les estimations globales, la fabrication du ciment contribue à environ 7% des émissions mondiales de CO₂ d'origine humaine. En termes de chiffres, cela représente souvent plusieurs milliards de tonnes de CO₂ émises annuellement par l'industrie cimentière dans le monde.

Il est essentiel de noter que l'industrie du ciment explore activement des moyens de réduire ses émissions de CO₂, notamment par l'adoption de nouvelles technologies, la captation et le stockage du carbone, ainsi que le développement de ciments bas carbone.

- Chaux

La chaux est obtenue par calcination de certains minéraux comme la calcite (CaCO₃), la dolomite (CaMg(CO₃)₂) et la magnésite ou carbonate de magnésium (MgCO₃) plus ou moins pure. Le processus de production de la chaux comporte plusieurs étapes. Initialement, le calcaire est extrait de carrières et préparé en le concassant et en le broyant pour obtenir une granulométrie adéquate. Ensuite, le calcaire broyé subit un processus de calcination à des températures élevées, généralement autour de 900 à 1000 °C, dans un four à chaux. Ce processus libère du dioxyde de carbone (CO₂) et transforme le carbonate de calcium en oxyde de calcium, connu sous le nom de chaux vive. La chaux vive est ensuite éteinte en la mélangeant avec de l'eau, produisant de la chaux éteinte (hydroxyde de calcium) et générant de la chaleur. Après le tamisage pour obtenir une granulométrie uniforme, la chaux éteinte est stockée pour une utilisation ultérieure. Il est important de noter que le CO₂ libéré lors de la calcination du calcaire est considéré comme une émission indirecte de CO₂ dans ce processus. La nature précise du processus peut varier en fonction du type de chaux produit (aérienne ou hydraulique) et de l'application prévue.

Cependant, il est généralement reconnu que la production de chaux génère des émissions de CO₂ principalement dues à la décarbonatation du calcaire lors de la calcination. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), en 2019, le secteur de la chaux a émis environ 1,8 gigatonne (Gt) de CO₂ dans le monde. L'empreinte carbone due à la chaux à 0,78 tonnes d'équivalent CO₂ pour une tonne de chaux [23]. Ces chiffres peuvent varier d'une année à l'autre et sont susceptibles d'être influencés par des facteurs tels que les changements dans la demande de chaux, les technologies utilisées et les pratiques de gestion des émissions.

- Autres liants minéraux

Ces derniers souvent considérés comme des alternatives, incluent les géo-polymères, le gypse, et les cendres volcaniques, ainsi que des sous-produits issus de différentes industries, tels que le laitier de haut fourneau, les cendres volantes, les cendres de bagasse de canne à sucre, ou encore les cendres de bagasse de riz.

I.2.2 Les polymères organiques naturels (Les liants organiques)

Les polymères organiques naturels sont des composés moléculaires complexes caractérisés par des chaînes longues constituées d'unités répétitives d'origine organique, appelées monomères. Issus de sources naturelles telles que les plantes, les animaux ou les micro-organismes, ces polymères se distinguent des polymères synthétiques par leur origine biologique. La cellulose, dérivée de parois cellulaires végétales, la chitine, provenant de carapaces d'insectes et de crustacés, la kératine présente dans les cheveux et les ongles, l'amidon issu de plantes, et le caoutchouc naturel extrait de l'hévéa en sont des exemples. Ces polymères organiques naturels sont souvent appréciés pour leur biodégradabilité, contribuant ainsi à des pratiques respectueuses de l'environnement. Leur diversité fonctionnelle les rend essentiels dans diverses applications, de l'industrie alimentaire aux domaines médicaux, textiles, et bien d'autres.

Ces polymères organiques naturels présentent des caractéristiques spécifiques, notamment des masses molaires élevées atteignant plusieurs millions de g/mol. Leur conformation varie en fonction des conditions du milieu, telles que la température, le pH et le potentiel ionique. La longueur de persistance (L_p), dépendant du degré de polymérisation (D_p), est la distance au-delà de laquelle la rigidité d'un maillon n'influence pas l'orientation des maillons voisins. Certains polymères organiques sont qualifiés de poly-électrolytes, car ils comportent à la fois des charges négatives et positives sur leur chaîne, donnant lieu à un potentiel isoélectrique (PIE) lorsque les charges s'équilibrent. Ces propriétés définissent la nature des interactions de ces polymères avec d'autres particules. Les bio-liants englobent ces polymères naturels et sont classés en quatre grandes familles de molécules (voire Figure I.19).

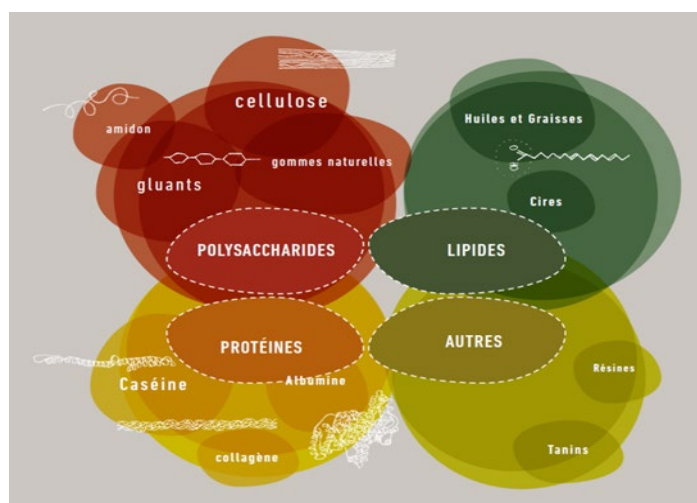


Figure I.18 Les quatre grandes familles de biopolymères [23].

I.2.2.1 Les polysaccharides

Les polysaccharides, également connus sous le nom de polymères de sucres, résultent de la polymérisation de monomères spécifiques appelés monosaccharides ou oses, tels que le glucose et le galactose. Les monosaccharides, molécules poly-hydroxylées comportant une fonction carbonyle (C=O), sont catégorisés en aldoses et cétooses. Cette classification, illustrée de manière schématique dans la Figure I.20 [24], offre un aperçu de la diversité structurale des polysaccharides.

Les polysaccharides, ou glucides complexes, sont des polymères de sucres qui varient en structure et en fonction de leur source. Voici quelques exemples de polysaccharides courants selon leur origine.

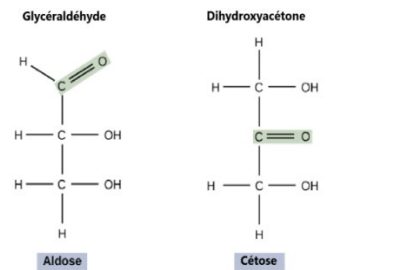


Figure I.19 schéma de deux chaînes de molécules de cétoose et d'aldose.

I.2.2.1.1 Polysaccharides d'origine végétale

- **L'amidon**

L'amidon, un polysaccharide complexe composé de glucose, joue un rôle crucial en tant que réserve d'énergie dans les cellules végétales. Principalement présent dans les plantes, il se stocke sous forme de granules dans des organes tels que les racines, les tubercules et les graines. La structure de l'amidon se compose généralement de deux types de polymères de glucose. D'une part, l'amylose, qui forme une chaîne linéaire de glucose liée par des liaisons α -1,4, adoptant une structure en spirale et présentant moins de ramifications. D'autre part, l'amylopectine, une chaîne de glucose avec des ramifications, liée par des liaisons α -1,4 et α -1,6, affichant une structure plus ramifiée et une meilleure solubilité dans l'eau que l'amylose. (Figure I.21).

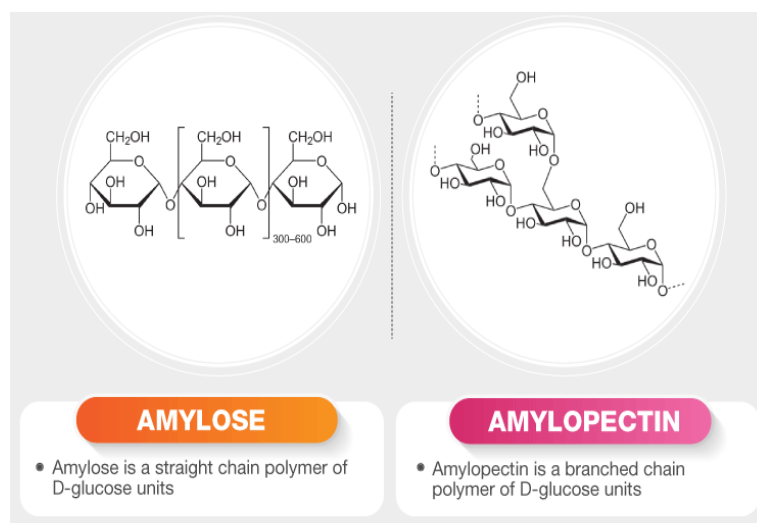


Figure I.20 Structures de l'amylopectine et de l'amylose.

- **Gomme de Guar :**

La gomme de guar est extraite des graines du guar (*Cyamopsis tetragonoloba*), une plante originaire d'Inde. Elle se compose principalement de galactomannane, un polysaccharide composé de mannose et de galactose (voire la Figure I.22). La gomme de guar est soluble dans l'eau et forme des solutions visqueuses. Elle est utilisée comme épaississant dans une variété de produits alimentaires, notamment les sauces, les soupes, les crèmes glacées et les produits de boulangerie.

- **Gomme de caroube :**

La gomme de caroube est extraite des graines de caroubier (*Ceratonia siliqua*), un arbre méditerranéen. Elle est principalement composée de galactomannane, similaire à celui de la gomme de guar (voire la Figure I.22), mais avec une structure moléculaire légèrement différente. La gomme de caroube est également soluble dans l'eau et est utilisée comme épaississant et stabilisant dans une gamme de produits alimentaires, y compris les produits laitiers, les sauces et les produits de confiserie. Elle est souvent utilisée comme substitut de la gomme de guar dans certaines applications.

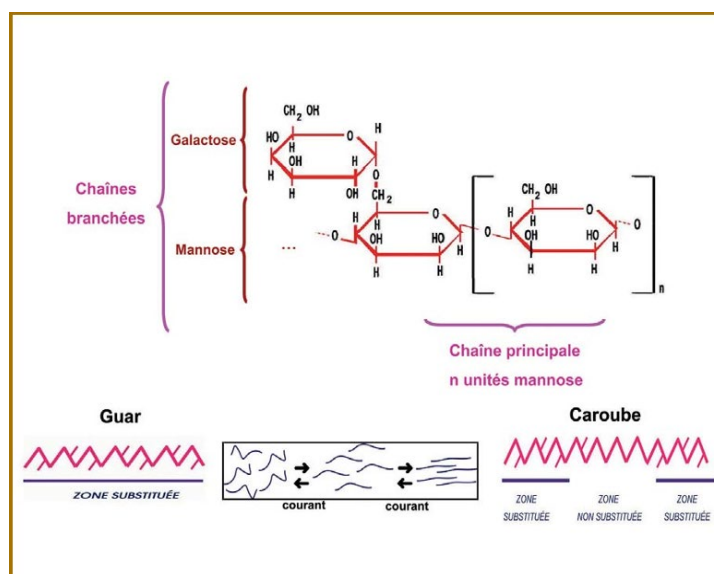


Figure I.21 Configuration fondamentale des macromolécules constitutives des farines de caroube et de guar [25].

- **La lignine et la cellulose**

La cellulose et la lignine représentant plus de 70% de la biomasse des plantes, sont des composants fondamentaux des structures végétales.

La cellulose est la substance organique la plus répandue sur terre., est un polysaccharide complexe composé de chaînes linéaires de glucose, reliées entre elles par des liaisons β -1,4. C'est l'un des principaux constituants des parois cellulaires végétales, offrant rigidité et résistance. La cellulose forme des fibres insolubles dans l'eau et constitue une source importante de fibres végétales utilisées dans la production de papier, de textiles et d'autres matériaux. D'autre part, La lignine est un polymère complexe composé de différents composés phénoliques. Elle joue un rôle crucial dans le soutien structurel des plantes, conférant une rigidité aux tissus ligneux. La lignine est responsable de la résistance des bois et autres matériaux végétaux. Bien que la cellulose et la lignine soient tous deux des composants structurels clés des plantes, leurs propriétés et leurs fonctions diffèrent, contribuant ensemble à la complexité et à la diversité des matériaux d'origine végétale [26]

I.2.2.1.2 Polysaccharides animale :

- **Chitosane**

Le chitosane est un polysaccharide naturel dérivé de la chitine, un polymère que l'on trouve abondamment dans l'exosquelette des crustacés tels que les crabes, les crevettes et les insectes, ainsi que dans la paroi cellulaire de certains champignons. La chitine est modifiée chimiquement par désacétylation pour produire le chitosane (voire Figure I.23). Ce biopolymère présente des propriétés uniques telles que la biocompatibilité, la biodégradabilité, et des capacités fonctionnelles intéressantes. En raison de ces caractéristiques, le chitosane est utilisé de manière étendue dans divers domaines, tels que l'industrie alimentaire, pharmaceutique, cosmétique, ainsi que dans des applications médicales et environnementales.

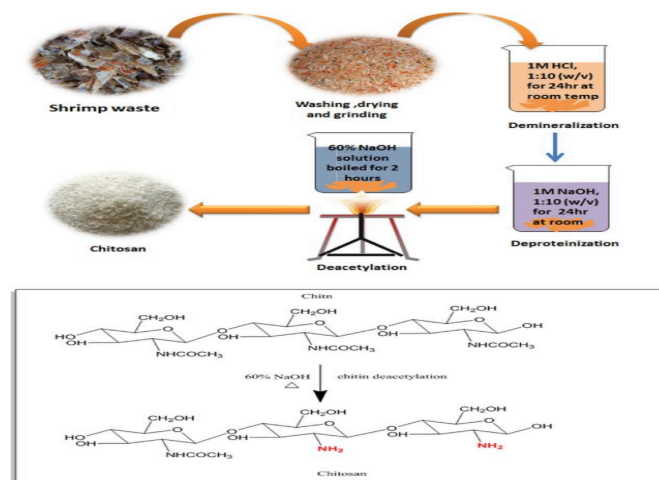


Figure I.22 Schéma d'extraction de la chitosane à partir de la chitine [27].

I.2.2.1.3 Polysaccharides d'origine microbienne :

- **La gomme de Xanthane**

La gomme de Xanthane est un polysaccharide naturel produit par la fermentation de sucres, généralement issus du maïs, par une bactérie appelée *Xanthomonas campestris*. Ce polymère présente des propriétés épaississantes et stabilisantes, ce qui le rend largement utilisé comme agent gélifiant et émulsifiant dans l'industrie alimentaire, pharmaceutique et cosmétique. La gomme de Xanthane a la capacité de former des gels visqueux même à faibles concentrations, améliorant la texture et la stabilité des produits, (voir Figure I.24). Elle est souvent utilisée dans une variété de produits, tels que les sauces, les soupes, les crèmes glacées, les produits de boulangerie, les produits cosmétiques, et bien d'autres. En raison de ses propriétés polyvalentes, la gomme de xanthane est appréciée pour ses applications en tant qu'additif alimentaire et ingrédient dans divers produits industriels.

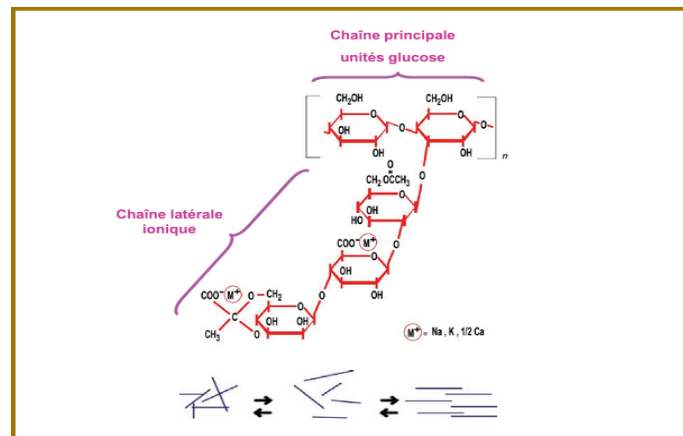


Figure I.23 Structure du xanthane [25].

- **Alginates :**

Le polysaccharide d'alginate est principalement extrait des parois cellulaires des algues brunes, notamment des genres *Laminaria* et *Macrocystis*. Il s'agit d'un copolymère linéaire composé d'acide mannuronique (M) et d'acide guluronique (G) liés par des liaisons glycosidiques. La séquence et la proportion relative de ces deux acides déterminent les propriétés physiques de l'alginate.

Les algues brunes synthétisent l'alginate pour renforcer leurs parois cellulaires et résister aux conditions environnementales marines. L'alginate est extrait des algues par des procédés chimiques ou physiques qui préservent ses propriétés. Il se présente sous forme de poudre blanche, soluble dans l'eau, et forme des gels viscoélastiques en présence d'ions calcium (voire Figure I.25).

En industrie alimentaire, l'alginate est largement utilisé comme agent gélifiant, épaississant et stabilisant. Il est fréquemment employé pour créer des textures gélifiées dans des produits comme les desserts, les nappages, et les produits laitiers. De plus, ses propriétés de gélification sont exploitées dans des applications médicales et pharmaceutiques, notamment pour la fabrication de pansements et de formulations pharmaceutiques.

L'agar-agar et le carraghénane sont des biopolymères supplémentaires extraits des algues rouges. Leur capacité de former des gels trouve également des applications variées, notamment dans l'industrie agroalimentaire et le traitement des eaux [28].

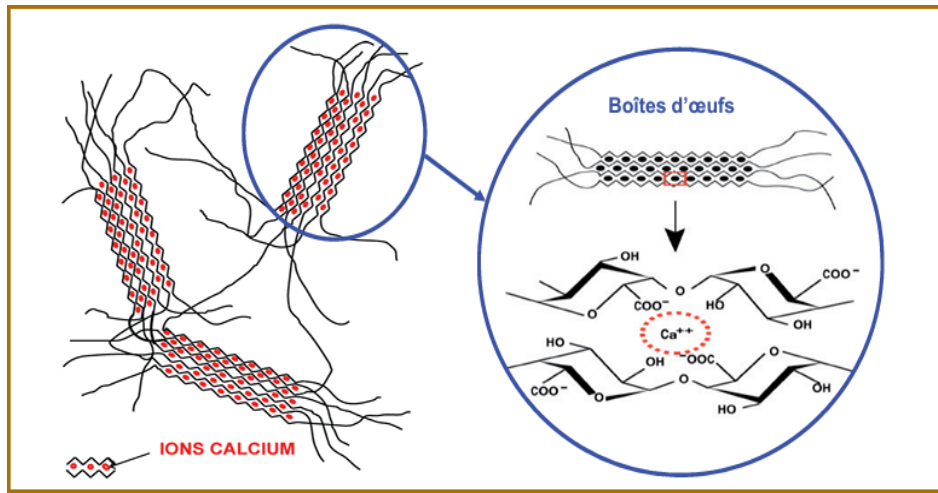


Figure I.24 Les chaînes d'alginate forment des « boîtes d'œufs » dont les œufs sont les ions calcium (en rouge)[25].

I.2.2.2 Les protéines

Les protéines représentent des structures complexes de peptides, formées par l'association d'acides aminés liés par des liaisons peptidiques distinctives. Avec une diversité de 20 à 25 acides aminés, ces composés se caractérisent par la présence de groupes fonctionnels tels que le carboxyle (-COOH), l'amine (NH_3^+), l'hydrogène (H), et un groupe distinct (R) (voir Figure I.26). Du fait de la dualité des fonctions $-\text{NH}_2$ et $-\text{COOH}$, les molécules protéiques exhibent un comportement amphotère, leur charge en surface variant en fonction du pH de l'environnement.

La classification des protéines en deux catégories principales, soit les protéines fibreuses (telles que le collagène, la myosine, la kératine, etc.) et les protéines globulaires (enzymes, hormones, ovalbumine, hémoglobine, etc.), dépend de la configuration des particules. Les protéines fibreuses montrent une insolubilité dans l'eau, tandis que les protéines globulaires y sont miscibles [29].

Dans le contexte de la stabilisation des structures en terre crue, l'utilisation de composés tels que la caséine, l'ovalbumine, l'albumine sanguine d'animaux, ou le gluten, joue un rôle significatif.

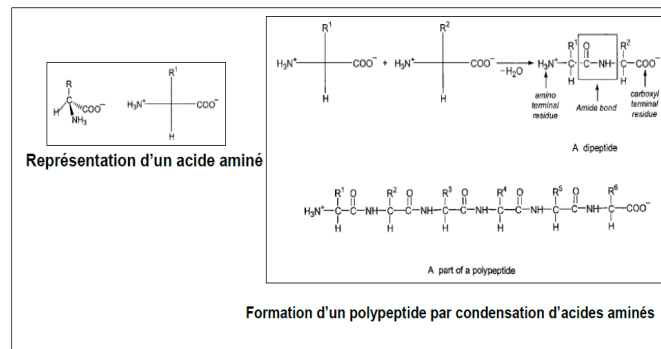


Figure I.25 Représentation d'une chaîne de protéine[30].

I.2.2.2.1 Les protéines d'origine animale

- **Caséine**

La caséine est une protéine prévalence dans le lait de divers mammifères, dont les vaches, les chèvres et les brebis, constitue approximativement 80% des protéines totales du lait, se déclinant en caséine alpha, bêta et kappa. Composée d'acides aminés, la caséine représente une molécule complexe, insusceptible à la dissolution dans l'eau et structurée en micelles colloïdales, conférant ainsi sa capacité à générer des gels, un phénomène influencé par le pH et la présence d'ions calcium[30].

À un pH de 4,7 (le point isoélectrique, PIE, de la caséine), que ce soit par fermentation lactique ou par l'addition d'un acide, la caséine précipite sous forme de caséine acide, soluble dans les acides et les alcalis, mais s'expandant uniquement dans l'eau sans s'y dissoudre [30][39]. L'adjonction de présure, une enzyme gastrique, au lait permet l'obtention de la paracaséinate de calcium et des phosphates de calcium, donnant naissance à la caséine présure, solubilisée uniquement dans les acides [30][31].

D'un point de vue chimique, diverses caséines sont distinguées, notamment les caséines α 1, α 2, κ et β . Ces molécules se caractérisent par leur amphiphiles, possédant à la fois un pôle hydrophile et une partie hydrophobe. Parmi elles, la caséine α 2, représentant 15% des caséines, est la plus hydrophile, alors que la caséine β (33% des caséines) est la plus hydrophobe [30][26]. Cette propriété permet aux caséines de s'agglutiner en micelles, agissant telles des tensioactifs (voir Figure I.27). Ces subtilités chimiques et comportementales ajoutent une complexité à la compréhension de la caséine et à ses nombreuses applications industrielles[32].

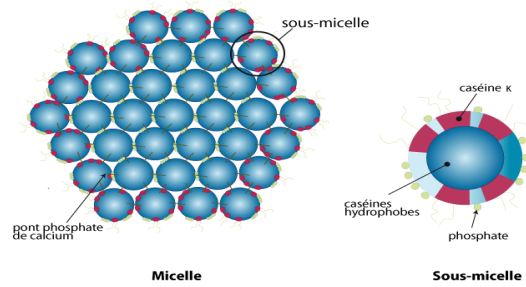


Figure I.26 des micelles de caséines [26].

- **L'ovalbumine et l'albumine**

L'ovalbumine et l'albumine du sang sont des protéines d'origines distinctes, mais partageant des propriétés fonctionnelles importantes. L'albumine est une protéine soluble dans l'eau présente dans le sérum sanguin des animaux, tout comme dans le blanc d'œuf, où elle est connue sous le nom d'ovalbumine. L'ovalbumine, constituant 50% des protéines du blanc d'œuf, est une phosphoprotéine globulaire caractérisée par une structure où la moitié des acides aminés sont hydrophobes. Le blanc d'œuf renferme également d'autres protéines telles que l'ovotransferrine (13% des protéines du blanc d'œuf) et l'ovomucoïde[30]. Ces protéines, incluant l'ovalbumine, sont reconnues pour leur remarquable activité tensioactive, les rendant prisées dans diverses industries pour la création de mousses stables[30] [33].

I.2.2.2.2 Les protéines végétales

Les protéines végétales, essentielles à une alimentation équilibrée, sont présentes dans une variété de sources végétales, offrant des alternatives nutritives et durables aux protéines animales. Des légumineuses telles que les pois chiches et les lentilles, les céréales comme le quinoa et le blé, les noix, les graines de chia et le soja sont des exemples riches en protéines végétales. Ces aliments fournissent une composition nutritionnelle complète, regorgeant d'acides aminés essentiels nécessaires à la synthèse protéique dans le corps humain. Les protéines végétales sont non seulement bénéfiques pour la santé, avec des avantages tels que la réduction des risques de maladies cardiovasculaires, mais elles jouent également un rôle crucial dans la promotion de modes de consommation alimentaire plus respectueux de l'environnement, contribuant ainsi à la durabilité globale de nos habitudes alimentaires.

I.2.2.3 Les lipides

Les lipides sont formés à partir des matières grasses animales et des graines de diverses plantes, sont des composés organiques essentiels qui occupent une place fondamentale dans le métabolisme humain (voire Figure I.28). Illustrant cette diversité lipidique, l'huile de lin, extraite des graines de *Linum usitatissimum*, et le beurre de karité, issu des noix de l'arbre *Vitellaria Paradoxa*, se distinguent parmi d'innombrables exemples, trouvant une pluralité d'applications dans des secteurs industriels variés.

L'huile de lin, prisée notamment dans le domaine des peintures à l'huile, joue un rôle crucial dans l'amélioration de la résistance à l'abrasion et à l'érosion des revêtements. Composée d'acides gras insaturés, elle s'engage dans un processus de siccation, garantissant une oxydation lente qui renforce les propriétés protectrices de la peinture face aux solvants[26].

Par ailleurs, l'ajout de bases fortes telles que NaOH ou KOH dans les lipides conduit à la saponification, processus majeur utilisé pour la fabrication de savon. Cette transformation chimique permet la création de savons aux propriétés diverses, soulignant ainsi l'impact polyvalent des lipides dans des applications industrielles clés.

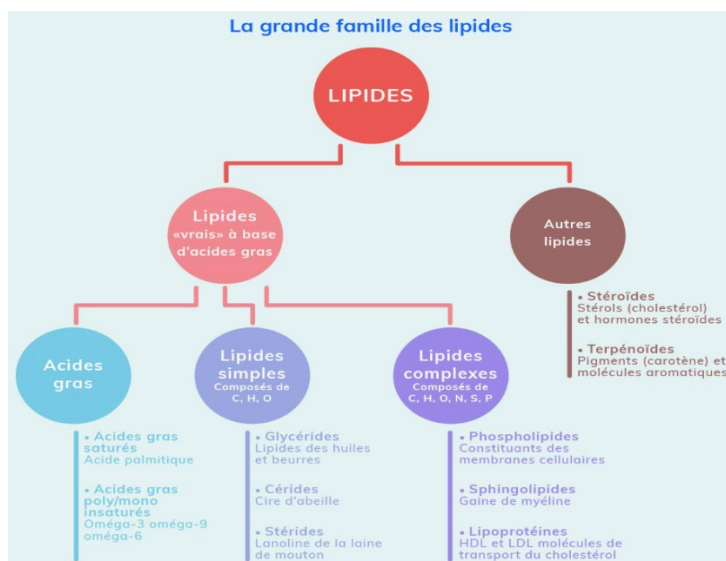


Figure I.27 La grande famille des lipides (PENSER SENTE)

I.2.2.4 Les tanins

Les tanins sont des molécules complexes et poly-phénoliques, tirent leur origine du métabolisme végétal et se manifestent dans diverses parties des plantes, tels que les fruits, les feuilles, l'écorce et les graines. Ces composés, jouant un rôle essentiel dans la biologie des plantes, agissent comme des agents de défense naturels contre les herbivores et les pathogènes.

La formation des tanins résulte de processus biochimiques sophistiqués, impliquant notamment des réactions enzymatiques et des interactions complexes entre divers composants cellulaires. Au-delà de leur rôle écologique, les tanins ont suscité un intérêt accru en raison de leurs propriétés uniques. Leurs applications s'étendent à des domaines divers, tels que la médecine, où ils démontrent des propriétés anti-oxydantes et anti-inflammatoires, l'industrie alimentaire, où ils contribuent à la saveur et à la stabilité des produits, et même dans la préservation des matériaux, agissant par exemple comme agents tannants dans la production du cuir. Cette diversité d'applications témoigne de la complexité et de la polyvalence des tanins en tant que molécules complexes au sein du règne végétal.

La configuration spatiale des groupes hydroxyles (-OH) est responsable des propriétés particulières des acides tanniques, conférant à ces composés la capacité de chélater les ions métalliques et d'induire la précipitation des protéines. Une utilisation ancienne de cette caractéristique se retrouve dans le traitement du cuir, où les acides tanniques ont longtemps été appliqués pour prévenir la dégradation des protéines fibres présentes dans les peaux animales.

Les principales origines naturelles des tanins comprennent le châtaignier (*Castanea sativa*), le chêne (*Quercus robur*, *Quercus petraea*) et le mimosa (*Acacia mearnsii*). La solubilité des tanins dans l'eau décroît proportionnellement à l'accroissement de leur masse molaire (D_p élevé). Pour accroître leur solubilité dans l'eau, certains tanins disponibles sur le marché subissent un processus de sulfitage [4] [30].

Dans certaines zones d'Afrique de l'Ouest, telles que le Burkina Faso et le Ghana, le tanin extrait des cosques de fruits du néré (*Parkia biglobosa*) connaît une application particulière. Il est utilisé comme pigment ornemental et agent stabilisant dans la construction en terre crue, contribuant à renforcer la robustesse et la durabilité des revêtements et des sols [4] [30].

I.3 La stabilisation du sol pour la construction

L'utilisation de la terre crue comme matériau de construction remonte à des millénaires, mais son application contemporaine suscite un regain d'intérêt en raison de son caractère écologique et de sa disponibilité locale. Cependant, l'un des défis majeurs associés à l'utilisation de la terre crue dans la construction est sa sensibilité aux conditions environnementales, notamment à l'eau. Pour surmonter cette limitation, la stabilisation de la terre crue par l'ajout de liants minéraux ou organiques a émergé comme une solution prometteuse [34]. Cette approche vise à renforcer les propriétés mécaniques et la durabilité de la terre crue, offrant ainsi une alternative durable et économique pour la construction. Dans la suite de ce document, nous considérerons

deux types de stabilisation de la terre crue, en mettant l'accent sur l'utilisation de liants minéraux et organiques, et examinerons les avantages environnementaux et structurels qui en découlent.

I.3.1 La stabilisation aux liants minéraux

La stabilisation de la terre crue avec des liants minéraux est largement documentée dans la littérature scientifique, cette méthode étant considérée comme la plus répandue. Une revue bibliographique approfondie a révélé que 90% des travaux étudiés se concentrent sur l'utilisation de liants minéraux[35]. Parmi ceux-ci, environ 50% impliquent l'incorporation de ciment, tandis que le reste est réparti entre l'utilisation de chaux et d'autres ajouts minéraux, ou encore un mélange de plusieurs types de liants minéraux. Cette prédominance des liants minéraux dans la recherche témoigne de leur efficacité et de leur polyvalence dans l'amélioration des propriétés de la terre crue. L'utilisation fréquente de ciment s'explique par sa capacité à former des liaisons chimiques solides avec les particules de terre, renforçant ainsi la structure globale du matériau. Cette approche offre une perspective prometteuse pour le développement de techniques de construction durables, en exploitant les avantages synergiques des liants minéraux pour accroître la résistance et la durabilité des constructions en terre.

I.3.1.1 Effet sur les résistances mécaniques de la brique en terre compressé(BTC)

La majorité des études sur la stabilisation des briques en terre compressée (BTC) avec du ciment se concentrent principalement sur l'évaluation de la résistance à la compression simple. Bien que certaines recherches explorent également les résistances en flexion et en traction, ces aspects sont généralement analysés plus en détail en cas d'ajout de fibres au matériau. Dans notre contexte, nous nous focaliserons exclusivement sur les résistances à la compression, excluant ainsi toute considération d'ajouts de fibres.

Il est à noter que la comparaison des résistances en compression entre différentes publications peut être complexe en raison de plusieurs facteurs. Tout d'abord, les valeurs de résistance dépendent du processus de fabrication des éprouvettes, que celles-ci soient moulées, adobes, pressées (pisé ou BTC) ou extrudées, chacune ayant des plages de densité distinctes. Des recherches antérieures, soulignent l'impact significatif de la densité du matériau sur l'efficacité de la stabilisation[3] [30]. De plus, en raison des phénomènes de frettage, le rapport entre la hauteur et la plus petite longueur caractéristique de la section de l'éprouvette, également connu sous le nom d'élancement, demeure un paramètre crucial dans la mesure des résistances à la compression simple [30], [36], [37]. Ainsi, pour garantir une comparaison significative des

résistances en compression provenant de différentes sources, il est essentiel de s'assurer de la similitude des protocoles expérimentaux utilisés, étant donné l'absence de norme d'essai internationale, et surtout de veiller à ce que les échantillons présentent des élancements équivalents, faute de quoi les comparaisons restent difficiles.

I.3.1.1.1 Stabilisation au ciment

De nombreuses études ont été consacrées à la stabilisation des briques en terre compressée (BTC) à l'aide de ciment. Toutefois, l'utilité de bon nombre d'entre elles est restreinte en raison de l'absence fréquente de données cruciales, telles que les dimensions des échantillons ou les conditions de cure. Cette lacune rend parfois ardue la comparaison des résultats et la généralisation des conclusions. Pour remédier à cette situation spécifiquement dans le contexte des briques en terre compressée, le Tableau I-2 compile les données provenant de neuf articles traitant de la stabilisation de ces briques. Ces dernières sont fabriquées selon différentes méthodes, notamment les blocs de terre comprimée (BTC). Les informations relatives au temps de cure et à l'élancement sont présentées dans ce tableau, offrant ainsi une base comparative spécifique pour une meilleure compréhension des résultats et une évaluation approfondie de l'efficacité des diverses approches de stabilisation des briques en terre compressée.

Tableau I.2 bibliographie sur les BTC stabilisées au ciment (Rc: résistance à compression, n.m: non mesurée)[30].

Référence	Type	Élancement	Temps de cure (j)	Ciment(%)	Rc(MPa)
(Bahar et al.,2004)	BTC	1	28	0	1.6
				4	2.3
				6	3.2
				8	4.0
				10	4.1
				12	5.2
				15	6.1

				20	6.4
(Alavéz-Ramírez et al., 2012)	BTC	1	28	0	0.6
				10	23.5
(MedjoEko et al., 2012)	BTC	0.2	28	0	1.0
				4	3.0
				7	10.4
				10	11.6
(Lima et al., 2012)	BTC	1	28	0	n.m.
				6	0.7
				12	3.1
(Eires et al., 2014)	BTC	1.2	56	0	1.0
				4	1.5
(Alam et al., 2015)	BTC	1	Pas de cure	0	1.0
				5	1.0
				7	1.3
				10	2.0
(Seco et al., 2017)	BTC	1.2	28	0	n.m.
				10	11-14
(Tran et al., 2018)	BTC	2	28	0	0.6
				4	1.5

				8	5.6
				12	6.0
(Sore et al., 2018)	BTC	n.m	21	0	1.4
				8	8.2

Les données présentées dans le Tableau I.2 mettent en évidence une augmentation peu significative de la résistance en compression avec l'incorporation de ciment, à l'exception d'une étude spécifique où l'adjonction de 10% de ciment a entraîné un passage remarquable de la résistance en compression de 0,6 à 23,5 MPa [39]. Dans les autres recherches, cette amélioration est nettement moins marquée. Par exemple, les résistances sont respectivement passées de 1,0 MPa à 2,0 MPa avec l'ajout de 10% de ciment [40]. Cependant, il convient de noter que dans ces deux études, l'absence de cure humide pourrait expliquer la modération des résistances en compression. Un cas similaire est observé où la résistance a évolué de 1,6 MPa à 6,4 MPa avec l'ajout de 20% de ciment [41]. Les valeurs relativement basses de résistance constatées dans certaines de ces études suscitent des interrogations, car il est courant d'obtenir des résistances en compression supérieures à 2 MPa avec des briques en terre crue fabriquées à partir de sols suffisamment argileux. La modeste amélioration des résistances en compression avec l'ajout de ciment, parfois en quantités substantielles, corrobore les conclusions avancées dans l'article de (Van Damme et al) [30] , [3].

I.3.1.1.2 Stabilisation à la chaux

Certaines recherches se sont attardées sur la stabilisation des briques en terre crue en utilisant la chaux. Le Tableau I.3 consolide les résultats issus de cinq références distinctes. Les données présentées dans ce tableau présentent des similitudes avec celles du Tableau I.2, cependant, une colonne supplémentaire apporte des précisions sur la nature spécifique de la chaux employée. Cette distinction s'avère cruciale étant donné que les comportements peuvent considérablement différer entre une chaux hydraulique (composée d'un mélange de chaux et de minéraux hydrauliques) et une chaux « pure », qu'elle soit éteinte (Ca(OH)_2) ou vive (CaO). L'ajout de cette information vise à fournir une perspective plus approfondie sur les paramètres de

stabilisation des briques en terre crue à la chaux, ouvrant ainsi la voie à une analyse plus détaillée des résultats et des implications spécifiques à chaque type de chaux [30].

Tableau I.3 : Tableau I.5 bibliographie sur les BTC stabilisées à la chaux.[30].

Reference	Type	Élancement	Durée de cure (j)	Test de tenue à l'eau	Type de chaux	Chaux (%)	FC (MPa)
(Alavéz-Ramírez et al., 2012)	BTC	1	28	X	Chaux hydratée	0	0.6
						10	16.5
(Eires et al., 2014)	BTC	1.2	56	X	Chaux hydratée	0	1.0
						4	0.8
						4	1.9
(Alam et al., 2015)	BTC	1	Pas de cure	X	Non spécifique	0	1.0
						5	0.6
						7	0.8
						10	1.3
(Seco et al., 2017)	BTC	1.2	28	X		0	n.m.
						10	4.5-5.5

Tout comme les constatations relatives aux résistances avec 10% de ciment, les résultats concernant les résistances en compression sèche avec 10% de chaux dans l'étude de (Alavéz-Ramírez et al., 2012) [38] se démarquent de manière inhabituelle, affichant des valeurs anormalement élevées en comparaison avec les résultats d'autres recherches (16,5 MPa à 28 jours). Dans le contexte des autres enquêtes, l'augmentation de la résistance en compression sèche demeure très modeste, indépendamment de la teneur en chaux (allant jusqu'à 12%) et du type de chaux utilisé, y compris pour une chaux hydraulique.

I.3.1.1.3 Stabilisation avec des liants minéraux alternatifs

L'objectif fondamental de ces recherches réside dans la proposition novatrice de réduire la proportion de ciment ou de chaux en les substituant par des pouzzolanes à empreinte carbone réduite. Une motivation sous-jacente est également de valoriser des résidus industriels, tels que les cendres de charbon, les résidus de bagasse de canne à sucre, ou encore la poussière issue du fourneau de ciment. Certains de ces agents liants prennent la forme de mélanges comprenant à la fois des pouzzolanes et du ciment ou de la chaux. Dans le cas des géo-polymères, par exemple, l'activation de la pouzzolane, comme le méta-kaolin [39]. Bien que ces alternatives soient envisagées comme moins polluantes que l'utilisation exclusive de ciment ou de chaux, la quantité de liants employée peut sembler relativement élevée, atteignant parfois jusqu'à 20%.

Des résultats surprenants suscitent l'attention. En utilisant un mélange de 20% de chaux et de cendres de bagasse de canne à sucre, les chercheurs ont obtenu une résistance à la compression atteignant jusqu'à 21,3 MPa[38]. Dans les travaux examinant l'influence du processus de cure, il apparaît que les durées nécessaires pour obtenir les meilleures résistances sont relativement prolongées. Cette observation concorde avec le mécanisme d'action caractéristique des liants pouzzolaniques, dont la cinétique opère plus lentement par rapport au ciment[38], [40].

Tableau I.4 bibliographie sur les briques en terre crue stabilisées avec des liants minéraux alternatifs.[30].

Référence	Liant alternatif	Type	Élancement	Durée de cure(jour)	Liant (%)	FC(MPa)
	Chaux – Cendres de	BTC		-	0	0.6
				7	20	17.7

(Alavéz-Ramírez et al., 2012)	bagasse de canne à sucre		1	14	20	20.8
				28	20	21.3
(Hossain et al., 2011)	Poussière de fourneau de ciment	BTC	2	-	0	0.1
				7,14,28,56 et 90	2	0,5-1,7
					5	1,5-3,1
					10	1,5-4,3
					15	2,1-5,3
	20	2,7-6,0				
	Cendre volcanique	BTC	2	7,14,28,56 et 90	5	0,5-1,2
					10	0,5-1,8
					15	0,5-2,8
					20	0,5-3,1
Villamizar et al. (2012)	Cendre de charbon	BTC	0.5	-	0	1.9
				5	3.3	
				10	1.0	
(Seco et al., 2017)	Chaux (CL90-S) + laitier de haut fourneau (LHF))	BTC	1.2	28	0	n.m.
					10	11.7
	Ciment + laitier de haut fourneau (LHF)	BTC	1.2	28	0	n.m.
					10	13.6
	Géo-polymère	BTC		7	0	1.4
					5	2.8

(Sore et al., 2018)	(Méta-kaolin activé au NaOH)		n.m.		10	4.4
					15	6.7
					20	8.9

L'essence de ces études réside dans la recherche de méthodes novatrices visant à réduire l'utilisation de ciment ou de chaux en intégrant des matériaux à faible empreinte carbone, tout en valorisant des sous-produits industriels tels que les résidus de biomasse, les cendres de scories, ou les déchets de matières premières de l'industrie cimentière. Certains de ces liants résultent de la combinaison astucieuse de pouzzolanes avec du ciment ou de la chaux, tandis que les géo-polymères, un domaine émergent, exploitent l'activation de la pouzzolane, par exemple, à travers l'utilisation de solutions alcalines concentrées [39].

Malgré l'aspiration à un moindre impact environnemental, il est relevé que les proportions de liants nécessaires dans ces approches peuvent être considérables, atteignant parfois des taux aussi élevés que 20%. Ces constatations remettent en question la balance écologique réelle de ces alternatives par rapport aux méthodes traditionnelles utilisant uniquement ciment et chaux.

Un élément de surprise émerge également des travaux où l'utilisation d'un mélange constitué de 20% de chaux et de résidus de biomasse a permis d'atteindre des résistances à la compression allant jusqu'à 21,3 MPa [39]. Lorsque la durée de cure est prise en compte dans les analyses [38], [40], il est observé que les délais nécessaires pour atteindre les performances optimales sont significativement prolongés, soulignant ainsi la nature cinétique plus lente des liants pouzzolaniques par rapport au ciment.

I.3.1.2 Effets sur la durabilité

La lacune dans la recherche sur la consolidation des matériaux de construction à base de terre, soulignant que la résistance à l'eau est souvent le seul paramètre de durabilité pris en compte. L'absence de normes internationales contribue à une grande variabilité dans les méthodes d'évaluation d'une étude à l'autre. Néanmoins, une référence clé [41], se distingue en explorant des aspects plus complets de la durabilité des briques en terre crue. Cette recherche remet en question l'efficacité de certaines méthodes d'évaluation, tout en soulignant que l'ajout de liants minéraux améliore systématiquement la résistance à l'eau, bien que la comparaison des résultats reste complexe en raison de diverses méthodologies d'essai.

D'autres études abordent cette problématique en utilisant diverses méthodes telles que des tests d'érosion accélérée, des mesures d'absorption d'eau par capillarité, et des évaluations de la résistance en compression humide. (Bahar et al.2004) [42], ont utilisé des essais d'érosion accélérée impliquant des jets d'eau sous pression pour évaluer la résistance à l'eau des échantillons, tandis qu'(Alavez-Ramirez et al.2012)[38] ont mesuré la résistance à la compression humide après une immersion de 24 heures pour évaluer la durabilité des briques de terre compactée stabilisées avec de la cendre de bagasse et de la chaux.

Par ailleurs, l'étude de (Alam Naseer et Shah.2015) [43] a incorporé des essais d'érosion accélérée et d'immersion, visant à simuler des conditions de fortes pluies et d'inondations pour évaluer la résistance à l'eau des briques en terre exposées aux intempéries. Ces exemples illustrent la diversité des approches adoptées pour évaluer la résistance à l'eau des matériaux de construction à base de terre stabilisés.

En résumé, la nécessité de considérer d'autres aspects de la durabilité dans la recherche sur les matériaux de construction à base de terre, en mettant en évidence la diversité des approches méthodologiques utilisées pour évaluer la résistance à l'eau dans différentes études.

I.3.2 La stabilisation aux liants organiques

La stabilisation de la terre crue avec des bio-liants est une approche novatrice dans la construction durable, intégrant des matériaux tels que la paille et les fibres végétales pour améliorer les propriétés mécaniques et la résistance aux éléments. Ces liants renforcent la cohésion interne de la terre crue, réduisant sa sensibilité aux variations climatiques, notamment à l'humidité. Cette méthode présente des avantages environnementaux notables en utilisant des matériaux renouvelables et locaux, contribuant ainsi à réduire l'empreinte carbone de la construction. De plus, la stabilité accrue résultant de cette technique ouvre de nouvelles perspectives architecturales tout en respectant les principes du développement durable. Des recherches approfondies sont actuellement en cours pour évaluer la performance à long terme, la durabilité environnementale et les normes de construction liées à cette approche novatrice de la stabilisation de la terre crue.

I.3.2.1 Effet sur les résistances mécaniques

Le Tableau I.5 présente les résistances à la compression des BTC stabilisés avec des liants organiques.

Malgré la diversité des polymères organiques naturels tels que les polysaccharides, protéines et lipides, les recherches sur les bio-liants restent limitées, ne représentant qu'une fraction de la multitude de produits naturels disponibles. Dans la plupart des cas, l'utilisation de bio-liants s'accompagne de l'emploi d'agents d'activation. Par exemple, (Pinel et al.2017) [44]ont souligné la nécessité d'agents régulateurs tels que l'hexaméthaphosphate de sodium et le GDL en plus d'une source de calcium pour optimiser l'efficacité de l'alginate. De manière similaire, (Guerrieri.2012) [45]a expliqué que l'ajout d'un modificateur de pH, comme l'ammoniaque, est essentiel pour activer les propriétés collantes de la caséine.

Dans le cas de certains bio-liants tels que l'alginate et la caséine, l'utilisation d'agents d'activation est incontournable. Cependant, la complexité s'accroît lorsque ces liants sont mélangés avec des fibres ou même des liants minéraux tels que la chaux, rendant difficile l'identification des effets spécifiques des bio-liants. Globalement, l'augmentation de la résistance à la compression des sols avec l'ajout de bio-liants est souvent minime, mettant en évidence que l'intérêt principal de ces ajouts ne réside pas dans l'amélioration des performances mécaniques du matériau. Des études indiquent que même l'absence d'effet sur les résistances à la compression simple du matériau dans certains cas[46][47][48].

Tableau I.5 bibliographie sur les BTC stabilisées avec des bio-liants.[30].

Reference	Liants organiques	% liant	Activation	Fibres	Types	Élancement	FC(MPa)
(Guerrieri, 2012)		0%		-	BTC	n.m.	1,5
	Gluten	3%-5%	-				1.2-1.3
			5%-10% chaux				0.8-3
	Caséine	1%-10%	5%-10% chaux + 0,37%-0,75% Ammoniaque				1.3-7.5
(Galán-	Alginate	0%		0%			2.2

Marín et al., 2010)		19,5% (En solution, Concentration Non renseignée)	0,5% Lignum (résine de Guayacan)	0%, 0,25% et 0,50% de laine de mouton	BTC	1	3,8- 4,4
(Camões et al., 2012)	Huileusee de cuisine	0%	-	-	BTC/ Pisé	1	1.0
		1%	4% chaux vive (CaO)				2.5
			0,1% soude (NaOH), + 4% chaux vive (CaO)				2.9
(Sorgho et al., 2014)	(Décoction deosses de Parkia Biglobosa)	0%	-	-	BTC	1	2.0
		1.44%					2.1
(Yalleyand Manu, 2013)	Bouse de vache	0%	-	-	BTC	n.m.	4.6
		5%-30%		Bouse de vache			4.6-5.8

L'exploration des quatre grandes familles de polymères naturels, à savoir les polysaccharides, les protéines, les lipides, et d'autres molécules complexes, demeure relativement limitée malgré la vaste diversité de produits naturels existants. Dans la majorité des cas, l'utilisation de bio-liants s'accompagne de l'adjonction d'agents d'activation. Ainsi, une étude menée par (Guerrieri, 2012)[45] soulignent l'importance d'incorporer un modificateur de pH tel que l'ammoniaque pour exploiter les propriétés adhésives de la caséine.

Bien que l'utilisation d'agents d'activation soit indispensable pour certains bio-liants tels que l'alginat, la caséine, etc., la combinaison avec les liants minéraux et même les fibres tels que

la chaux complique l'identification des effets propres aux liants organiques. Globalement, l'amélioration de la résistance à la compression simple des sols due à l'ajout de bio-liants est minime, suggérant que l'intérêt principal de ces ajouts ne réside pas dans l'amélioration les performances mécaniques du matériau. Certaines études, notamment celles de (Yalley and Manu, 2013)[47], et (Sorgho et al., 2014)[48], indiquent même qu'ajouter des bio-liants n'a aucun impact sur les résistances à la compression simple du matériau en terre.

I.3.2.2 Effets sur la durabilité

Tout comme dans le contexte de la stabilisation avec des liants minéraux, la résistance à l'eau des briques reste la principale propriété étudiée dans les articles abordant les liants organiques. Sur treize études, neuf se penchent sur cette caractéristique. Cependant, à l'instar de la stabilisation aux liants minéraux, les procédures d'évaluation de la résistance à l'eau varient considérablement. Des approches quantitatives, telles que les résistances à la compression humide, la profondeur d'érosion par le Drip test, et l'absorption d'eau capillaire, sont utilisées, avec les résultats résumés dans le Tableau I.6.

Tableau I.6 la tenue à l'eau de la brique en terre compressé stabilisé avec des bio-liants .[30]

Reference	Liant (s) organique (s)	% liant	Activation	Fibres	Types	Absorption	Profondeur d'érosion (mm) par jet d'eau	FC humide (MPa)
(Guerrieri, 2012)		0%		-	BTC		60	
	Gluten	3%-5%	-				42-1	
			5%-10% chaux				11-0	
Caséine	1%-10%	5%-10% chaux + 0,37%-0,75% ammoniacale						
		0%	-			3,95 kg/(m ² .√h)		Disloqué

(Camões et al., 2012)	Huile usée de cuisine	1%	4% chaux vive (CaO) 0,1% soude (NaOH), + 4% chaux vive (CaO)	-	BTC/ pisé	0,05-0,07 kg/(m ² .√h)		0.6
(Yalleyand Manu, 2013)	Bouse de vache	0% 5%- 30%	-	- Bouse de vache	BTC	17% 20-10%		Disloqué 0.8-2.8

I.3.3 Conclusion

Nous pouvons conclure que l'évaluation de la résistance à l'eau des sols avec l'ajout de bio-liants repose principalement sur des méthodes courantes telles que l'absorption capillaire, la résistance à la compression humide et la méthode de jet d'eau. La méthode d'absorption capillaire, exprimée en pourcentage d'eau absorbée ou en $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{h})$, reste la méthode préférée, indiquant qu'un matériau résistant à l'eau présente une absorption capillaire réduite au fil du temps. La résistance à la compression humide, mesurée sur des échantillons immergés, permet d'évaluer la durabilité du matériau en présence d'humidité, bien que les matériaux non stabilisés puissent se désagréger lors de cette immersion. La méthode de jet d'eau, caractérisée par une érosion dynamique sous pression contrôlée, évalue la profondeur de dégradation à la fin de l'essai, avec certains auteurs tenant également compte de la perte de masse due à cette érosion. Malgré des variations dans les paramètres et les conditions d'essai selon les auteurs, une conclusion générale peut être tirée quant à l'amélioration globale de la résistance à l'eau des sols grâce à l'intégration de liants organiques.

Conclusion

En conclusion de ce chapitre sur l'état de l'art de la construction en terre crue, la recherche sur les bio-liants et la stabilisation des briques en terre comprimée avec des liants minéraux ou organiques révèle une diversité d'approches innovantes. L'exploration des bio-liants, tels que les polysaccharides, protéines et autres composés organiques, offre des perspectives prometteuses pour renforcer la durabilité des constructions en terre crue. Cependant, la variété des matériaux et des méthodes d'évaluation de la résistance à l'eau souligne la nécessité de normes unifiées et de recherches approfondies pour établir des références fiables. Concernant la stabilisation des briques en terre compressée, qu'elle soit réalisée avec des liants minéraux ou organiques, les résultats révèlent des avancées significatives. L'utilisation de liants minéraux comme la chaux améliore la résistance mécanique, tandis que les liants organiques, tels que la paille et les fibres végétales, introduisent des propriétés écologiques et une résistance aux éléments naturels. Néanmoins, les défis résident dans la standardisation des méthodes d'essai, la compréhension des interactions complexes entre les composants et la généralisation des résultats. En somme, la construction en terre crue, combinée à l'utilisation judicieuse de bio-liants et à la stabilisation avec des liants minéraux ou organiques, représente une voie prometteuse vers une construction plus durable et respectueuse de l'environnement, positionnant ce matériau comme un choix attractif pour des projets de construction responsables. La riche expérience millénaire dans son utilisation offre des perspectives prometteuses pour son application contemporaine, notamment dans le contexte de la brique de terre compressée (BTC). Cette étude aspire à contribuer à l'utilisation des matériaux locaux pour la fabrication des BTC stabilisées avec un bio-liant, ouvrant ainsi la voie à des pratiques de construction plus durables et innovantes. L'avenir de la construction en terre repose sur une approche holistique combinant la tradition avec la recherche scientifique, favorisant des solutions constructives éthiques et adaptées aux défis environnementaux actuels

CHAPITRE II : MATIERES ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

Introduction

Ce chapitre expose les matériaux et les méthodes d'essai appliquées au cours de cette recherche. Dans la première partie nous détaillerons les matériaux choisis pour cette étude, comprenant le sol utilisé dans la fabrication des briques en terre crue, qu'elles soient traitées ou non, ainsi que les liants minéraux et organiques retenus. Lors de la revue de la littérature, nous avons identifié une multitude de bio-liants ayant été utilisés pour améliorer les caractéristiques des matériaux en terre crue. Il est essentiel de prendre des décisions claires concernant le choix du bio-liant, en se basant sur des critères fondamentaux. Cette approche stratégique nécessite une évaluation minutieuse de la disponibilité locale des matériaux, des coûts associés à leur acquisition, ainsi que de leur impact sur la résistance à la compression simple des matériaux de construction.

La deuxième partie de ce chapitre décrit les procédures d'essai employées au cours de cette thèse de manière conventionnelle. Elle débute par la présentation de matériel de caractérisation utilisés dans le chapitre III pour la caractérisation géotechnique, chimique et minéralogique des sols utilisés dans cette étude. Ensuite, le processus d'extraction du bio-liant et les procédures de fabrication des échantillons stabilisés ou non seront exposés, de même que les procédures d'essai de performance mécanique et de résistance à l'eau des matériaux élaborés, dont les résultats seront détaillés dans le chapitre VI.

II.1 Matières premières

II.1.1 Le sol

Le sol exploité dans le cadre de cette recherche provient de Ben Djerrah. Le gisement de kaolin de Ben Djerrah est situé à une distance de 7 kilomètres au sud-ouest de la ville de Guelma, à proximité de la briqueterie de Benouhiba. Une autre source de ce matériau est l'argile de Ben Djerrah, qui a servi de matériau de base pour la construction de briques en terre cuite depuis les années quatre-vingt-dix du siècle précédent. La superficie occupée par la briqueterie de Benouhiba est estimée à environ une vingtaine d'hectares.

Nous avons prélevé le sol à cinq points comme indiqué dans la figure II.1. Nous avons caractérisé le sol à ces cinq points pour nous assurer qu'il s'agit du même sol (Figure II.1). Ensuite, nous avons mélangé le sol prélevé aux cinq points et l'avons utilisé pour notre étude. Les caractéristiques géotechniques et chimiques du sol de Ben Djerrah sont présentées dans le chapitre III.



Figure II.1 Vue par satellite de la briqueterie de Ben Djerrah et les 5 points du prélèvement du sol



Figure II.2 Gisement de Kaolin de Ben Djerrah

II.1.2 Le bio-liant

II.1.2.1 Choix du bio-liant

Avant d'entamer la caractérisation proprement dite, il est impératif de prendre des décisions éclairées quant au choix du bio-liant, en se basant sur des critères fondamentaux. Cette démarche stratégique implique une évaluation minutieuse de la disponibilité locale des matériaux (Tableau II.1), du coût associé à leur acquisition (Tableau II.2), ainsi que de leur impact sur la résistance à la compression simple des matériaux de construction (Tableau II.3).

Notre évaluation des bio-liants se concentre sur trois matériaux disponibles localement, à savoir la caséine, l'amidon et la gomme de caroube. Ces choix ont été guidés par la volonté de privilégier des ressources accessibles sur le plan local, contribuant ainsi à réduire l'empreinte carbone associée au transport et favorisant le développement économique au sein de la communauté. En examinant la caséine issue du lait, l'amidon provenant de sources végétales, et la gomme de caroube extraite des graines du caroubier, nous cherchons à évaluer non seulement leur impact sur le comportement de brique en terre, mais également à déterminer comment ces matériaux peuvent être intégrés de manière économiquement viable dans des projets locaux. Cette approche ancrée dans la disponibilité locale vise à promouvoir des

pratiques de construction durables et à répondre aux besoins spécifiques de chaque communauté.

- **Selon la disponibilité**

La disponibilité locale des bio-liants revêt une importance capitale, car elle influence directement la durabilité environnementale du processus de construction. Opter pour des matériaux facilement accessibles dans la région réduit non seulement l'empreinte carbone liée au transport, mais favorise également le développement économique local. De plus, cela contribue à renforcer la résilience des communautés en utilisant des ressources disponibles localement.

Tableau II. 1 La disponibilité locale des matériaux choisis.

	La production locale de la matière première/année	La production locale du bio-liant (Tonne/année)	Consommation/production (%)
Caséine	Lait : 3,5 milliards de litres.[49]	2	100%
Amidon	Maïs ~ 13000 tonnes	500	100%
Gomme de caroube	Graine de caroube ~3380 tonnes.	0.5	00%

- **Selon le coût**

La considération du coût constitue un paramètre incontournable dans le choix du bio-liant. Les solutions durables ne doivent pas seulement être écologiques, mais également économiquement viables. Une analyse approfondie des coûts associés à l'extraction et à la transformation des bio-liants permet de garantir une gestion financière judicieuse du projet de construction, tout en encourageant l'adoption généralisée de pratiques durables.

Tableau II. 2 Le coût des matériaux choisis.

	Le coût estimé par Kg
Caséine	14000 DA
Amidon	300 DA
Gomme de caroube	4000 DA

- **Selon leur effet sur la résistance à la compression simple**

L'évaluation de l'effet du bio-liant sur la résistance à la compression simple des matériaux joue un rôle prépondérant dans la qualité et la durabilité des structures construites. La résistance mécanique des matériaux constitue un indicateur clé de leur performance structurelle, et le choix du bio-liant doit être aligné sur l'objectif d'atteindre des normes de qualité optimales.

Tableau II. 3 L'effet des matériaux choisies sur la résistance à la compression du sol.

Matériau	Pourcentage du bio-liant (%)	Résultats (MPa)
Sol naturel	00	0.8
Sol + Caséine	1 (28 jours)	1.2
Sol + Amidon de maïs	1 (28 jours)	0.8
Sol + Gomme de Caroube	1 (28 jours)	1.6

II.1.2.1.1 Évaluation du bio-liant en fonction des critères de sélection.

Le choix du bio-liant parmi les trois options - caséine, amidon, et gomme de caroube - a été soigneusement examiné en tenant compte de critères cruciaux tels que la disponibilité, le coût, et l'impact sur la résistance à la compression.

Sur le plan de la disponibilité, la caséine et l'amidon présentent des défis significatifs, car ils sont largement consommés par la population à hauteur de 100%. En revanche, la gomme de caroube se distingue comme un choix judicieux en raison de l'abandon relatif des graines de caroube.

En ce qui concerne le coût, la caséine se positionne comme l'option la plus onéreuse en raison de sa matière première, le lait. À l'inverse, la gomme de caroube et l'amidon sont plus économiques en raison d'une extraction plus aisée.

L'impact sur la résistance à la compression a été un facteur déterminant dans notre évaluation. Les résultats obtenus avec la caséine et la gomme de caroube se sont avérés impressionnants, démontrant des effets significatifs, tandis que l'amidon n'a presque aucun impact.

En conclusion, basé sur une analyse approfondie et un tableau d'évaluation, notre choix privilégié pour le bio-liant est la gomme de caroube. Sa disponibilité, son coût abordable, et son effet positif sur la résistance à la compression en font une option optimale pour les applications envisagées.

II.1.2.2 Identification du bio-liant utilisé (la gomme de caroube).

La matière première utilisée pour notre traitement est constituée des graines de caroube, presque 100 kilogrammes que nous avons récupérés de la wilaya de Bejaïa, Algérie. Il est à noter que nous avons procédé à l'extraction de la gomme de caroube nous-mêmes, directement dans notre

laboratoire de génie civil et d'hydraulique. Cette démarche, détaillée dans le chapitre II correspondant de notre étude, a permis d'obtenir la substance nécessaire à notre recherche.

II.1.2.3 Utilisation des graines de caroube

Les extraits issus des graines de caroube, grâce à leurs bienfaits curatifs, sont largement employés, en particulier dans les domaines de la beauté et de la préservation des denrées alimentaires. Un résumé des diverses utilisations des extraits de la graine de caroube est présenté dans le tableau II.4.

Tableau II. 4 L'utilisations de la graine de caroube dans les domaines industriels.

Applications	Dérivés	Produits	Références
Alimentaire	Endosperme		
	Gomme de graines de caroube purifiée (GGC) (ou poudre d'endosperme purifié)	E410 : Additif alimentaire en industrie agroalimentaire (agent gélifiant, Liant, agent d'adhésion..)	[50]
Médicinales	GGC de moindre pureté	<ul style="list-style-type: none"> • Pharmaceutiques (pommade, anticoagulant) • Cosmétiques (Mousses, gels...) • Textiles (Épaississant de couleurs) • Papier (produits de flottaison, épaississant) • Chimiques (couleurs, pesticides) • Explosifs (agent absorbant de l'humidité) 	[51]
Industrielles	Germe		
	Farine de germe	L'alimentation diététique humaine (couper la sensation de faim lors des régimes pour mincir en bonne santé)	[52]
	Farine de germe	Ingrédient potentiel dans les aliments dérivés des céréales	

		pour les personnes cœliaques	[53]
--	--	------------------------------	------

II.2 Procédures expérimentales

II.2.1 Procédure de l'extraction de la gomme de caroube.

Dans les recherches spécialisées, la méthode prédominante pour extraire la gomme de caroube repose sur une approche acide, communément désignée comme la macération des graines dans de l'acide sulfurique dilué, notamment pour le processus de décortiquage des graines. Il convient de noter qu'une alternative existe, consistant à décortiquer les graines par voie aqueuse, offrant ainsi une diversité de techniques d'extraction.

Dans notre étude, nous avons utilisé un protocole détaillé pour l'extraction de la gomme brute [55]. L'approche expérimentale adoptée vise à isoler la cuticule et le germe de l'endosperme des graines de caroube. Les différentes étapes de cette procédure sont expliquées comme suit :

- **Décortiquage par voie acide :**

Pour obtenir une gomme de haute qualité présentant une teinte blanchâtre, une technique de décortiquage a été mise en œuvre. Cette méthode implique la macération de 100 g de graines dans une solution d'acide sulfurique dilué (60/40 ml) H_2SO_4/H_2O pendant 60 minutes à $60^\circ C$, effectuée dans un bain-marie d'eau préchauffée tout en assurant une agitation régulière (Voir figure II.3).



Figure II.3 Photographies des différentes étapes de décortiquage des graines : (a : macération dans l'acide sulfurique, b : acide sulfurique, c : carbonisation).

- **Lavage et trempage**

Une procédure de rinçage approfondie à l'eau est mise en œuvre, suivie d'une action frottement visant à éliminer la cuticule carbonisée. Par la suite, les graines décortiquées sont immergées dans de l'eau distillée pour une période d'une nuit entière, favorisant ainsi le gonflement de l'endosperme et simplifiant sa séparation manuelle du germe (Figure II.4).



Figure II. 4 Photographies des différentes étapes de décortilage des graines : (a : macération dans l'acide sulfurique, b : acide sulfurique, c : carbonisation).

Les endospermes ont subi un processus de lavage suivi d'un séchage dans une étuve à 105°C, assurant la stabilisation de la masse sur une période de 4 à 5 heures. Par la suite, ils ont été broyés à l'aide d'un broyeur de marque Biolomix RRH-400A pour obtenir ce que l'on désigne sous le nom de gomme de caroube (Figure II.5).



Figure II. 5 Broyage de l'endosperme pour obtenir de la Gomme de caroube.

II.2.2 Caractérisation géotechnique

II.2.2.1 Analyse granulométrique

La granulométrie exerce une influence fondamentale sur les propriétés physiques et mécaniques du sol, ainsi que sur toutes les caractéristiques liées à la teneur en eau et à ses variations (compacité, plasticité, portance, capacité de rétention, perméabilité, capillarité). Deux essais, conformes aux normes [54], [55], sont utilisés pour déterminer la composition granulaire du sol : le tamisage la sédimentométrie. L'analyse granulométrique implique la séparation des grains agglomérés d'une masse définie de matériau par brassage sous l'eau. Le sol est ensuite fractionné après séchage à l'aide d'une série de tamis, et le refus cumulé sur chaque tamis est pesé successivement. La masse de refus cumulé est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon analysé.

La fraction fine, inférieure à $80\mu\text{m}$, est utilisée pour l'essai de sédimentométrie, qui offre une distribution des tailles des particules fines en fonction de leur vitesse de décantation liée à leurs dimensions. La loi de Stokes, appliquée aux éléments du sol, permet de déterminer les diamètres équivalents des particules. Les particules passant $80\mu\text{m}$, séparées du reste du sol par tamisage, sont suspendues dans de l'eau avec un dé-floculant. Ces particules décantent à différentes vitesses en fonction de leur taille, et la distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de la densité la solution qui change au cours de la décantation.



Figure II. 6 Tamis dans l'ordre décroissant



Figure II. 7 Tamisage du sol étudié



Figure II. 8 Matériel utilisé pour la sédimentation

II.2.2.2 Détermination des limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont déterminées sur la fraction inférieure à 400 μm du sol conformément à la norme [56].

La figure II.9 illustre graphiquement comment la consistance d'un sol fin évolue en fonction des changements de teneur en eau, en mettant en évidence les limites de liquidité, de plasticité et de rétrécissement associées.

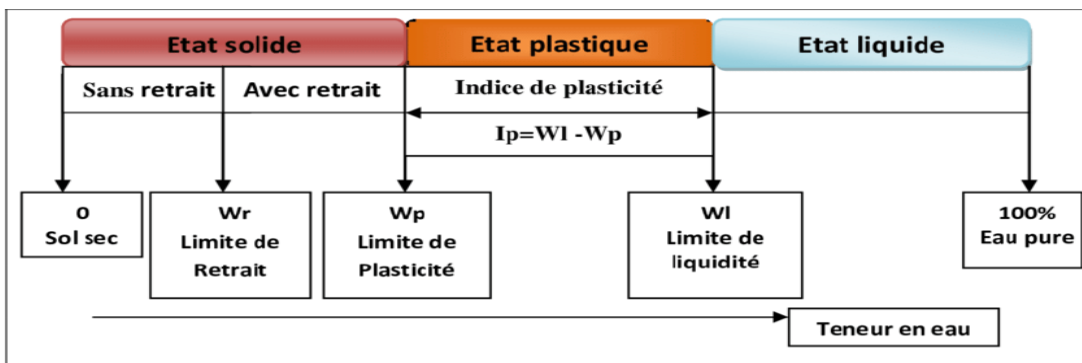


Figure II. 9 Variation du diagramme de consistance d'un sol fin en relation avec sa teneur en eau.

➤ Détermination de la limite de liquidité (W_L)

La teneur en eau à laquelle un sol remanié atteint le point de transition entre ses états liquide et plastique est, par définition, la limite de liquidité.

Pour déterminer cette limite, on utilise un échantillon d'environ 70g de cette fraction du sol, préalablement humidifié et étalé en couches successives dans une coupelle de Casagrande (Figure II.10) afin d'éviter la capture de bulles d'air. La pâte ainsi formée est divisée en deux à l'aide d'un outil à rainurer (Figure II.11), puis délicatement montée sur l'appareil à chocs. En tournant la manivelle, une série de chocs est appliquée jusqu'à ce que la rainure se referme sur

un centimètre. Le nombre de coups nécessaire est noté, et un échantillon de la pâte sur la partie refermée est prélevé pour mesurer la teneur en eau.

Après vidange de la coupelle, la pâte est mélangée et étalée pour un léger séchage. Cette opération est répétée pour obtenir une série de quatre à cinq points, avec un nombre de chocs compris entre 15 et 35 (Figure II.12). Une fois les teneurs en eau correspondantes obtenues, une droite d'approximation est tracée sur un graphique semi-logarithmique représentant la teneur en eau en fonction du nombre de coups. La limite de liquidité est ainsi définie comme la teneur en eau du sol nécessitant 25 coups pour une fermeture de 1 cm.



Figure II. 10 Matériel utilisé dans l'essai de Limite de liquidité.

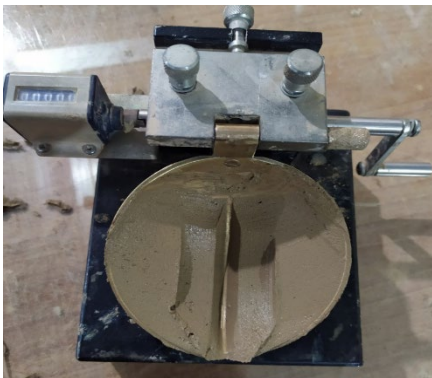


Figure II. 11 Pâte formée et divisée en deux



Figure II. 12 Sol se referme sur une longueur de 13 mm après être tombé plusieurs fois

➤ Détermination de la limite de plasticité (W_p)

À partir du mélange élaboré antérieurement, une petite boulette est façonnée. Cette boulette est ensuite délicatement roulée à la main sur une surface plane, formant ainsi un cylindre qui s'amincit progressivement jusqu'à atteindre un diamètre de 3 mm

La cadence du mouvement manuel doit être constante, et l'amincissement du cylindre doit se dérouler de manière ininterrompue dans le sens de sa longueur. Lorsque le cylindre atteint le

diamètre spécifié de 3 mm avec une tolérance de $\pm 0,5$ mm, il doit mesurer environ 10 cm de long et ne doit présenter aucune cavité.

La détermination de la limite de plasticité intervient au moment où des fissures apparaissent simultanément sur le cylindre atteignant un diamètre de $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, et ce, lorsque le cylindre est soulevé légèrement. Si aucune fissure n'est visible, le cylindre est replacé dans la boulette. Ensuite, la pâte est mélangée de nouveau et légèrement séchée, puis l'opération est reprise. Une fois les fissures observées, la partie centrale du cylindre est prélevée pour mesurer la teneur en eau. Un deuxième essai est réalisé sur une nouvelle boulette.

La limite de plasticité, notée W_P , représente la teneur en eau d'un cylindre de sol qui se fissure lorsqu'il atteint un diamètre de $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$

➤ **Détermination de l'indice de plasticité (I_P)**

C'est la plage de teneur en eau du sol comprise entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. Il se calcule par la relation suivante :

$$I_P = W_L - W_P$$

II.2.2.3 Limite de Retrait linéaire

Le retrait linéaire représente la teneur en eau conventionnelle pondérale de dessiccation d'un sol remanié, en dessous de laquelle la longueur de l'échantillon est supposée ne plus varier. Cette valeur est déterminée conformément à la norme [57]. Après le séchage de l'échantillon pendant plusieurs jours dans un endroit protégé du courant d'air, la longueur finale est mesurée.

Le moule utilisé pour la fabrication des éprouvettes est un demi-cylindre de 140 mm de long et de 12,5 mm de rayon, comme illustré à la (Figure II.13). Cet essai permet de mesurer la limite du retrait linéaire du sol (Figure II.14), offrant ainsi des indications sur les propriétés plastiques du sol argileux.



Figure II. 13 Matériel utilisé dans l'essai de Limite de Retrait linéaire.



Figure II. 14 Échantillon de limite de retrait Après avoir atteint la limite de retrait linéaire maximale.

II.2.2.4 Valeur au bleu de méthylène du sol

L'activité des argiles présentes dans un sol reflète l'importance de leur rôle dans le comportement global du sol en présence d'eau. Cette activité est influencée par la proportion d'argiles dans le sol et par leurs surfaces externes et internes, qui témoignent de la nature minéralogique spécifique de ces argiles. La valeur au bleu de méthylène est une mesure de la capacité d'absorption d'eau des sols sur la fraction inférieure à 5 mm d'un sol, conforme à la norme [58].

Pour réaliser le test, une masse variant entre 30 g et 60 g de cette fraction de sol est suspendue dans 500 ml d'eau déminéralisée. Cette suspension est ensuite soumise à une agitation mécanique à 700 tr/min pour assurer une dispersion complète de l'argile. La vitesse d'agitation est ensuite réduite à 400 tr/min, puis on introduit de 5 cm³ à 10 cm³ de la solution de bleu de méthylène ayant une concentration de 10g/l dans la suspension, en fonction de l'argilosité.

L'essai débute une minute plus tard en déposant une goutte de la suspension à l'aide d'une baguette de verre sur du papier filtre maintenu horizontalement. L'essai est considéré comme positif lorsqu'une auréole périphérique bleu clair, d'une largeur millimétrique, apparaît dans la zone humide de la tâche. Dans le cas contraire, le test est répété en ajoutant progressivement 5 cm³ à 10 cm³ de bleu de méthylène (quantité à diminuer graduellement vers la fin de l'essai) dans la suspension. Le dépôt des gouttes sur le papier filtre est réalisé en décrivant un cercle concentrique (voir Figure II.16).



Figure II. 15 Équipement pour l'essai



Figure II. 16 Taches de bleu de méthylène.

La valeur de bleu de méthylène du sol (VBS) s'obtient par les relations suivantes :

- Masse de bleu introduite B (g):

$$B=V \times 0,01$$

Avec V (l) le volume total de solution de bleu de méthylène (de concentration 10 g/l) introduite dans la suspension.

- La valeur au bleu de méthylène du sol (VBS) :

Dans le cas de notre matériau ($D_{max} < 5mm$), l'expression du résultat est :

$$VBS = \frac{B}{\frac{m_h}{1+w}} \times 100$$

Avec m_h (g) la masse de sol utilisé pour l'essai et w sa teneur en eau initiale déterminée en parallèle de l'essai.

VBS est exprimée en grammes de bleu de méthylène pour 100 g de matériau sec. Figure II.17 donne les VBS pour différents types de sols.

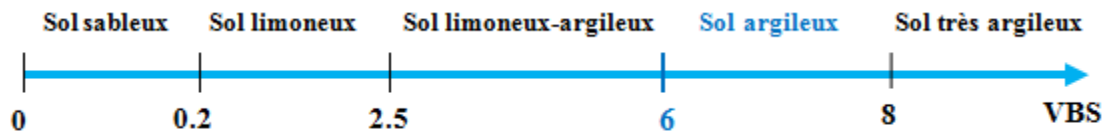


Figure II. 17 Seuils de VBS correspondant aux différents types de sols.

II.2.2.5 Détermination de l'Optimum Proctor Normal

Dans le domaine de la construction en terre crue compactée (BTC, pisé, etc.), les essais Proctor normal et modifié sont couramment utilisés pour évaluer les propriétés du matériau en termes de masse volumique sèche et de résistance à la compression simple non confinée. Ces essais visent à caractériser le processus de compactage en déterminant deux paramètres essentiels : la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale. Ces paramètres sont influencés par l'énergie de compactage appliquée pendant l'essai. L'essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié donnent lieu à des paires de valeurs distinctes :

WSPO (ou WMPO) : Teneur en eau à l'optimum Proctor Normal (ou Modifié).

$\rho_{d_{max}SPO}$ (ou $\rho_{d_{max}MPO}$) : Masse volumique sèche à l'optimum Proctor Normal (ou Modifié).

Dans notre étude, L'étude pratiquée en laboratoire pour caractériser les sols compactés est généralement basée sur l'essai Proctor, selon la norme [54].

II.2.3 Caractérisation chimique et minéralogique

II.2.3.1 La teneur en matière organique

La procédure de mesure de la teneur en matière organique par calcination selon la norme P94-047 implique plusieurs étapes clés, garantissant une approche méthodique et reproductible.

Préparation des Échantillons :

- Commencer par prélever des échantillons représentatifs du sol de la zone d'étude. Ces échantillons doivent être manipulés avec soin pour éviter toute contamination externe.
- Séchage des Échantillons : Les échantillons prélevés sont soumis à un processus de séchage, éliminant ainsi l'humidité du sol. Cette étape préliminaire est cruciale pour obtenir des résultats de calcination précis.
- Calcination des Échantillons : Les échantillons séchés sont ensuite placés dans un four à des températures élevées. La calcination permet de brûler la matière organique présente dans le sol, ne laissant que les résidus minéraux. La température et la durée de calcination sont définies par les spécifications de la norme [59].
- Pesée des Résidus : Après la calcination, les résidus minéraux sont pesés avec précision. Cette pesée permet de déterminer la masse des composants inorganiques restants, excluant la matière organique brûlée lors du processus.
- Calcul de la Teneur en Matière Organique : La teneur en matière organique est calculée en comparant la masse initiale des échantillons avant calcination avec la masse des résidus minéraux obtenus après le processus. La formule spécifique est généralement définie par la norme [59].

Afin d'assurer la robustesse de notre évaluation, trois essais distincts ont été conduits conformément à la norme [59]. Chacun de ces essais a suivi les étapes préalablement définies, aboutissant à trois ensembles de données. Pour atténuer les variations potentielles entre les essais individuels, nous avons pris la précaution de calculer la moyenne des valeurs obtenues.



Figure II. 18 Échantillon du sol après la calcination.

II.2.3.2 Le pH du sol

Dans le cadre de notre étude, la norme (NF ISO 10390) a été choisie comme référence pour la détermination du pH du sol [60]. Cette norme revêt une importance cruciale, notamment en raison de son rôle prépondérant dans l'évaluation de l'acidité du sol. La sélection rigoureuse de cette norme découle de la nature de notre recherche, qui envisage l'utilisation d'un bio-liant. Il devient ainsi impératif de mesurer avec précision le pH du sol, car un environnement trop acide pourrait fortement influencer la structure et l'efficacité du bio-liant. En optant pour la norme [60], nous nous assurons d'une méthodologie normalisée, essentielle pour interpréter de manière fiable les résultats de notre étude.

La mise en œuvre de l'essai selon la norme [60] suit un protocole méticuleux. Dans un premier temps, des échantillons représentatifs du sol de la zone d'étude sont prélevés et préparés. Une suspension aqueuse est ensuite élaborée en mélangeant soigneusement le sol avec une solution tampon (Figure II.19). L'utilisation d'un pH-mètre calibré permet alors de mesurer directement le pH de la suspension (Figure II.20). Ces étapes, intégrées dans une procédure normalisée, garantissent la reproductibilité des résultats et la fiabilité des données obtenues. Ces étapes sont visuellement décrites dans les figures suivantes, fournissant ainsi une représentation graphique détaillée de la procédure normalisée suivie pour déterminer le pH du sol dans le contexte de notre recherche.

Pour accroître la robustesse de notre évaluation, quatre essais distincts ont été conduits conformément à la norme [60]. Chacun de ces essais a suivi les étapes préalablement définies, aboutissant aux trois ensembles de données. Afin d'atténuer les variations potentielles entre les essais individuels, nous avons pris la précaution de calculer la moyenne des valeurs obtenues. Cette approche méthodique renforce la validité et la représentativité de nos résultats, assurant une évaluation plus précise du pH du sol.

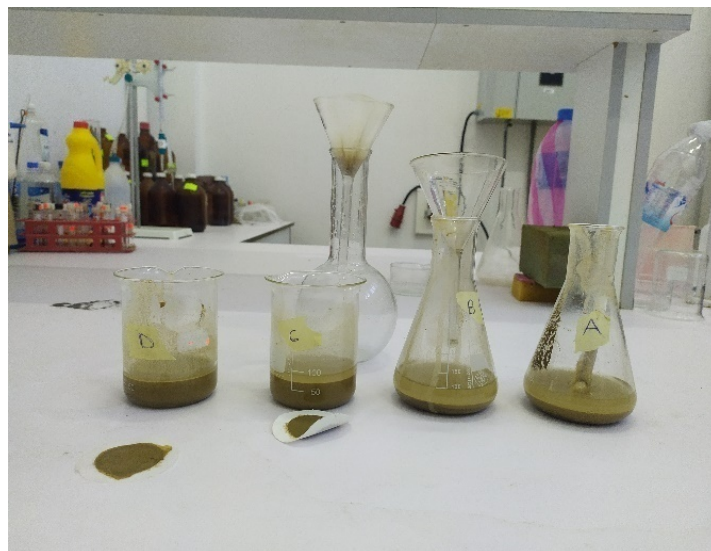


Figure II. 19 Le mélange du sol avec la solution tampon.

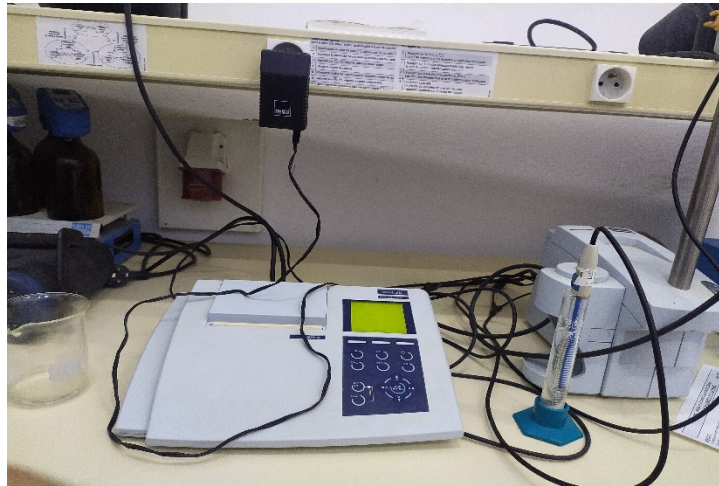


Figure II. 20 Le PH-mètre utiliser pour la mesure de PH du sol.

II.2.3.3 Diffraction des Rayons X (DRX)

L'essai de diffraction des rayons X (DRX) effectué sur le sol de Ben Djerrah, dans le cadre de nos recherches visant à approfondir notre compréhension des propriétés du sol local. Cette démarche a été conduite au moyen d'un diffractomètre D8 Advanced, opérant à une tension de 40 kV et un courant de 40 mA, au laboratoire de recherche (Université Mohamed Khider de Biskra). Notre objectif principal en réalisant cet essai était d'acquérir une connaissance approfondie de la composition cristalline et minéralogique de notre sol, dans le but de mieux appréhender ses caractéristiques géotechniques spécifiques.

II.2.4 Confection des éprouvettes

Toutes les éprouvettes testées ont été compactées selon le mode de compactage statique à l'aide de la presse UNIFRAME à une vitesse de 20 mm/min (Figure II.21). Deux types d'éprouvettes ont été confectionnées:

- Des éprouvettes cylindriques de diamètre de 77 mm et une hauteur de 154 mm pour les essais de compression simple et les essais de durabilité (Figure II.21).
- Des éprouvettes parallélépipédiques 21.75 cm * 14 cm * 9 cm pour les essais de traction par flexion 3 points (Figure II.22).

Le protocole de préparation des éprouvettes est le suivant :

- Initialement, le sol naturel a été séché et mélangé aux liants secs selon les différentes formulations présentées dans le Tableau IV.1. Le processus de mélange est poursuivi jusqu'à l'obtention d'un mélange uniforme.
- Ensuite, la quantité d'eau qui correspond équivalente à la teneur en eau optimale du Proctor modifié a été ajoutée immédiatement au mélange.
- Après malaxage, le mélange requis a été pesé et placé dans des moules et statiquement compactés en deux couches identiques pour atteindre la masse volumique sèche maximale du mélange de sol non amendé ($1,87 \text{ g/cm}^3$). Le démoulage se fait immédiatement et les éprouvettes sont soigneusement scellées avec un plastique épais et stockées dans une chambre de climatique à $22 \pm 2 \text{ }^\circ \text{C}$.

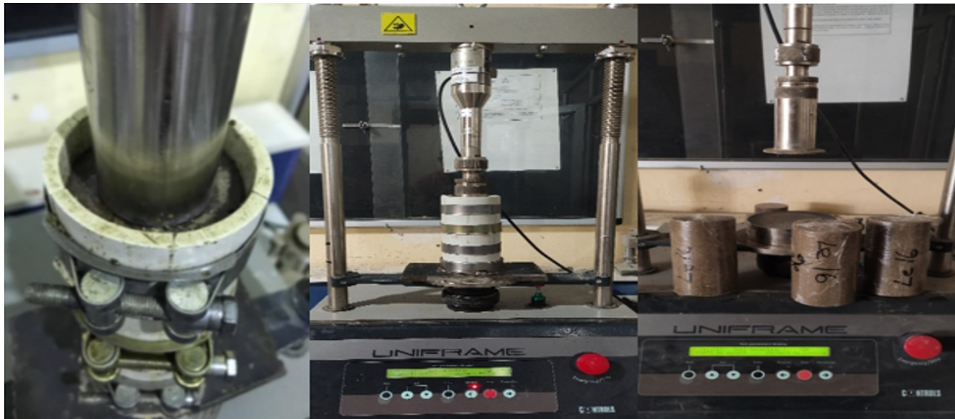


Figure II. 21 Le processus de compactage statiques des éprouvettes cylindriques avec la machine UNIFRAME



Figure II. 22 Les éprouvettes parallélépipédiques et le moule de confection

II.2.5 Essais de résistance mécanique

II.2.5.1 Essai de compression simple non confinée

Afin d'évaluer la résistance à la compression à l'état sec, les échantillons d'éprouvettes subissent un essai de compression simple. Cette évaluation est réalisée sur une machine de compression UNIFRAME-CONTROLS (Figure II.23) , équipée d'un capteur de force d'une capacité de 50 kN, avec une vitesse de chargement de (1 mm/min), conformément à la norme [61].

Les éprouvettes de sol naturel ou de sol traité sont placées entre les deux plateaux parallèles de la presse. Ensuite, La force maximale subie par l'éprouvette est enregistrée.

La résistance à la compression simple est calculée ensuite selon l'équation suivante :

$$R_c = \frac{F}{A_c}$$

Où :

- R_c (MPa): résistance à la compression simple.
- F (kN): force maximale de compression.

- A_c (cm²) : aire de la section transversale de l'éprouvette.



Figure II. 23 Essai de compression non-confiné sur un éprouvette cylindrique.

II.2.5.2 Essai de traction par flexion 3 points

Généralement, la faible résistance à la traction des briques en terre comprimée s'explique par le fait que les ouvrages construits avec ce matériau sont principalement conçus pour résister à des forces de compression. En cas de nécessité d'évaluation de la résistance à la traction, on a recours à des essais indirects, telle que la flexion en trois points. Le dispositif utilisé pour caractériser cette propriété est composé d'un piston supérieur, sur lequel est fixé un capteur de force et un comparateur de déplacement, tandis que le piston inférieur supporte l'éprouvette. Pendant l'essai, le piston inférieur monte avec l'éprouvette jusqu'à la mise en contact avec le piston supérieur. À partir de ce moment, le capteur de force enregistre les efforts exercés sur l'éprouvette. La mesure de la résistance à la traction est calculée ensuite selon l'équation suivante :

$$\sigma_t = \frac{3F_t L}{2bh^2}$$

- σ_t est la contrainte de flexion en MPa (Méga-pascals)
- F_t est la force appliquée en kilo Newtons (kN),
- L est la portée entre les supports en centimètres (cm),
- b est la largeur de l'éprouvette en centimètres (cm),
- h est la hauteur de l'éprouvette en centimètres (cm).

La configuration de cet appareil d'essai est illustrée dans la Figure II.24.

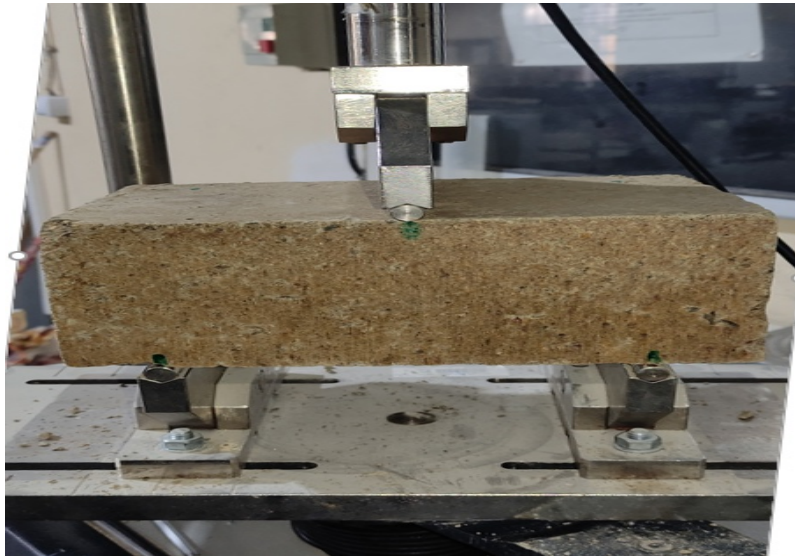


Figure II. 24 Essai de flexion 3 points.

II.2.6 Les essais de durabilité

Les essais de durabilité à l'érosion par l'eau des briques en terre comprimée revêtent une importance cruciale dans l'évaluation de la performance et de la résistance à l'eau à long terme de ces matériaux de construction. L'érosion par l'eau est un processus naturel susceptible d'affecter les structures exposées aux intempéries, notamment celles en terre comprimée utilisées dans la construction. Ces essais permettent de simuler les conditions environnementales réelles, évaluant la capacité des briques à résister à l'usure causée par l'impact des gouttes de pluie et des écoulements d'eau. Les constructions en terre crue non stabilisée présentent souvent l'inconvénient de ne pas résister de manière optimale à l'eau, rendant les essais de durabilité d'autant plus cruciaux. Face à cette vulnérabilité potentielle, ces évaluations deviennent impératives afin de pallier les limitations inhérentes aux matériaux non traités. En comprenant la réaction des briques en terre crue à l'érosion, on peut identifier les ajustements nécessaires dans la formulation des mélanges ou l'application de traitements de stabilisation pour renforcer leur résistance aux conditions extérieures, assurant ainsi des constructions durables et adaptées aux exigences environnementales.

C'est dans cette optique de garantir la résistance à l'eau des briques en terre comprimée que notre cadre de recherche a inclus deux essais spécifiques, à savoir le Drip test et le Dip test.

II.2.6.1 Essai de Drip test

L'objectif principal du test de goutte à goutte est d'évaluer la durabilité des matériaux terreux face à l'érosion provoquée par les précipitations. Les essais ont été réalisés conformément aux normes [14], [62]. Selon ces normes, une mèche textile de 16 mm de large est utilisée pour créer des gouttes d'eau, le diamètre de la goutte d'eau étant d'environ 6 mm et le nombre de gouttes d'environ 14 gouttes/min. En fonction du type de mèche utilisée, la quantité totale d'eau écoulee (volume) est d'environ 100 ml, correspondant à une durée variant de 20 à 60 minutes. La hauteur de chute de 400 mm est en relation avec la surface inclinée (27°) de l'échantillon (Figure II.24). Cependant, au lieu d'utiliser une mèche, nous avons adopté la méthode proposée par d'autres chercheurs [8], [63]–[65].

Un réservoir constitué d'une bouteille inversée équipée d'une valve de précision (Figure II.25). Cette valve, fixée au bouchon fermé de la bouteille, permettant un contrôle raisonnable de la fréquence et du diamètre des gouttes d'eau. Le réservoir est monté sur un portail de support en bois au-dessus de l'échantillon test. La hauteur hydraulique est constante et imposée par le réservoir. L'échantillon est placé sur un support inclinable ajustable dans un panneau de bois, et la hauteur hydraulique est constante et imposée par le réservoir. Pour contrôler le diamètre des gouttes d'eau désiré, l'échantillon est positionné sur un support inclinable ajustable dans un bac en bois en aval. Pendant le test, la profondeur de l'érosion causée par l'impact des gouttes à la surface de l'échantillon est mesurée avec un pied à coulisse numérique de précision toutes les 15 minutes (Figure II.25). Pour valider ce dispositif de test, nous avons ajusté la fréquence des gouttes à 14 gouttes/min (en moyenne) pour écouler 100 ml d'eau sur une période d'environ 20 à 60 minutes.

Dans ce test, la performance des matériaux de sol stabilisés par biopolymères a été comparée à celle du sol non traité. Pour cette expérience, des échantillons ont été testés sous forme de cylindres (diamètre de 77 mm et longueur de 100 mm). Les tests d'érosion par goutte ont ensuite été réalisés sur des échantillons durcis pendant 7 et 28 jours respectivement. Au total, trois combinaisons d'échantillons ont été sélectionnées pour cette étude : non traité, 1 pour cent et 2 pour cent de gomme de caroube ; Un total de 15 échantillons a été testés dans le cadre de cette recherche.



Figure II. 25 Vue générale de l'équipement pour le test d'érosion par goutte.

II.2.6.2 Essai Dip test

Le test d'immersion, selon la norme [66], évalue la résistance des matériaux terreux aux effets érosifs de l'immersion dans l'eau. Ce test vise à simuler l'inondation soudaine ou l'immersion d'un matériau terreux dans l'eau et constitue clairement un test très rigoureux pour un matériau non traité. Comme pour les autres tests, des essais d'immersion ont été réalisés sur du sol non

traité, ainsi que sur des briques stabilisées avec de la gomme de caroube comme illustré dans la (Figure II.26). Avant le test, la masse de l'échantillon a été enregistrée. Les briques ont été placées dans une pince et abaissées de 10 cm dans l'eau pendant 10 minutes. Après ce laps de temps spécifié, la brique a été retirée du bain d'eau et laissée sécher à 40 °C pendant 24 heures. Elle a ensuite été maintenue dans des conditions atmosphériques pour refroidir et s'équilibrer avec les conditions avant que sa masse finale ne soit mesurée. La perte de masse a ensuite été calculée à partir des différences entre les masses initiale et finale mesurées avec une balance de laboratoire. Les résultats présentés ici sont les moyennes de trois échantillons répliqués.



Figure II. 26 Configuration de test pour les essais d'immersion.

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a établi le cadre expérimental fondamental de la thèse, mettant en évidence les choix cruciaux en matière de matériaux et de procédures d'essais. Le sol provenant de la briqueterie de Ben Djerrah a été sélectionné en raison de son utilisation répandue dans la fabrication de briques en terre cuite et de sa riche teneur en argile, des caractéristiques qui le rendent un candidat idéal pour les briques en terre comprimée.

L'étude expérimentale a également inclus l'extraction du bio-liant, soulignant ainsi l'approche holistique adoptée pour la recherche du liant organique le plus efficace. Les procédures de caractérisation du sol ont été minutieusement détaillées, soulignant leur grande importance dans la classification du sol et la vérification de sa conformité en tant que matériau de base pour la fabrication des briques en terre comprimée, un sujet qui sera exploré en détails dans le chapitre III.

En outre, nous exposerons les essais mécaniques tels que la compression simple, la traction par flexion en trois points, ainsi que les essais de durabilité.

CHAPITRE III :
CARACTERISATION ET
VERIFICATION DU SOL
CONFORMÉMENT AUX NORMES
DE BTC.

Introduction

La caractérisation géotechnique du sol, associée à une classification précise, représente une étape importante dans la préparation de matériaux de construction durables et performants, notamment pour la fabrication de briques de terre compressée. Ce chapitre est dédié à l'exploration en détails des résultats des essais de caractérisation du sol et de classification, suivis d'une vérification approfondie conformément aux normes en vigueur pour l'utilisation du sol en tant que matière première dans la construction de briques de terre compressée.

La première partie de ce chapitre mettra en lumière les résultats des essais de caractérisation géotechnique du sol. Ces essais, incluant des analyses de granulométrie, de limites d'Atterberg et d'autres paramètres géotechniques, visent à fournir une compréhension approfondie des propriétés intrinsèques du sol. Une attention particulière sera accordée à la classification du sol, permettant de regrouper les sols similaires en catégories définies en fonction de leurs caractéristiques géotechniques.

Dans la deuxième partie, nous aborderons la vérification du sol en relation avec les normes spécifiques nécessaires à la fabrication de briques de terre compressée. Les résultats des essais de granulométrie seront évalués pour garantir la distribution appropriée des particules dans le sol. Les limites d'Atterberg seront scrutées pour s'assurer que le sol présente des propriétés plastiques adéquates pour la fabrication des briques, et les essais de compactage permettront de confirmer la densité optimale pour garantir la solidité structurelle des briques.

Cette approche méthodique, divisée en deux parties distinctes, permettra d'assurer que le sol destiné à la fabrication de briques de terre compressée répond aux normes rigoureuses nécessaires pour garantir la qualité, la durabilité et la performance des structures construites avec ce matériau particulier. En intégrant ces résultats, nous aspirons à contribuer au développement de pratiques de construction écologiques et efficaces dans le contexte des briques de terre compressée.

III.1 Caractérisation du sol

La caractérisation du sol de Ben Djerrah constitue une étape fondamentale de notre étude, visant à comprendre les propriétés géotechniques de cette région spécifique. Dans les paragraphes suivants, nous détaillerons les résultats des essais de caractérisation, mettant en lumière des paramètres tels que la granulométrie, la plasticité et d'autres propriétés clés du sol. Cette analyse approfondie nous permettra de mieux appréhender la composition du sol de Ben Djerrah, jetant les bases nécessaires pour une prise de décision claire dans le contexte de projets de construction locaux.

III.1.1 Caractérisation géotechnique des sols**III.1.1.1 Analyse granulométrique**

La figure III.1 présente la courbe granulométrique complète du sol de Ben Djerrah (BD), obtenue par tamisage par voie humide et par sédimentation, conformément aux normes [55],[67].

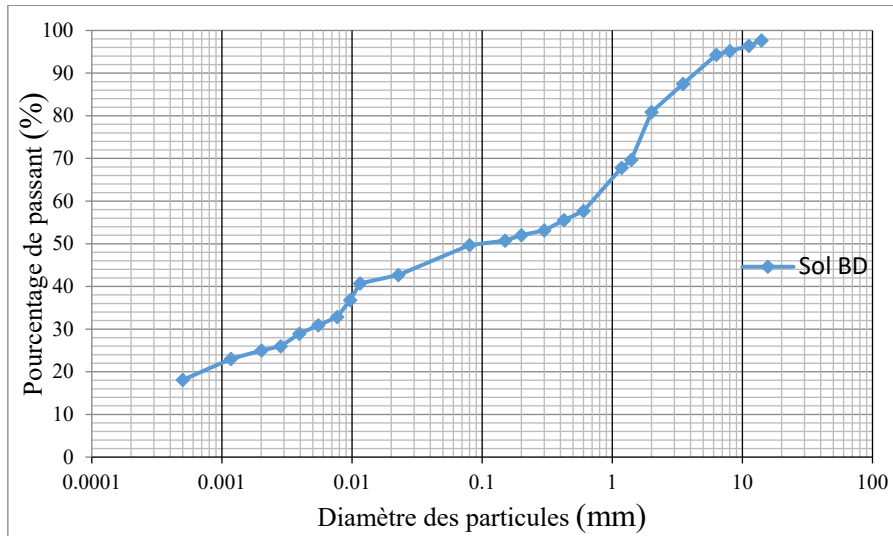


Figure III. 1 Courbes granulométriques du sol de Ben Djerrah.

Le Tableau III.1 présente la classe granulaire du sol étudié, comme expliqué ci-dessous.

Tableau III. 1 Classe granulaire du sol étudié.

	Argile (%) (<0.002 mm)	Limon (%) (0.06 mm-0.002 mm)	Sable (%) (2 mm-0.06 mm)	Gravier (%) (20 mm- 2mm)
Sol BD	24	24	31	21

III.1.1.2 Les limites d'Atterberg

Les analyses des limites d'Atterberg ont été exécutées conformément à la norme (Norme-NF-P94-051)[56]. Le sol BD exhibe une limite de liquidité (LL) d'environ 44%, une limite de plasticité (PL) de 23%, aboutissant à un indice de plasticité (IP) de 21%. Lorsqu'on représente ce matériau sur le graphique de plasticité (voir figure III.2), il se positionne au-dessus de la ligne A, ayant pour droite $PI=0.73 (LL-20)$, ce sol est considéré comme une argile peu plastique.

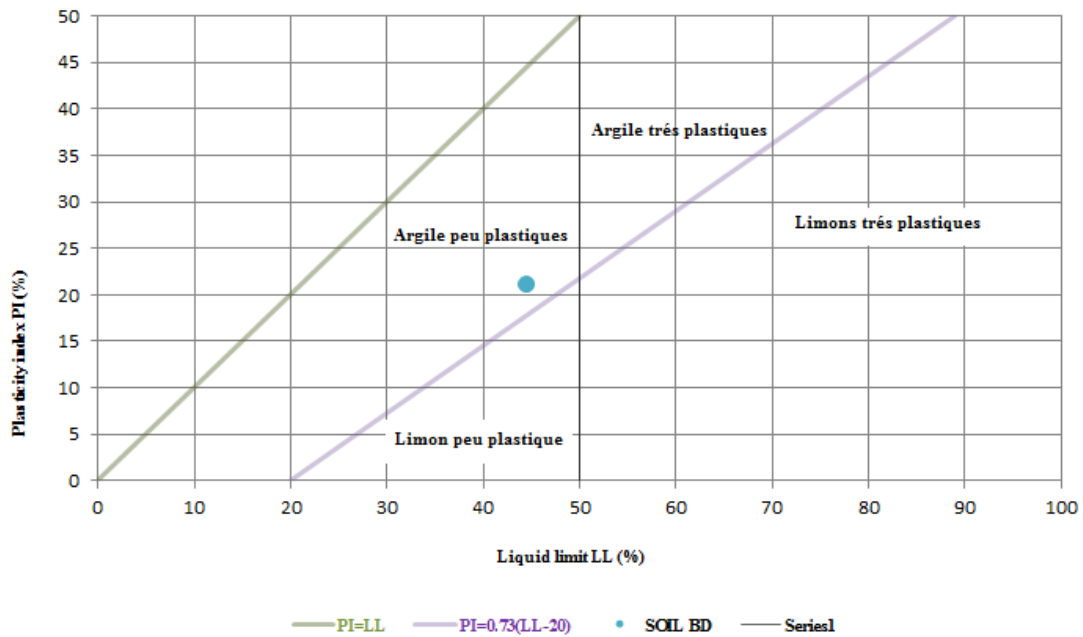


Figure III. 2 Positionnement du sol (BD) sur le diagramme de plasticité.

Les limites d'Atterberg sont intrinsèquement liées aux propriétés physico-chimiques et minéralogiques spécifiques du sol. Les valeurs des limites de plasticité pour certaines argiles [68], sont répertoriées dans le tableau III.2.

D'après les données du tableau III.2, il est évident que l'argile ou la fraction argileuse présente dans le sol étudié appartient à la kaolinite.

Tableau III. 2 Les limites d'Atterberg de certaines argiles [68].

	Smectite	Attapulгите	Illite	Kaolinite
W _L	100 à 1000	150 à 270	60 à 90	30 à 75
W _p	50 à 100	100 en moyenne	25 à 60	20 à 40
IP	75 à 125	20 en moyenne	25 à 50	10 à 40

III.1.1.3 Teneur en matières organiques

La teneur en matières organiques MO mesurée selon la norme [59] est de 3% (ce qui est considérée comme négligeable).

III.1.1.4 Limite de Retrait linéaire LR

Le retrait linéaire est la teneur en eau de séchage conventionnelle en poids d'un sol remanié, au-dessous de laquelle la longueur de l'échantillon est supposée ne plus varier. L'essai de retrait a été réalisé selon la norme [57].

Le tableau III.2 résume les longueurs initiales et finales des deux échantillons du sol étudié.

Tableau III. 3 Résultat de l'essai de la limite de retrait linéaire.

N° de l'échantillon	Longueur Initiale (mm)	Longueur finale(mm)	Retrait linéaire (%) $SL = \frac{(L_0 - L_1)}{L_0} * 100$
1	14	12.53	11.73
2	14	12.56	11.46
Retrait linéaire moyen			11.60

D'après les résultats présentés dans le tableau III.2, la limite de 11.60 % pour le retrait linéaire est observée et est considérée comme non critique.

III.1.1.5 La valeur au bleu de méthylène

L'essai du bleu de méthylène a été réalisé selon la norme [58], les résultats de l'essai du bleu de méthylène sont résumés dans le Tableau III.2.

Tableau III. 4 Tableau récapitulatif de l'essai VBS.

Poids du sol(g)	60
Fraction 0/5(mm)	97%
Volume de bleu(cm3)	365
Masse bleu(g)	3.65
VBS	6.08

B: masse de bleu introduite (solution à 10/l):

B= 3.65

Donc : VBS = (3.65/60) * 100 = 6.08

La valeur de bleu (VBS) s'exprime par la quantité de bleu en grammes consommée par 100 grammes de fines. La figure III.3 montre la classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène.



Figure III. 3 Classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène.

En se basant sur les résultats recueillis et consignés dans le tableau III.2, il est établi que le sol examiné est catégorisé en tant que sol argileux.

III.1.1.6 Essais de compactage du sol de Ben Djerrah (BD).

Les essais de compactage, effectués aux optimums Proctor normal (SPO) et modifié (MPO), ont été conformes à la norme [54]. La figure III.4 illustre la superposition des courbes de compactage normal et modifié.

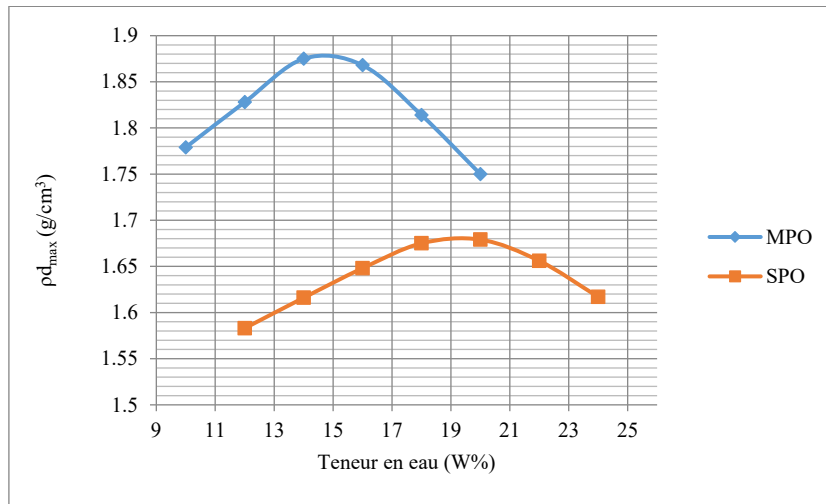


Figure III. 4 Courbes de l'essai Proctor normal et Proctor modifié.

D'après la Figure III.4, la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale pour chaque essai sont rapportés au Tableau III.5.

Tableau III. 5 Résultats des essais Proctor normal et Proctor modifié.

	Proctor normal	Proctor modifié
W_{opt} (%)	19.5	15
ρ_d (g/cm ³)	1.68	1.87

Il est observé que l'élévation de l'énergie de compactage entraîne une réduction d'environ 4.5% de la teneur en eau à l'optimum, accompagnée d'une augmentation d'environ 2% de la masse volumique maximale sèche.

III.1.1.7 Bilan des caractéristiques géotechniques et la classification du sol

Le Tableau III.6 présente les caractéristiques géotechniques du sol étudié.

Tableau III. 6 Caractéristiques géotechniques du sol étudié.

	Sol (BD)	Valeurs
Propriétés physiques	Gravier(%)	21
	Sable (%)	31
	Limon (%)	24
	Argile (%)	24
	LL (%)	44
	LP (%)	23
	IP (%)	21
Propriétés chimiques	VBS(g/100g)	6
	MO (%)	3
Paramètres de compactage	$W_{(SPO)}(\%)$	19.5
	$\rho_{dmax(SPO)}(g/cm^3)$	1.68
	$W_{(MPO)}(\%)$	15
	$\rho_{dmax(MPO)}(g/cm^3)$	1.87

En se basant sur ces résultats, il est possible d'établir une classification générale du sol en fonction de ses caractéristiques géotechniques. En l'absence de classifications spécifiques dédiées à la construction en terre crue, on a recours généralement à la Classification L.C.P.C (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) ou à la Classification G.T.R (Guide des terrassements routiers). Dans ce contexte, le sol a été classifié selon les deux méthodes.

➤ Selon la classification L.C.P.C :

En tenant compte des résultats de l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg (voir tableau III.6 et la Figure II.2):

- Plus de 50% des éléments > 0.08 mm
- Plus de 50% des éléments ont un diamètre < 2 mm
- Plus de 12% des éléments < 0.08 mm
- La limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A.

Il devient envisageable de classer le sol en question selon la classification L.C.P.C, comme présenté dans la Figure III.5.

Définitions		Symboles	Conditions	Désignation géotechnique
GRAVES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ (*) et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
			Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A (fig. 2)	grave limoneuse
			Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	grave argileuse
SABLES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
			Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A	sable limoneux
			SA	Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A

Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 % → on utilise un double symbole.

Figure III. 5 Classification du sol (BD) selon (L.C.P.C).

D'après la classification selon LCPC le sol BD est un sable argileux.

➤ Selon la classification GTR :

En considérant les résultats de l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg et du test au bleu de méthylène (voir Tableau III.6) :

- Tamisat à 0.08 mm > 35%
- L'indice de plasticité est compris entre 12 et 25
- La valeur de bleu de méthylène est comprise entre 2.5 et 6

Il est possible de classer le sol en question selon la classification G.T.R, comme illustré dans la Figure III.6.

Tableau 1 - **Classification des sols fins**


Classe A				Tableau 1 - Classification des sols fins	
Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm > 35%	A <u>Sols fins</u>	VBS ≤ 2,5 ^(*) ou I_p ≤ 12	A₁ Limos peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	IPI ^(*) ≤ 3 ou w_n ≥ 1,25 W_{OPN}	A ₁ th
				3 < IPI ^(*) ≤ 8 ou 1,10 ≤ w_n < 1,25 W_{OPN}	A ₁ h
				8 < IPI ≤ 25 ou 0,9 W_{OPN} ≤ w_n < 1,1 W_{OPN}	A ₁ m
				0,7 W_{OPN} ≤ w_n < 0,9 W_{OPN}	A ₁ s
				w_n < 0,7 W_{OPN}	A ₁ ts
		12 < I_p ≤ 25 ^(*) ou 2,5 < VBS ≤ 6	 A₂ Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	IPI ^(*) ≤ 2 ou I_c ^(*) ≤ 0,9 ou w_n ≥ 1,3 W_{OPN}	A ₂ th
				2 < IPI ^(*) ≤ 5 ou 0,9 ≤ I_c ^(*) < 1,05 ou 1,1 W_{OPN} ≤ w_n < 1,3 W_{OPN}	A ₂ h
				5 < IPI ≤ 15 ou 1,05 < I_c ≤ 1,2 ou 0,9 W_{OPN} ≤ w_n < 1,1 W_{OPN}	A ₂ m
				1,2 < I_c ≤ 1,4 ou 0,7 W_{OPN} ≤ w_n < 0,9 W_{OPN}	A ₂ s
				I_c > 1,3 ou w_n < 0,7 W_{OPN}	A ₂ ts
		25 < I_p ≤ 40 ^(*) ou 6 < VBS ≤ 8	A₃ Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...	IPI ^(*) ≤ 1 ou I_c ^(*) ≤ 0,8 ou w_n ≥ 1,4 W_{OPN}	A ₃ th
				1 < IPI ^(*) ≤ 3 ou 0,8 ≤ I_c ^(*) < 1 ou 1,2 W_{OPN} ≤ w_n < 1,4 W_{OPN}	A ₃ h
				3 < IPI ≤ 10 ou 1 < I_c ≤ 1,15 ou 0,9 W_{OPN} ≤ w_n < 1,2 W_{OPN}	A ₃ m
				1,15 < I_c ≤ 1,3 ou 0,7 W_{OPN} ≤ w_n < 0,9 W_{OPN}	A ₃ s
				I_c > 1,3 ou w_n < 0,7 W_{OPN}	A ₃ ts
		I_p > 40 ^(*) ou VBS > 8	A₄ Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique	
A ₄ th					
A ₄ h					
A ₄ m					
				A ₄ s	

Figure III. 6 Classification du sol (BD) selon (G.T.R)

D'après la classification selon G.T.R le sol BD peut être : sables fins argileux, limons, argile ou marnes peu plastiques.

III.1.2 Caractérisation chimique du sol

III.1.2.1 Diffraction des Rayons X

Les résultats de l'essai de diffraction des rayons X du sol (BD) est illustré dans le tableau III.7 et la Figure III.7.

Tableau III. 7 les composants du sol BD.

Nom	Formule chimique	Pourcentage
Quartz	SiO ₂	73%
Oxyde de fer	Fe ₃ O ₄	14%
Hydroxyde de Silicate d'Aluminium	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	13%

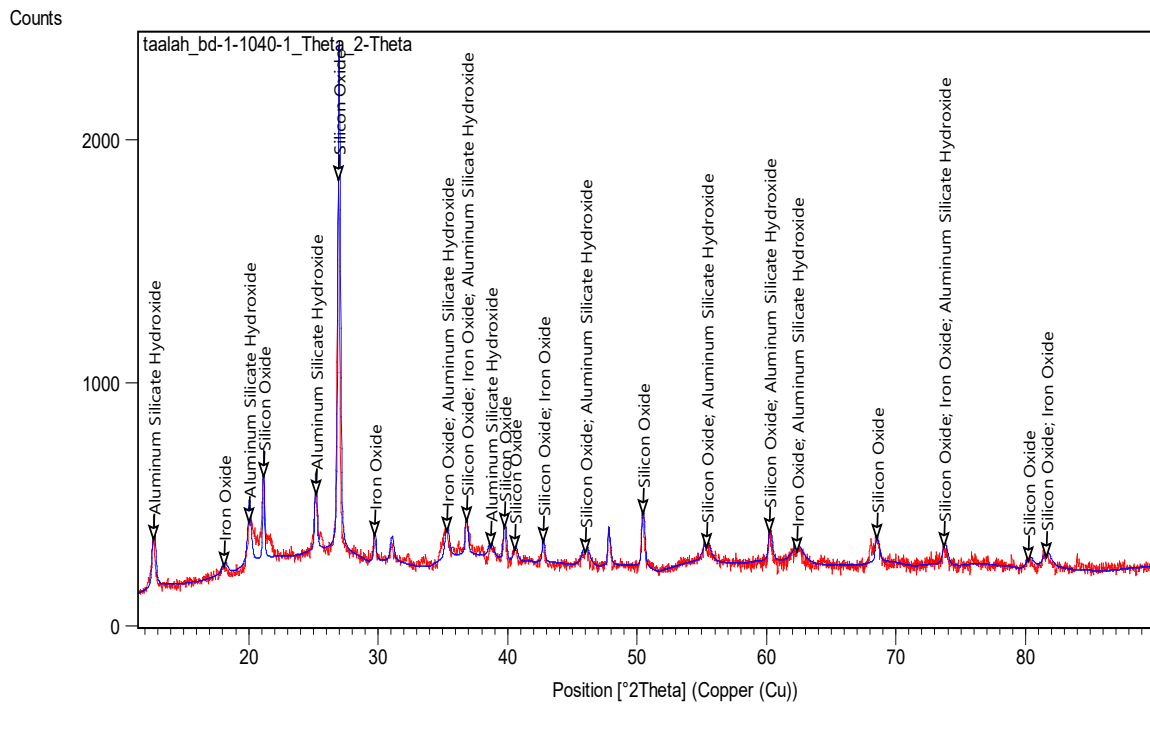


Figure III. 7 Diagramme de diffraction des rayons X du sol (BD)

Le Tableau III.7 met en évidence que le principal constituant du sol (BD) est le quartz (SiO_2), une composition chimique associée au sable. Le sable, généralement principalement composé de grains de quartz constitués en grande partie de SiO_2 , présente une concentration élevée dans l'analyse minéralogique, indiquant une proportion significative de quartz.

Cette caractéristique est en accord avec ce qui a été observé dans la classification du sol (voir Figure III.5), soulignant ainsi la nature sableuse des sols.

Par ailleurs, la présence remarquable de l'oxyde de fer Fe_3O_4 , représentant la magnétite, a été observée dans notre étude. Il est essentiel de souligner que cet oxyde de fer ne présente aucune influence négative sur le bio-liant utilisé dans notre étude. Au contraire, la magnétite démontre des effets positifs dans le sol en raison de ses propriétés bénéfiques. Ainsi, la présence de magnétite dans notre échantillon de sol est considérée comme un facteur positif, mettant en lumière son potentiel bénéfique dans la réduction des risques environnementaux.

Une observation supplémentaire concerne la fréquente présence de l'hydroxyde de silicate d'aluminium $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, associé à des minéraux argileux, particulièrement la kaolinite. Cette phase minérale agit comme un indicateur de la proportion d'argile dans le sol. Cette constatation est cohérente avec les résultats de la classification du sol (voir Figure III.5). De plus, la classification des types d'argile dans le sol, basée sur les valeurs des limites d'Atterberg, confirme également nos observations, comme présenté dans le Tableau III.2.

III.1.2.2 pH du sol

Dans le cadre de la présente étude, nous avons procédé à l'expérimentation des mesures de pH selon la norme (NF ISO 10390)[60]. Quatre essais distincts ont été réalisés sur des échantillons spécifiques, et les résultats obtenus ont été consignés de manière exhaustive dans le Tableau III.8.

Tableau III. 8 Les résultats de la mesure de PH du sol.

	A	B	C	D
Mesure de PH	7.7	7.6	7.5	7.6
La moyenne	7.6			

L'analyse du tableau III.8 synthétisant les résultats relatifs au pH du sol, il est à noter que la moyenne des valeurs est établie à 7.6. Cette mesure représente la tendance centrale des données, fournissant ainsi une indication significative sur le niveau d'acidité ou d'alcalinité du sol examiné. Une valeur moyenne de 7.6, dans le contexte des échelles de pH, se situe dans une plage légèrement basique. En conséquence, cela suggère que le sol présente une légère alcalinité, ce qui peut avoir des implications importantes pour la fertilité du sol et son aptitude à soutenir certaines cultures.

En conclusion, l'analyse du pH du sol démontre que, dans le cadre de l'utilisation du bio-liant, le pH moyen de 7.6 n'indique pas de variations significatives. Ainsi, il est probable que l'application du bio-liant ne soit pas influencée de manière substantielle par les conditions de pH du sol.

III.2 Positionnement du sol (BD) par rapport aux recommandations pour les BTC

La vérification rigoureuse des propriétés du sol joue un rôle essentiel dans la réussite de projets de construction utilisant des Blocs de Terre Compressée (BTC). Cette importance découle de la nécessité de garantir la qualité et la fiabilité des matériaux employés dans la fabrication des BTC, afin d'assurer la stabilité et la durabilité des structures construites. Les normes et les recommandations établissent des critères stricts en termes de granulométrie, de plasticité, de densité et de résistance que doivent satisfaire les matériaux destinés à la confection des BTC [2], [13], [15], [19], [69]. La conformité à ces normes et les recommandations sont cruciales pour garantir la performance mécanique, la durabilité et la sécurité des structures en BTC, soulignant ainsi l'importance capitale de la vérification approfondie du sol dans ces projets de construction.

III.2.1 Vis-à-vis de la granulométrie

La représentation graphique de la distribution granulométrique est exposée dans la figure III.8, avec le fuseau normatif provenant des directives est affiché en pointillés [13], [69]. Nous remarquons que la courbe granulométrique du sol (BD) se positionne de manière satisfaisante dans le fuseau, couvrant plus de 70% de l'intervalle défini par ce fuseau granulométrique. Par

conséquence, il est possible de sélectionner ce matériau à l'état naturel pour la production des Blocs de Terre Compressée (BTC) sans nécessité de traitement particulier.

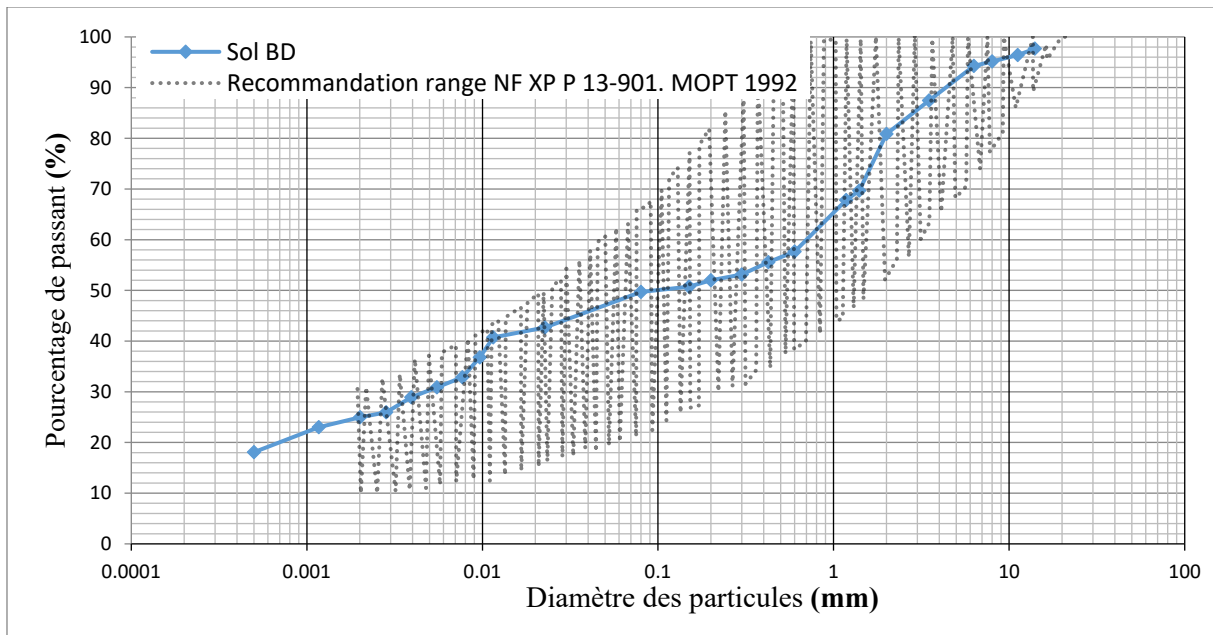


Figure III. 8 Distribution granulométrique du sol et le fuseau recommandé pour la BTC

III.2.2 Vis-à-vis des limites d'Atterberg

La localisation de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité du sol naturel est représentée dans le diagramme de Casagrande, spécifiquement sur le plan (LL, PI), comme illustré dans la Figure III.9. Sur ce même graphique, les deux zones recommandées par les normes [13] [69] ont été intégrées. On observe que le sol naturel se situe au-dessus de la droite (A) définie par l'équation $IP = 0.73 (LL-20)$. De plus, on constate qu'il se trouve à l'intérieur des fuseaux établies par les normes, ce qui le rend adéquat pour être utilisé dans la fabrication des Blocs de Terre Compressée (BTC).

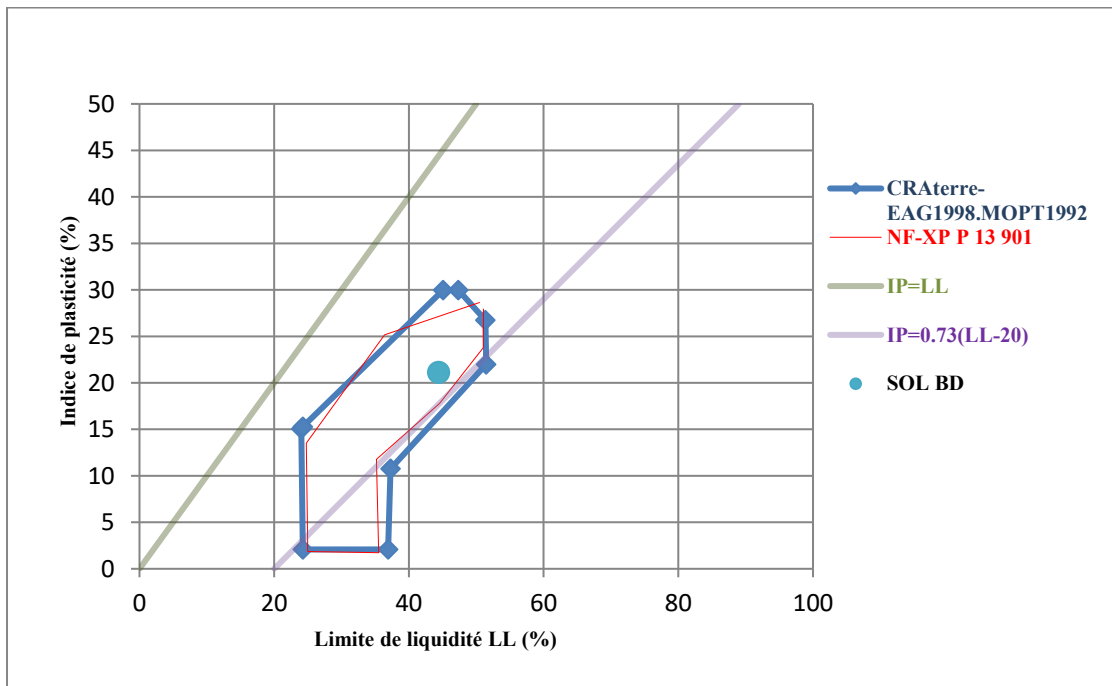


Figure III. 9 Limites d’Atterberg du sol et le fuseau recommandé pour BTC

III.2.3 Vis-à-vis du compactage

Les courbes de compactage pour l'essai Proctor Normal Optimal (SPO) et l'essai Proctor Modifié Optimal (MPO) du matériau naturel (SN) sont graphiquement représentés. Sur le même graphique, nous avons positionné la plage recommandée [2], [34], [69]. Il est à noter que, pour l'énergie SPO, la masse volumique sèche maximale se situe nettement en deçà du fuseau recommandé, délimité par une teneur en eau de 17.9% et une masse volumique sèche maximale de 1.69 g/cm³ (Figure III.10). En revanche, pour l'énergie MPO, le point correspondant à la masse volumique sèche maximale de 1.88 g/cm³ et à la teneur en eau optimale de 15.2% se trouve judicieusement positionné à l'intérieur du fuseau recommandé.

Le tableau III.9 résume les différentes valeurs du poids volumique et la teneur en eau relevées dans la littérature concernant la mise en œuvre des BTC.

Tableau III. 9 Teneurs en eaux initiales et les poids volumiques secs maximales des BTC [13]–[15]

Référence	Technique	$\gamma_{dmax}(kN/m^3)$	w(%)
Craterre (2012)	BTC	16 à 22	5 à 15
Jiménez (2007)	BTC	17.5 à 23	5 à 15
Morel(2003)	BTC	18.6 à 18.7	/
Hakimi (1996)	BTC	19.2 à 19.30	9.8 à 10.8
Olivier (1994)	BTC	18.25 à 20.13	12 à 19

Ola (1987)	BTC	16 à 19	/
------------	-----	---------	---

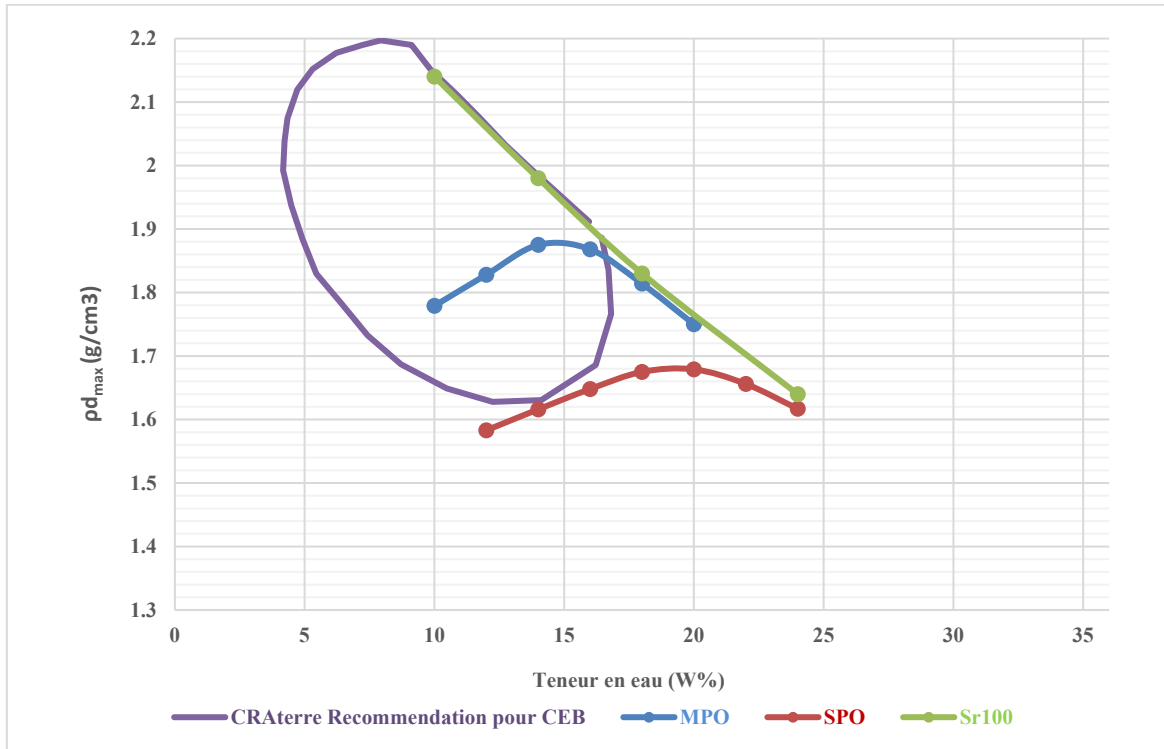


Figure III. 10 Essai de compactage (SPO et MPO) du sol et le fuseau recommandé pour BTC.

III.2.4 Vis-à-vis de la résistance à la compression simple (UCS) du sol BD

La résistance à la compression simple des briques en terre compressée est un paramètre crucial, soumis à des normes rigoureuses telles que la Norme [13]. Selon cette norme, la résistance à la compression simple des briques en terre compressée doit atteindre ou dépasser 1.6 MPa pour être considérée comme conforme. Cette spécification est essentielle pour garantir la qualité structurelle et la durabilité des briques dans des applications de construction. La vérification de cette norme s'inscrit dans une démarche d'assurance qualité, visant à assurer que les briques en terre compressée répondent aux exigences minimales en termes de résistance, contribuant ainsi à la sécurité et à la fiabilité des structures construites avec ce matériau.

Selon les données révélées dans le tableau III.3, la valeur de la résistance à la compression simple du sol non-traité, établie à 0.8 MPa, ne satisfait pas les exigences spécifiées par la norme en vigueur [13]. Cependant, après l'ajout de 1% de gomme de caroube et suivant un processus de cure de 28 jours, les résultats obtenus ont manifestement évolué. La résistance à la compression simple a atteint une valeur de 1.6 MPa, répondant ainsi pleinement aux normes en vigueur. Ces résultats renforcent la possibilité d'utiliser efficacement ce matériau, désormais conforme aux exigences normatives, dans la construction de briques en terre compressée.

III.2.5 Concernant l'utilisation du sol (BD) dans les BTC.

En conclusion de notre étude, la vérification conforme aux normes relatives aux Blocs de Terre Compressée (BTC) a révélé des résultats significatifs. En ce qui concerne la granulométrie et les limites d'Atterberg, le sol a démontré une conformité aux normes spécifiques régissant la production de briques en terre crue. Pour le processus de compactage, il est essentiel de souligner que les résultats du Proctor Normal ne répondent pas aux normes prescrites pour les Blocs de Terre Compressée (BTC). En revanche, l'utilisation des résultats du Proctor Modifié s'avère nécessaire, car ces derniers confirment la conformité du sol aux normes spécifiques régissant la production de briques en terre compressée.

Cependant, lors de l'évaluation de la résistance à la compression simple, il est apparu que le sol non-amendé ne satisfaisait pas les exigences minimales requises pour être utilisé dans la fabrication de briques en terre compressée. Afin de remédier à cette limitation, une solution prometteuse a été mise en œuvre en ajoutant 1% de gomme de caroube au sol, suivi d'un temps de cure de 28 jours. Cette modification a considérablement amélioré la résistance à la compression simple, permettant ainsi de respecter les normes prescrites pour les BTC.

En définitive, les caractéristiques de notre base de données indiquent que le sol traité, en conformité avec les normes de granulométrie, d'Atterberg, et après un traitement adéquat, peut être considéré comme une matière première appropriée pour la fabrication de briques en terre compressée. Ces résultats positifs ouvrent la voie à l'utilisation durable de ce matériau dans la construction, soulignant ainsi son potentiel dans la promotion de pratiques constructives écologiques et conformes aux normes en vigueur.

Conclusion

Ce chapitre est centré à la présentation des résultats des essais d'identification du sol utilisé, ainsi que sa classification. La démarche entreprise visait ensuite à vérifier la conformité des résultats obtenus aux normes régissant la fabrication des briques en terre compressé, notamment en termes de granulométrie, de limites d'Atterberg, de compactage, et de résistance à la compression simple. La caractérisation et la classification du sol ont révélé sa nature de sable argileux, peu plastique, avec la présence notable d'une argile de type kaolinite. Ces caractéristiques ont été corroborées par les analyses chimiques, mettant en évidence la composition du sol, principalement constitué de sable et de kaolinite. Ces résultats fournissent une base solide pour la prise de décision quant à l'utilisation de ce sol spécifique dans le processus de fabrication des briques en terre compressée.

La seconde partie de ce chapitre a été destinée à la vérification du sol selon les normes spécifiques aux Blocs de Terre Compressée (BTC). Cette évaluation a démontré que le sol BD peut être judicieusement retenu comme matériau de base pour la fabrication des briques en terre compressée. Ces conclusions confirment la pertinence du choix du sol dans le cadre du processus de fabrication des briques, ouvrant ainsi la voie à des applications constructives prometteuses et respectueuses des normes édictées pour les BTC.

CHAPITRE IV : COMPORTEMENT MECANIQUE ET DURABILITE

Introduction

Le présent chapitre se consacre à l'étude approfondie du comportement mécanique des briques en terre crue, explorant spécifiquement les différences entre les briques non stabilisées et celles stabilisées avec un bio-liant. Le choix d'utiliser un bio-liant vise à apporter une dimension durable à ces matériaux de construction traditionnels, en exploitant des ressources naturelles et renouvelables.

La méthodologie adoptée pour ce chapitre repose sur la fabrication d'éprouvettes confectionnées à partir de mélanges spécifiques de terre crue, soumis à un compactage statique. Les essais mécaniques effectués revêtent une importance cruciale pour évaluer les propriétés fondamentales des briques. Deux principaux essais mécaniques seront réalisés : la résistance à la compression simple, considérée comme un indicateur essentiel pour évaluer la robustesse des briques en terre crue, et la résistance à la traction par flexion à trois points, permettant d'appréhender leur comportement sous des contraintes plus complexes.

Parallèlement à ces essais mécaniques, une attention particulière sera portée aux aspects de durabilité des briques. À cette fin, deux essais de durabilité ont été choisis. Le premier, l'essai de goutte à goutte (Drip test), simule les effets des conditions météorologiques en évaluant la capacité des briques à résister à l'infiltration d'eau. Le second, l'essai d'immersion dans l'eau (Dip test), permettra d'analyser la réponse des briques à une exposition prolongée à des conditions humides.

À travers cette démarche expérimentale complète, nous cherchons à approfondir notre compréhension du comportement mécanique des briques en terre crue, en mettant en lumière les avantages potentiels de la stabilisation avec un bio-liant sur leurs performances. Ces résultats contribueront à enrichir le champ des connaissances dans le secteur la construction durable, en offrant des perspectives novatrices pour l'utilisation de matériaux écologiques dans le secteur de la construction.

IV.1 Comportement mécanique des briques en terre compressée

IV.1.1 Essai de compression simple

Les essais de compression simple, déterminants pour évaluer la résistance fondamentale des briques en terre crue, ont été minutieusement conduits sur des éprouvettes cylindriques. Ces dernières ont été élaborées à partir de mélanges spécifiques, mettant en lumière l'influence de deux dosages distincts de gomme de caroube : 1% et 2% en poids. En complément, des éprouvettes composées exclusivement du sol non-traité ont été confectionnées, offrant ainsi une référence essentielle pour évaluer l'impact du bio-liant sur les propriétés mécaniques du matériau (voir Tableau IV.1). Dans le cadre rigoureux de cette étude, trois éprouvettes ont été soigneusement façonnées pour chaque dosage, permettant d'assurer une robustesse statistique dans l'analyse des résultats.

Tableau VI. 1 Masse de chaque composant des mélanges sol-liant

Dosage (%)	Teneur en eau (%)	Masse volumique sèche (kg/m ³)	Masse du sol (g)	Masse de la gomme de caroube (g)	La masse d'eau (g)
0	15	1870	1240	0	186
1	15	1870	1227,6	12,4	186
2	15	1870	1215,2	24,8	186

Afin de considérer l'évolution temporelle des propriétés mécaniques des briques, différentes périodes de cure ont été sélectionnées, à savoir 7, 14, et 28 jours, respectivement. Ces intervalles représentent des points clés dans le processus de durcissement des matériaux, permettant d'observer l'influence du temps sur la résistance des briques en terre crue. Le Tableau IV.2 fournit une synthèse claire des valeurs moyennes issues des essais de compression simple, présentant ainsi de manière concise les performances mécaniques des briques pour chaque dosage et chaque période de cure.

Tableau VI. 2 Résultats des essais de résistance à la compression simple.

	0 jour	7 jours	14 jours	28 jours
R _c (Sol + 1% gomme de caroube) (MPa)	/	1,2	1,5	1,6
R _c (Sol + 2% gomme de caroube) (MPa)	/	1,7	2,1	2,2
R _c (Sol non-traité) (MPa)	0,8	/	/	/

La figure IV.1 expose de manière graphique les valeurs de résistance à la compression non confinée, démontrant une variation significative allant de 0,8 MPa pour les échantillons non traités à une augmentation notable atteignant 2,2 MPa après 28 jours de durcissement pour les échantillons traités à 2 % de gomme de caroube. Ces résultats témoignent de l'impact significatif de l'ajout de gomme de caroube sur la résistance à la compression simple des briques en terre compressé au fil du temps. Les résultats de la résistance à la compression simple des échantillons non traités (0,8 MPa) ainsi que des échantillons traités à 1 % à 7 et 14 jours (1,2 MPa et 1,5 MPa respectivement) se situent en deçà de la valeur minimale recommandée par la norme qui stipule une résistance supérieure ou égale à 1,6 MPa [13].

Cette observation souligne l'importance du temps de cure, où les premiers stades de durcissement peuvent conduire à des résultats initialement inférieurs aux normes établies. Cependant, une évolution positive est perceptible dans les résultats de la résistance à la compression simple des échantillons traités à 1 % après 28 jours (1,6 MPa) et les échantillons traités à 2 %, qui surpassent la valeur minimale recommandée. Cette constatation suggère que

le processus de durcissement des échantillons traités à la gomme de caroube, bien que requérant un temps plus prolongé, conduit à des performances mécaniques satisfaisantes, voire supérieures aux normes en vigueur. En somme, l'analyse approfondie des résultats de résistance à la compression simple souligne l'importance cruciale du dosage de gomme de caroube et de la durée de cure dans l'amélioration des propriétés mécaniques des briques en terre crue.

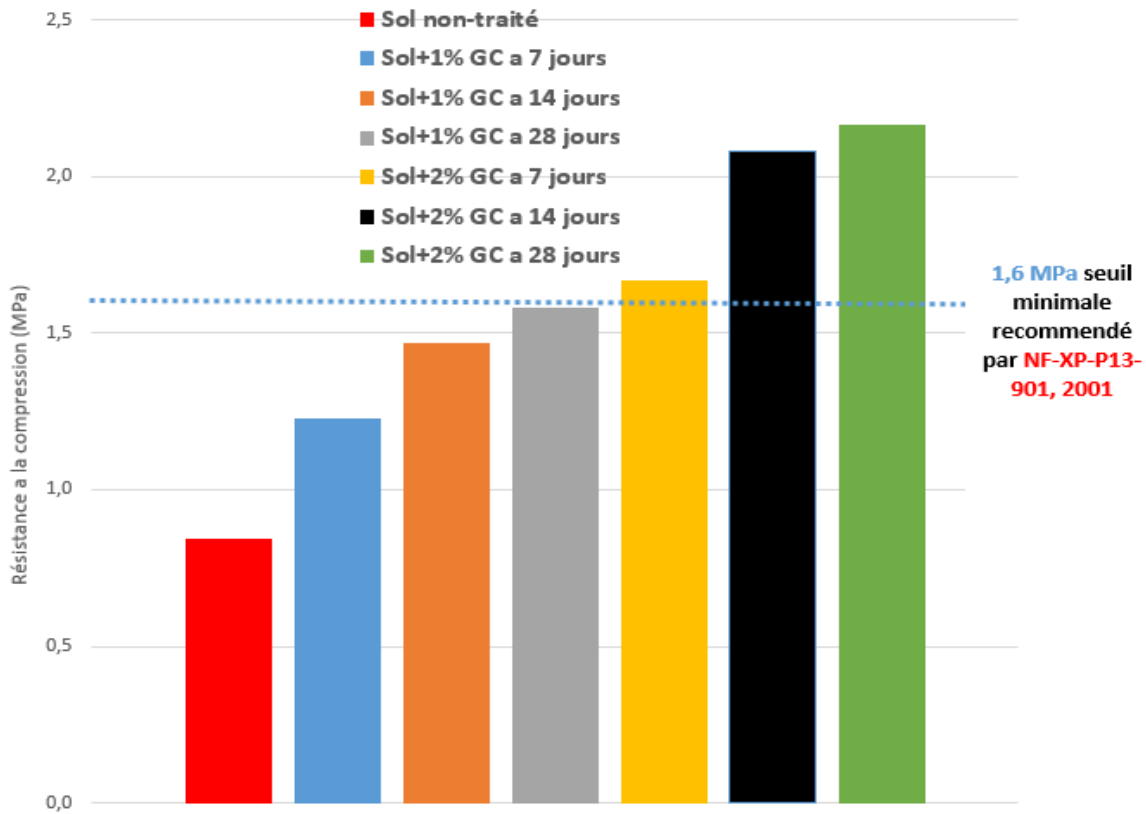


Figure VI. 1 La résistance à la compression non confinée pour tous les spécimens avec le seuil minimum recommandé [1].

La figure IV.2 offre une illustration détaillée des principaux facteurs influant sur la résistance moyenne à la compression non confinée, à savoir le temps de cure et le dosage en bio-liant. Il est essentiel de souligner que, concernant le facteur temps, la résistance moyenne évolue de manière significative au cours des 14 premiers jours de durcissement, présentant une augmentation constante. Cependant, au-delà du 14^{ème} jour, l'impact du temps de cure sur la résistance diminue. Cette observation s'explique par la nécessité d'une période prolongée de durcissement, favorisant l'interaction complexe entre l'eau, la gomme de caroube et les particules du sol. En outre, lorsque les hydrogels sèchent, ils se transforment en un état caoutchouteux ou vitreux qui tend à se lier aux particules, renforçant ainsi la structure globale [70]. Cette transition d'état contribue à la robustesse mécanique des briques, augmentant leur capacité à résister aux contraintes de compression.

Quant à l'effet du dosage du bio-liant, la résistance moyenne à la compression croît proportionnellement à l'augmentation du dosage, passant de 1,6 MPa à 28 jours de durcissement pour le traitement à 1 % de gomme de caroube à 2,2 MPa à 28 jours de durcissement pour le

traitement à 2 %. Cette amélioration de la résistance est principalement attribuée à la formation de liaisons hydrogène par le bio-liant, impliquant de nombreux groupes hydroxyles. La structure chimique spécifique de la gomme de caroube favorise ces liaisons hydrogène, créant ainsi des effets d'hydro-colloïdes liés à l'hydrogène. De plus, les hydrogels présents dans les espaces vides des particules du sol agissent comme des agents de liaison supplémentaires, renforçant la matrice de gomme de caroube. Cette configuration améliorée présente une résistance à la compression accrue, offrant ainsi une capacité de charge supérieure. En somme, l'analyse de ces résultats souligne l'influence significative du temps de cure et du dosage en bio-liant sur les propriétés mécaniques des briques en terre crue, ouvrant des perspectives prometteuses pour une utilisation optimale de ces matériaux dans le contexte de la construction durable.

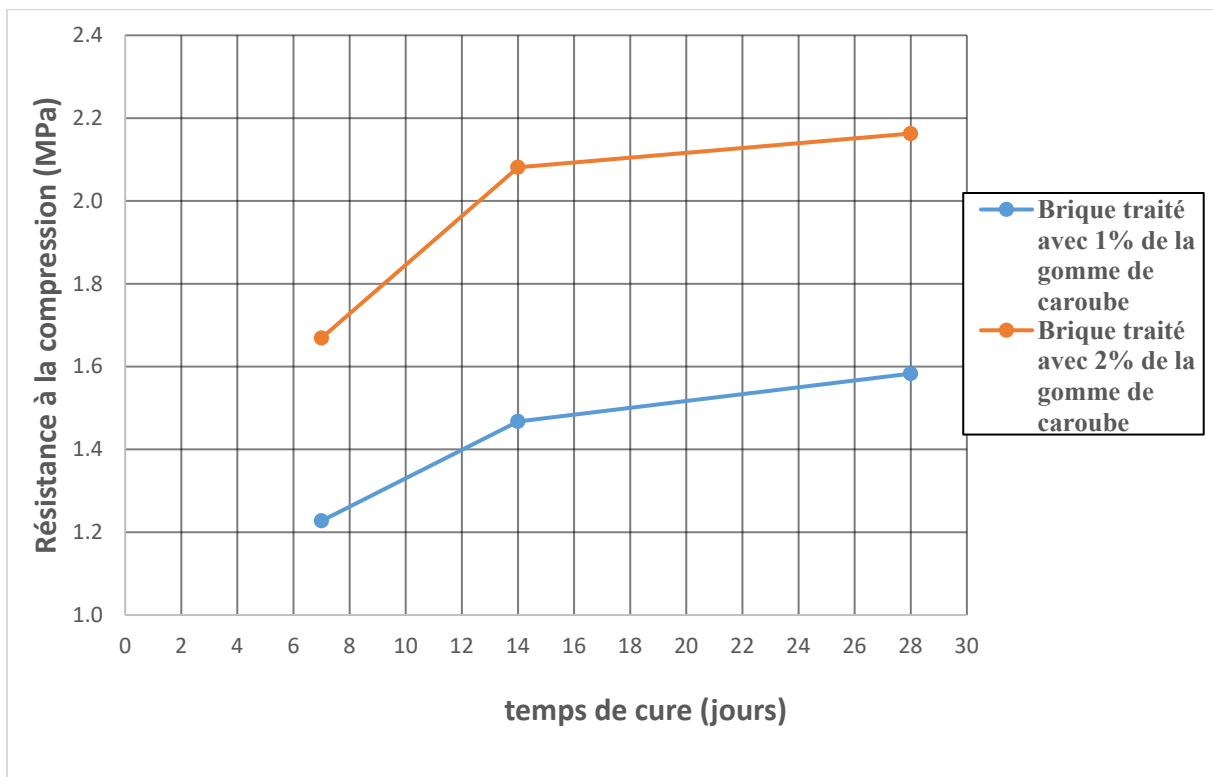


Figure VI. 2 Courbes des effets du dosage et du temps de durcissement sur la moyenne de la résistance à la compression simple.

IV.1.2 Essai de flexion à 3 points

Généralement, dans la caractérisation des briques en terre comprimée, les chercheurs se concentrent principalement sur les essais de compression simple. Cela s'explique par le fait que la brique en terre comprimée est fréquemment utilisée en tant qu'élément porteur, supportant principalement des charges verticales. Les essais de compression simple sont donc traditionnellement privilégiés pour évaluer la capacité de la brique à résister à des forces axiales. Cependant, pour une évaluation plus complète de la résistance à la traction, des essais de flexion à trois points ont été réalisés. Ces tests spécifiques visent à mieux comprendre la performance de la brique en termes de résistance à la traction, offrant ainsi une perspective plus détaillée sur

ses propriétés mécaniques dans des conditions où des forces de flexion pourraient être présentes. Ainsi, bien que les essais de compression simple demeurent prédominants, les essais de flexion à trois points complètent cette évaluation en fournissant des informations supplémentaires sur la résistance à la traction des briques en terre comprimée.

Les essais de flexion à trois points, cruciaux pour évaluer la résistance à la traction des briques en terre compressée, ont été réalisés de manière approfondie sur des échantillons parallélépipédiques obtenus par compactage statique, conformément à la représentation schématique. Ces spécimens ont été fabriqués à partir de mélanges spécifiques, mettant en évidence l'influence de deux dosages différents de gomme de caroube : 1% et 2%. Parallèlement, des échantillons constitués exclusivement du sol non-traité ont été élaborés, fournissant ainsi une référence indispensable pour évaluer l'impact du bio-liant sur les propriétés mécaniques du matériau. Dans le cadre rigoureux de cette recherche, trois échantillons ont été soigneusement conçus pour chaque dosage, assurant ainsi une solidité statistique lors de l'analyse des résultats.

Le Tableau IV.3 fournit une synthèse claire des valeurs moyennes issues des essais de flexion à 3 points, présentant ainsi de manière concise les performances mécaniques des briques pour chaque dosage et chaque période de cure.

Tableau VI. 3 La résistance à la flexion 3 points des BTC.

	0 jour	7 jours	14 jours	28 jours
R _t (Sol + 1% gomme de caroube) (MPa)	/	0,30	0,36	0,36
R _t (Sol + 2% gomme de caroube) (MPa)	/	0,35	0,40	0,41
R _t (Sol non-traité) (MPa)	0,20	/	/	/

La représentation graphique présentée dans la figure IV.3 offre une visualisation des valeurs de résistance à la traction par flexion à trois points. On observe une variation allant de 0,20 MPa pour les échantillons non traités à une augmentation atteignant 0,41 MPa après 28 jours de durcissement, pour les échantillons traités avec 2 % de gomme de caroube. Ces résultats soulignent clairement l'impact substantiel de l'ajout de gomme de caroube sur la résistance à la traction des briques en terre compressée au fil du processus de durcissement. L'analyse des résultats de la figure IV.3 révèle une diminution significative de la résistance à la traction par rapport à la résistance à la compression non confinée. Cette disparité est principalement attribuée à la facilité avec laquelle les fissures peuvent se propager sous des charges de traction [71]. Les résultats obtenus mettent en évidence une tendance selon laquelle la résistance à la traction augmente à mesure que la teneur en bio-liant augmente. Cette observation souligne l'influence prépondérante de la concentration en bio-liant sur la résistance à la traction du matériau. Lorsque le bio-liant est mélangé avec de l'eau, il a un impact significatif sur la résistance à la compression et à la traction du matériau. En pénétrant dans les vides et les

particules, le bio-liant crée une liaison efficace entre les grains, renforçant ainsi la cohésion interne. Cette interaction résulte en une augmentation notable de la résistance à la traction et à la compression no confinée du matériau. En agissant comme un liant efficace, le bio-liant favorise des liaisons internes plus solides.

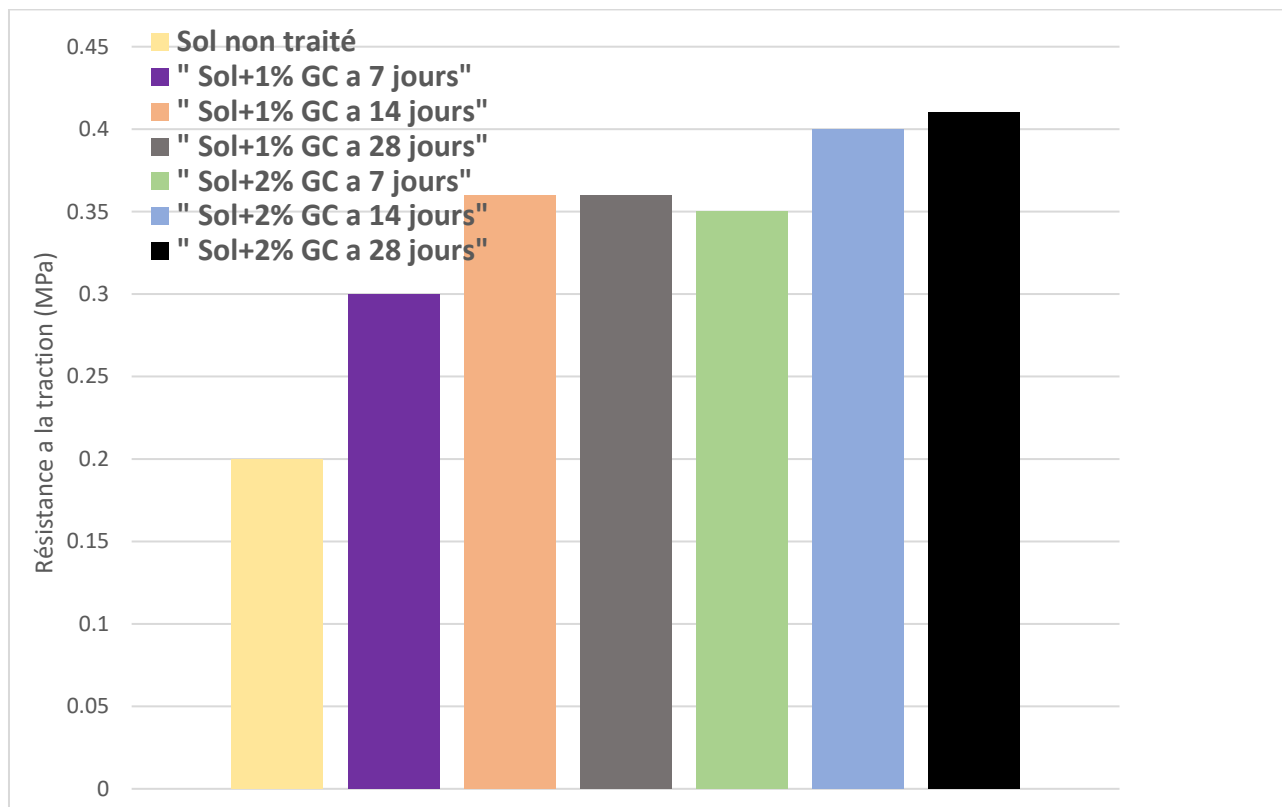


Figure VI. 3 La résistance à la traction pour tous les spécimens.

IV.2 Durabilité des briques en terre compressé

IV.2.1 Essai de Drip test

La Figure IV.6 présente de manière détaillée les profondeurs d'érosion obtenues à l'issue de l'expérience pour toutes les combinaisons testées. Une analyse minutieuse a été réalisée sur chaque combinaison, évaluant les profondeurs d'érosion à deux moments distincts, soit après 7 et 28 jours. Les résultats mettent en évidence une tendance significative : l'échantillon non traité présente une profondeur d'érosion nettement supérieure par rapport aux échantillons de sol stabilisé à la gomme de caroube. Le tableau IV.3 présente les recommandations et les indices d'érodabilité associés, offrant ainsi une synthèse claire des résultats de l'étude.

En conformité avec les directives spécifiées dans les références [14], [62], il est observé que la profondeur d'érosion des échantillons non traités (Figure VI.4), ainsi que des échantillons stabilisés à 1 % de gomme de caroube après 7 jours (Figure VI.5), excède les 5 mm, révélant ainsi un indice d'érodabilité élevé classé à 3. En revanche, la profondeur d'érosion des échantillons stabilisés à 1 % de gomme de caroube à 28 jours, ainsi que celle des échantillons stabilisés à 2 % de gomme de caroube à 7 et 28 jours (Figure VI.5), demeure bien en deçà de 5

mm, indiquant un indice d'érodabilité de 2. Ces constatations démontrent de manière probante que les échantillons non traités et ceux stabilisés à 1 % de gomme de caroube après 7 jours sont plus sensibles à l'érosion. Suivant les directives émises par les recommandations de Frencham [72], des matériaux en terre stabilisés par des biopolymères dont la profondeur d'érosion est inférieure à 5 mm peuvent être qualifiés de "légèrement érodables". Ces observations convergent vers la conclusion que l'intégration de biopolymères améliore indéniablement la résistance à l'érosion de ce matériau en terre. Ces résultats revêtent ainsi une importance significative dans la compréhension et l'amélioration des propriétés d'érosion des matériaux de construction à base de terre.

Tableau VI. 4 Classification de briques en terre compressée selon leur érodabilité par Frencham [6] et NZDS 4298[4].

Depth of erosion, D (mm) Frencham	Frencham recommendat ions [72]	Erodibility index as per NZ DS 4298 [14]
0	Non Erodable	1
$0 < D < 5$	Slightly Erode	2
$5 < D < 10$	Erodable	3
$10 < D < 15$	Very Erodable	4
$15 < D$	-	5(Fail)

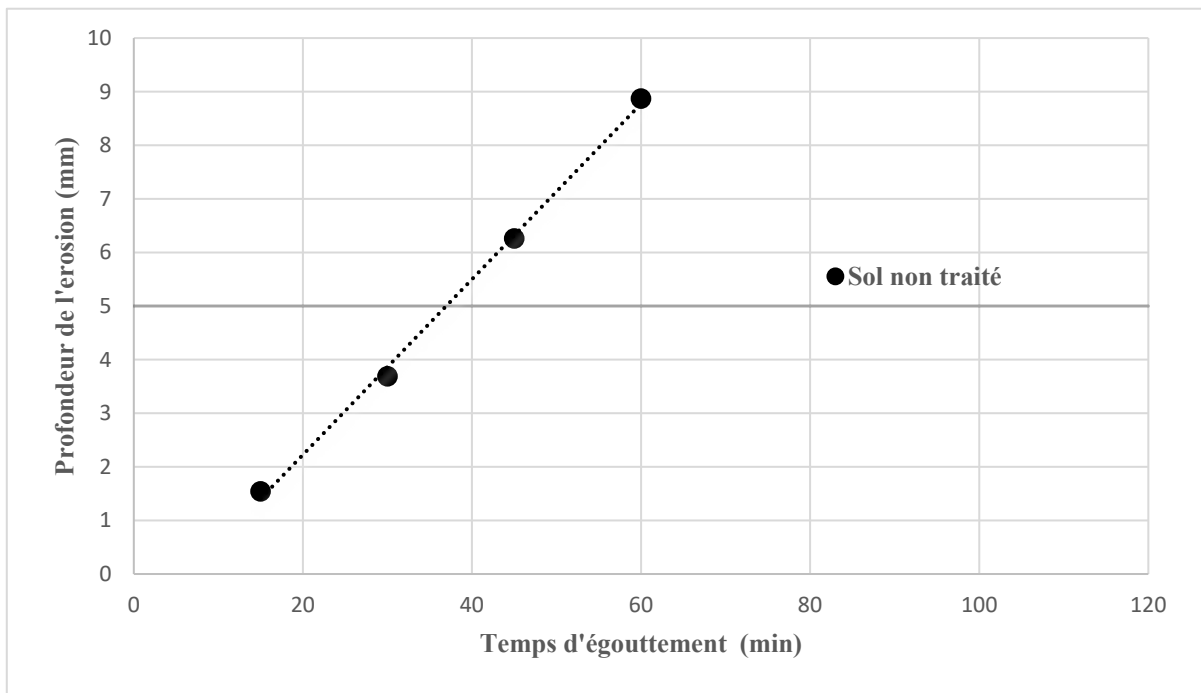


Figure VI. 4 Profondeur de l'érosion des éprouvettes non-traité

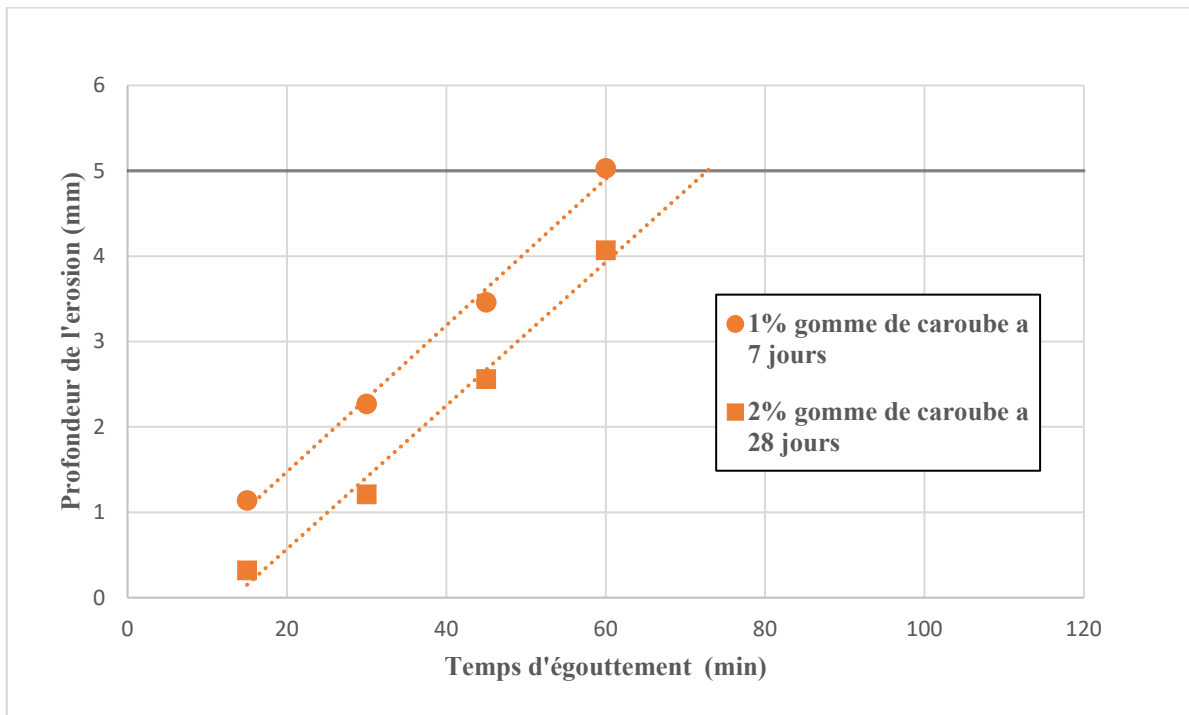


Figure VI. 5 Profondeur de l'érosion des éprouvettes traité avec 1% de la gomme de caroube.

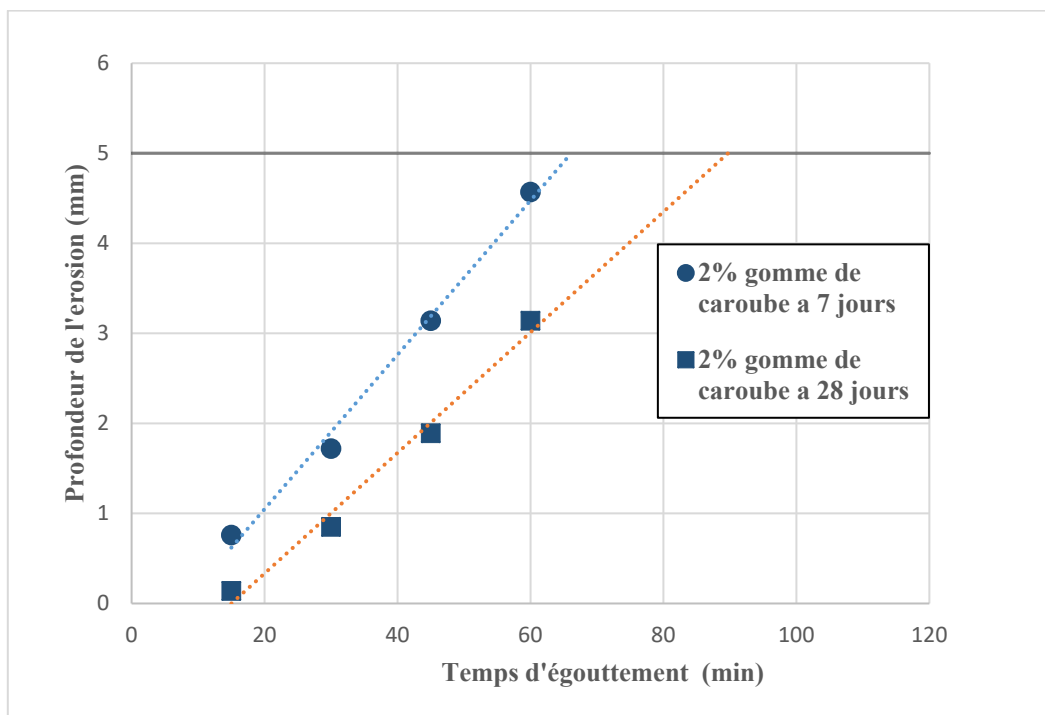


Figure VI. 6 Profondeur de l'érosion des éprouvettes traité avec 2% de la gomme de caroube.

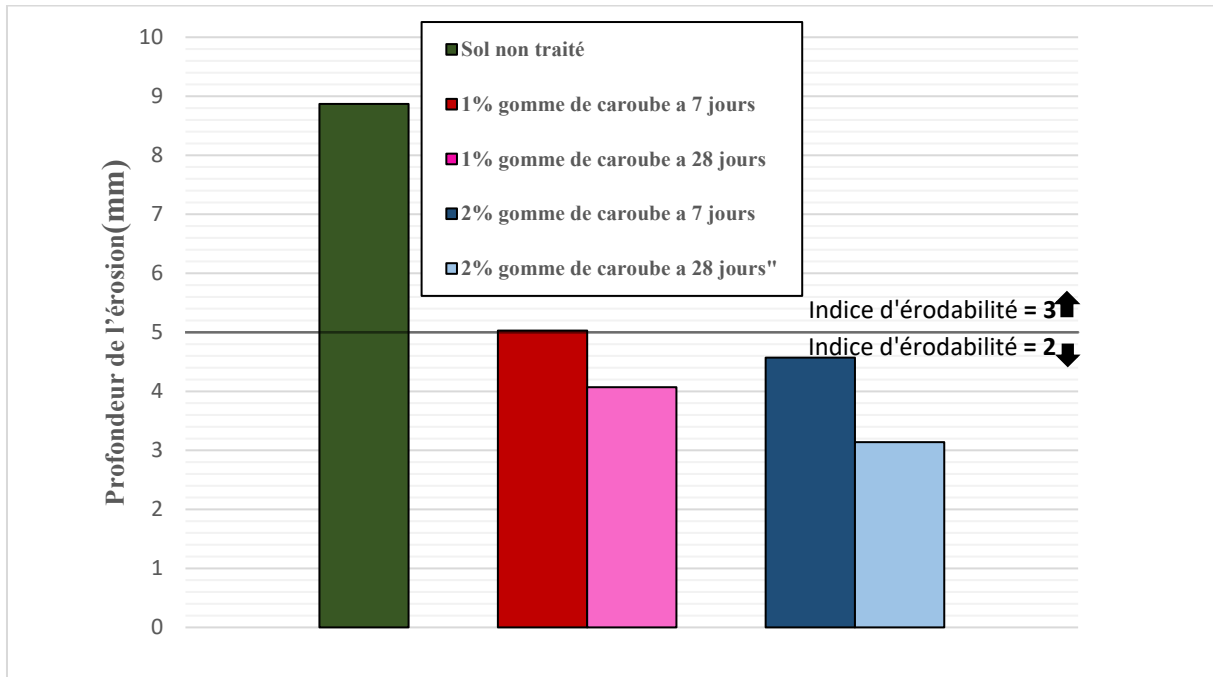


Figure VI. 7 Profondeur moyenne de l'érosion après le Drip test.

IV.2.2 Dip test

La Figure IV.7 offre une représentation visuelle de la perte de masse pour l'ensemble des échantillons soumis aux tests. Il est manifesté que la perte de masse des échantillons non traités est nettement supérieure à celle des échantillons stabilisés au bio-liant. Toutefois, il est à noter que la perte de masse constatée pour les échantillons stabilisés au bio-liant demeure inférieure à 5 %, répondant ainsi aux critères d'adéquation à une utilisation dans les murs extérieurs selon la norme DIN 18945[66].

Lors du retrait de l'eau, une observation intéressante a été faite concernant les briques stabilisées à la caroube, montrant une légère humidité sur les parties immergées, comme le démontre la Figure IV.8. En revanche, les tests menés sur les briques non traitées lors d'un essai d'immersion révèlent leur incapacité à résister à cette immersion. La partie immergée de la brique se sature rapidement, provoquant une diminution de la succion du sol qui assure la liaison entre les particules [73]. Par la suite, l'eau qui pénètre dans la brique la rend plus lourde, entraînant son enfoncement dans l'eau en s'éloignant de l'extrémité fixe de la brique.

Dans le cas des échantillons stabilisés par des biopolymères, aucune perte de masse significative n'a été observée pour les deux pourcentages de gomme de caroube utilisés dans la stabilisation. Ces résultats suggèrent que les chaînes de biopolymères ont principalement absorbé de l'eau sans atteindre un stade de dilution susceptible de causer des dommages. Cette constatation souligne l'efficacité de la stabilisation par biopolymères dans la préservation de l'intégrité des briques face à des conditions d'immersion.

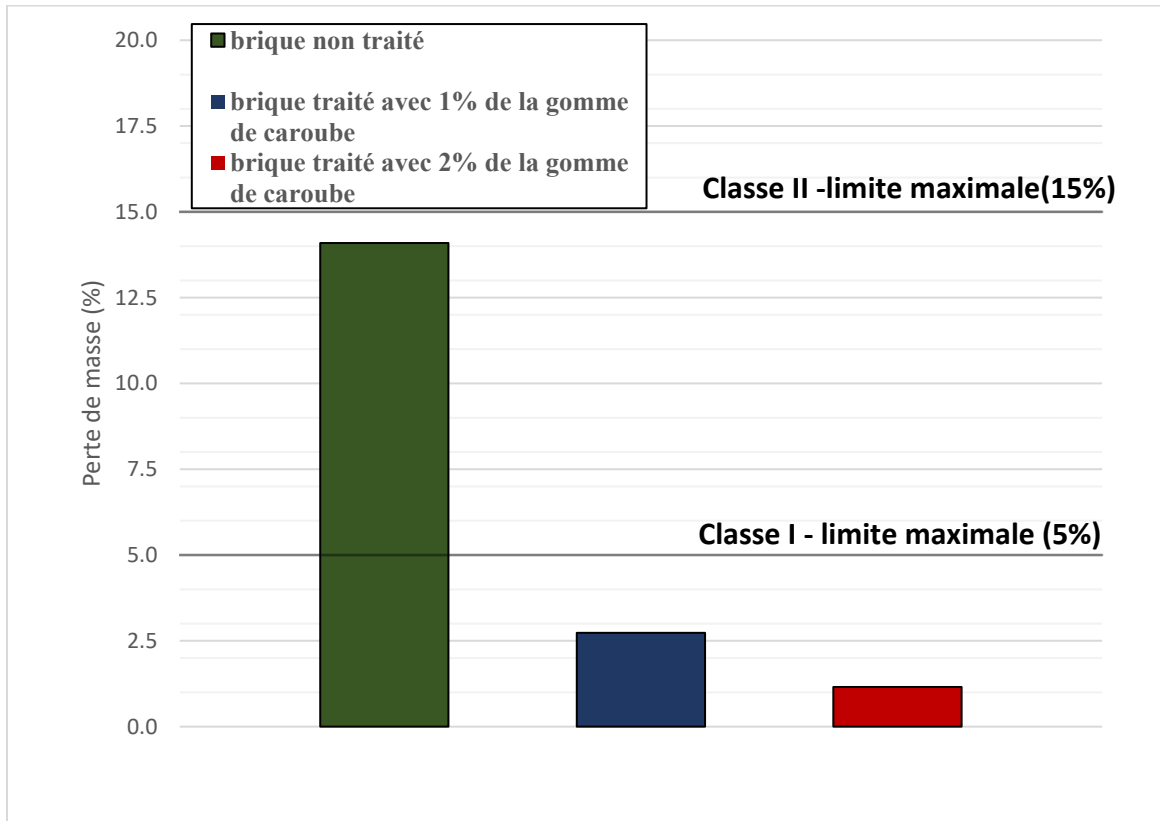


Figure VI. 8 Perte de masse pour toutes les briques après le Dip test.

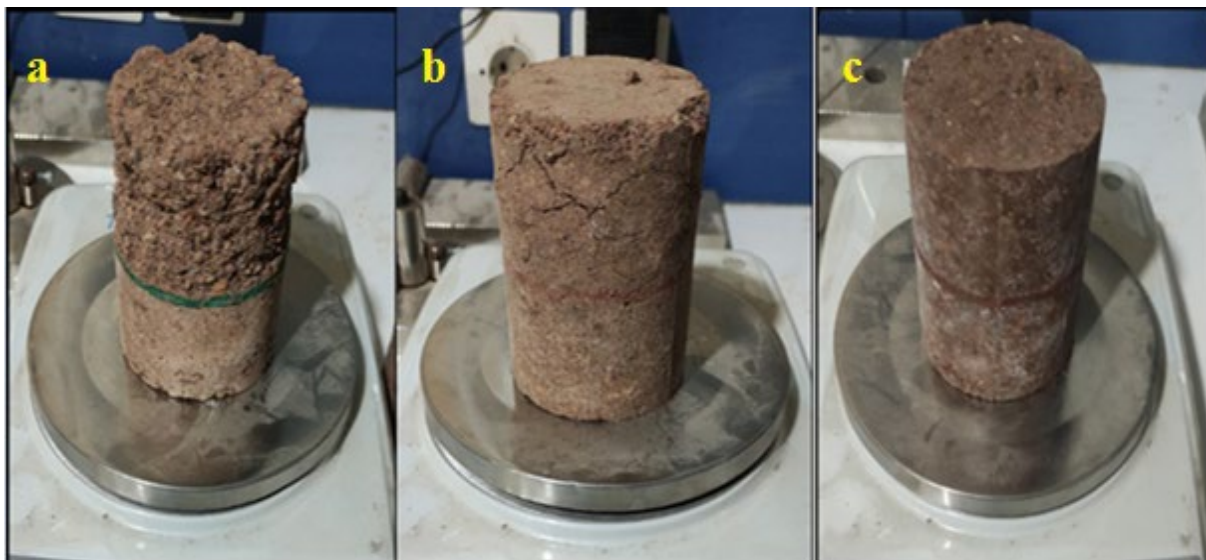


Figure VI. 9 Conditions des briques après l'essai Dip test : (a) brique non-traité, (b) brique stabilisée avec 1% de la gomme de caroube (c) brique stabilisée avec 2% de la gomme de caroube.

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a examiné les résultats des essais mécaniques et de durabilité effectués sur l'argile de Bendjerrah, qui a été traitée avec différents pourcentages de bio-liant, à savoir la gomme de caroube à 1% et 2%. L'analyse des essais mécaniques, tels que la résistance à la traction et la compression simple, a mis en évidence l'impact significatif de l'ajout de bio-liant sur les propriétés mécaniques du matériau. Les résultats ont démontré une amélioration notable de la résistance à la traction et à la compression avec l'augmentation du pourcentage de gomme de caroube.

De plus, les essais de durabilité, y compris la perte de masse et la profondeur d'érosion, ont fourni des informations cruciales sur la capacité du matériau à maintenir ses propriétés structurelles dans des conditions spécifiques. La réduction de la perte de masse observée pour les échantillons stabilisés au bio-liant a indiqué une meilleure résistance à l'immersion, tandis que la diminution de la profondeur d'érosion a témoigné de l'efficacité du bio-liant dans la préservation de la résistance du matériau à l'érosion.

Ainsi, Dans ce chapitre, les résultats présentés fournissent une base solide pour évaluer les avantages mécaniques et la durabilité accrue du sol traité avec des bio-liants, ouvrant la voie à des applications potentielles dans le domaine de la construction durable. Ces constatations constituent une contribution significative à la compréhension des performances du matériau traité et ouvrent la voie à de futures recherches visant à affiner et à optimiser l'utilisation de bio-liant pour améliorer les caractéristiques des matériaux de construction à base de terre.

Conclusion générale et perspective

Cette étude vise à proposer la terre crue, et plus spécifiquement les briques en terre compressée stabilisées avec un bio-liant, comme une alternative écologique et durable aux matériaux de construction traditionnels.

En examinant les possibilités offertes par les bio-liants et la stabilisation des briques en terre compressée, cette recherche met en lumière le potentiel considérable de ce matériau pour répondre aux défis contemporains de durabilité environnementale dans le domaine de la construction. En favorisant l'utilisation de ressources naturelles renouvelables et localement disponibles, cette approche cherche à réduire l'empreinte carbone associée aux processus de fabrication et de transport des matériaux de construction, tout en assurant la durabilité et la résilience des structures construites. En proposant une alternative respectueuse de l'environnement aux matériaux de construction conventionnels, cette étude ouvre la voie à un avenir où la terre crue et les briques en terre compressée stabilisées avec des bio-liants joueront un rôle central dans la construction d'un environnement bâti plus durable et résilient.

Dans la section de revue bibliographique, nous avons mis en évidence l'attrait de la construction en terre crue dans les pratiques contemporaines de construction, en raison de son empreinte environnementale réduite, de son accessibilité aux communautés à faible revenu, et de sa capacité intrinsèque à fournir un confort thermique naturel dans les habitats. Nous avons également abordé les défis majeurs liés à ce matériau, notamment en ce qui concerne sa résistance à l'eau et ses propriétés mécaniques, qui souvent nécessitent une stabilisation. De plus, nous avons identifié les bio-liants potentiels, tels que les polysaccharides, les protéines et d'autres composés organiques, comme des alternatives à explorer dans le cadre de cette étude.

Une revue de la plupart des techniques de stabilisation de la terre crue implique l'utilisation de liants minéraux notamment le ciment et la chaux a été conduite. L'association de la construction en terre crue avec l'utilisation astucieuse de bio-liants et la stabilisation à l'aide de bio-liants représente une voie prometteuse vers des pratiques de construction durables et plus respectueuses de l'environnement. Cette approche positionne ce matériau comme un choix attrayant pour des projets de construction responsables. Cette étude vise à encourager l'utilisation de matériaux locaux pour la fabrication de BTC stabilisées avec des bio-liants, ouvrant ainsi la voie à des pratiques de construction plus innovantes et durables. L'avenir de la construction en terre dépend d'une approche intégrée combinant tradition et recherche

scientifique, favorisant des solutions constructives éthiques et adaptées aux défis environnementaux actuels.

De cet état de l'art, nous avons défini les objectifs de notre travail. Dans un premier temps, nous avons restreint le taux d'incorporation de bio-liant à 2% en poids. Ensuite, notre démarche a consisté à sélectionner parmi différents produits des bio-liants prometteurs pour la stabilisation de la terre crue. La disponibilité locale, le coût et la résistance à la compression simple ont été les critères d'évaluation principaux. Pour ce faire, nous avons choisi le sol provenant de la briqueterie de Ben Djerrah en raison de son utilisation courante dans la fabrication de briques en terre cuite et de sa haute teneur en argile, des caractéristiques qui en font un candidat idéal pour les briques en terre compressée. L'objectif principal était de développer des briques en terre compressée stabilisée avec un impact environnemental réduit. Nous avons également visé à obtenir des résistances à la compression supérieure au minimum de 1,6 MPa recommandé par les normes de BTC. Enfin, nous avons cherché à garantir que la stabilisation à faible taux de liants préserve les performances mécaniques des briques en terre crue.

Pour choisir un bio-liant efficace, nous avons mené une étude préliminaire sur les liants organiques, en nous concentrant principalement sur trois bio-liants disponibles localement : la caséine, l'amidon et la gomme de caroube. Après avoir évalué leur disponibilité et leur coût de production, nous avons procédé à des essais de compression simple afin d'analyser leur capacité de stabilisation. Cette étape a révélé une variation d'efficacité de certains liants avec le même type de sol, remettant parfois en question les données de la littérature. Suite à ces analyses, nous avons identifié la gomme de caroube comme un candidat prometteur, dont nous avons procédé à l'extraction nous-mêmes.

Parallèlement, nous avons minutieusement décrit les procédures de caractérisation du sol, soulignant leur importance cruciale dans la classification et la vérification de la conformité du sol en tant que matériau de base pour la fabrication des briques en terre comprimée. Les résultats des essais géotechniques, incluant la granulométrie, les limites d'Atterberg et la valeur de bleu de méthylène, ont permis de classer le sol de Ben Djerrah selon les normes GTR et LCPC. Les analyses chimiques ont confirmé la classification du sol, avec une prédominance de quartz représentant le sable, ainsi que la présence de minéraux argileux de type Kaolinite. Plus, la vérification du sol selon les normes spécifiques aux Blocs de Terre Compressée (BTC) en termes de granulométrie, compactage, plasticité et la résistance à la compression simple a

démonstré que le sol BD peut être judicieusement retenu comme matériau de base pour la fabrication des briques en terre compressée.

L'impact du dosage en bio-liants et le temps de cure sur les caractéristiques mécaniques et la résistance à l'eau des Blocs de Terre Compressée (BTC) a été minutieusement étudié à travers une série d'essais, notamment la compression simple, le test de suintement (Drip test) et le test d'immersion (Dip test), en utilisant de la gomme de caroube à différentes proportions telles que 1% et 2%. Les analyses des essais mécaniques, comprenant la compression non confinée et la flexion à trois points, ont révélé l'impact significatif de l'incorporation de bio-liants sur les propriétés mécaniques du matériau. Les résultats ont mis en évidence une augmentation notable de la résistance moyenne à la compression en fonction du dosage de bio-liants, passant de 1,6 MPa à 28 jours de durcissement pour le traitement à 1% de gomme de caroube, à 2,2 MPa pour le traitement à 2%. De plus, une amélioration de la résistance à la flexion de 0,20 MPa à 0,41 MPa a été observée après 28 jours de durcissement pour les échantillons non traités et traités respectivement avec 2% de gomme de caroube.

En outre, les évaluations de durabilité, incluant la perte de masse et la profondeur d'érosion, ont fourni des données essentielles sur la capacité du matériau à maintenir son intégrité structurelle dans des environnements spécifiques. La diminution de la perte de masse constatée pour les échantillons stabilisés avec le bio-liant a témoigné d'une amélioration de la résistance à l'immersion, tandis que la réduction de la profondeur d'érosion a souligné l'efficacité du bio-liant dans la préservation de la résistance du matériau à l'érosion.

Cette étude ouvre la voie à plusieurs perspectives intéressantes dans le domaine de la construction en terre crue stabilisée avec des bio-liants. Tout d'abord, il serait souhaitable d'évaluer l'impact des bio-liants sur les propriétés hygrothermiques des BTC, en examinant comment ces matériaux réagissent aux variations de température et d'humidité. En comprenant mieux ces interactions, nous pourrions optimiser la performance thermique et la résistance à l'humidité des constructions en terre crue, ce qui pourrait conduire à des bâtiments plus durables et éco-énergétiques. De plus, explorer les possibilités d'association entre les bio-liants et d'autres matériaux naturels pourrait ouvrir de nouvelles voies pour des techniques de construction durables et respectueuses de l'environnement. Ainsi que le développement d'outils d'analyse plus précis pour étudier les mécanismes à l'échelle microscopique. Enfin, l'application potentielle de cette technologie dans des contextes divers, tels que les zones rurales ou les régions sujettes aux catastrophes naturelles, mérite également une attention particulière, car elle

pourrait offrir des solutions de logement abordables et adaptées à ces environnements spécifiques. En outre, il serait pertinent d'étudier l'effet du séchage et de l'humidification sur les briques en terre stabilisée à long terme, afin de comprendre comment ces matériaux se comportent dans des conditions réelles sur une période prolongée. De même, l'exploration des effets du mélange de différents bio-liants, tels que la gomme de caroube et l'xanthane ou la gomme de guar, pourrait offrir des possibilités de formulation plus adaptées aux besoins spécifiques de construction. Enfin, l'ajout de différents types de fibres pour améliorer la résistance à la flexion des BTC constitue une autre piste prometteuse à explorer, permettant ainsi de renforcer davantage ces structures et d'élargir leur champ d'application

Référence

- [1] H. Benouali, "La réglementation technique algérienne de construction avec les matériaux locaux. Conférence internationale ARChiterre-Algérie, Chercheur au CNERIB.," 2015.
- [2] H. Houben, H. Guillaud, CRAtterre, and I. T. Publications, *Earth construction : a comprehensive guide*. Warwickshire SE - xiv, 362 pages : illustrations, maps ; 25 cm.: Practical Action Publishing Warwickshire, 1994. doi: LK - <https://worldcat.org/title/950918148>.
- [3] H. Van Damme and H. Houben, "Earth concrete. Stabilization revisited," *Cem. Concr. Res.*, vol. 114, pp. 90–102, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.035>.
- [4] B. SERBAH, "Cartographie des sédiments de dragage des barrages de l'ouest Algérien : Une solution de valorisation en BTC," 2018.
- [5] M. Dewulf, "Le torchis, mode d'emploi," 2015.
- [6] E. W. Smith' and G. S. Austin, "New Mexico Bureau of Mines & Mineral Resources Adobe, pressed-earth, and rammed-earth industries in New Mexico (revised edition)," vol. 537, 1996.
- [7] O. Reman, "Increasing the Strength of Soil for Adobe Construction," *Archit. Sci. Rev.*, vol. 47, no. 4, pp. 373–386, Dec. 2004, doi: 10.1080/00038628.2000.9697547.
- [8] K. A. Heathcote, "An investigation into the erodibility of earth wall units." 2002.
- [9] S. Deboucha and R. Hashim, "A review on bricks and stabilized compressed earth blocks," *Sci. Res. Essays*, vol. 6, no. 3, pp. 499–506, 2011, doi: 10.5897/SRE09.356.
- [10] D. Gelard, "Identification et caractérisation de la cohésion interne du matériau terre dans ses conditions naturelles de conservation. Thèse de doctorat institut national Polytechnique de GRENOBLE," 2005.
- [11] H. et H. G. H., "Traite de construction en terre. Parenthèses, 2006 (3eme Edition).," 2006.
- [12] NMAC 14.7.4, "NMAC 14.7.4 New Mexico Earthen Building Materials Code," 2000.
- [13] AFNOR XP and P13-901, "Compressed earth blocks for walls and partitions: definitions – Specifications – Test methods – Delivery acceptance conditions, Saint-Denis La Plaine Cedex," 2001.
- [14] NZS 4298, "Materials and workmanship for earth buildings. Materials and workmanship for earth buildings," *Stand. New Zeal.*, vol. 4298, 1998.
- [15] M. C. Jiménez Delgado and I. C. Guerrero, "The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 2, pp. 237–251, 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006.
- [16] A. R. O. for S. (ARSO)., "Compressed Earth Blocks. Brussels: CDI." 1996.
- [17] Cpe. Dr Peter Walker MIEAust, And, and S. Australia, "Australian Earth Building," 2002.
- [18] Bulletin 5-1992, "Recommandations de granularité pour chaque technique *Recommandations générale qualitative pour la granularité.," 1992.
- [19] O. régionale africaine de Normalisation, "Blocs de terre comprimée normes.," *Technol. n° 11. CDI CRAtterre-EAG, Belgique*, pp. 1–9, 1998.
- [20] Crat.- Vincent Rigassi, "ISBN 3-528-02081-4 Blocs de terre comprimée_BTC_Manuel_de_production.pdf." 1995.
- [21] AFNOR, "Xp P13-901," *Afnor*. Saint-Denis La Plaine Cedex: AFNOR, 2001, 2001.
- [22] H. Houben and H. Guillaud, *Modernité de l'architecture de terre en Afrique To cite this version : HAL Id : hal-03161985*. 1989.

- [23] A. Vissac, A. Bourgès, D. Gandreau, and R. Anger, *construction en terre To cite this version : les stabilisants naturels pour*. 2018.
- [24] lubin-germain, "chimie organique en 27 fiches, dunod. ed. magnan, j.-p., 1997. description, identification et classification des sols 21.," 2016.
- [25] P. Etiévant, V. Gros, and P. Feillet, "Chapitre 4 : Des additifs pour texturer des aliments," *La Chim. l'alimentation*, pp. 83–100, 2021, doi: 10.1051/978-2-7598-0917-2.c007.
- [26] R. Anger and L. Fontaine, "Interactions argiles/ biopolymères : Patrimoine architectural en terre et stabilisants naturels d'origine animale et végétale," p. 585, 2013.
- [27] M. Ali, M. Aboelfadl, A. Seliem, H. Khalil, and G. Elkady, "Chitosan nanoparticles extracted from shrimp shells, application for removal of Fe(II) and Mn(II) from aqueous phases," *Sep. Sci. Technol.*, vol. 53, Jul. 2018, doi: 10.1080/01496395.2018.1489845.
- [28] R. Srinivasan, "Natural Polysaccharides as Treatment Agents for Wastewater," *RSC Green Chem.*, pp. 51–81, Sep. 2013, doi: 10.1039/9781849735001-00051.
- [29] A. Ravve, *Principles of polymer chemistry, third edition*. 2012. doi: 10.1007/978-1-4614-2212-9.
- [30] J. K. A. 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," no. Lmdc, p. 168, 2019.
- [31] J. Brigando, L. A. Caséine, E. T. Ses, D. Plastiques, L. Lait, and I. Editions, "Jeanne Brigando To cite this version : HAL Id : hal-00927843," vol. 21, pp. 17–28, 1941.
- [32] H. Fatehi, S. M. Abtahi, H. Hashemolhosseini, and S. M. Hejazi, "A novel study on using protein based biopolymers in soil strengthening," *Constr. Build. Mater.*, vol. 167, pp. 813–821, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.028.
- [33] G. O. Phillips and P. A. Williams, *Handbook of hydrocolloids / edited by G.O. Phillips and P.A. Williams.*, 2nd ed. Boca Raton, FL : Cambridge : CRC Press , 2009.
- [34] G. Minke, "Building with earth: design and technology of a sustainable architecture, 2006," *Recuper. el*, vol. 3, 2009.
- [35] H. Danso, B. Martinson, M. Ali, and C. Mant, "Performance characteristics of enhanced soil blocks: a quantitative review," *Build. Res. Inf.*, vol. 43, no. 2, pp. 253–262, Mar. 2015, doi: 10.1080/09613218.2014.933293.
- [36] J. C. Morel, A. Pkla, and P. Walker, "Compressive strength testing of compressed earth blocks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 2, pp. 303–309, 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021.
- [37] J. E. Aubert, P. Maillard, J. C. Morel, and M. Al Rafii, "Towards a simple compressive strength test for earth bricks?," *Mater. Struct.*, vol. 49, no. 5, pp. 1641–1654, 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0601-y.
- [38] R. Alavéz-Ramírez, P. Montes-García, J. Martínez-Reyes, D. C. Altamirano-Juárez, and Y. Gochi-Ponce, "The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 34, pp. 296–305, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072>.
- [39] S. Omar Sore, A. Messan, E. Prud'homme, G. Escadeillas, and F. Tsobnang, "Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso," *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, pp. 333–345, 2018, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.051>.

- [40] K. M. A. Hossain and L. Mol, "Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 8, pp. 3495–3501, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.042>.
- [41] A. Seco, P. Urmeneta, E. Prieto, S. Marcelino, B. García, and L. Miqueleiz, "Estimated and real durability of unfired clay bricks: Determining factors and representativeness of the laboratory tests," *Constr. Build. Mater.*, vol. 131, pp. 600–605, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.107>.
- [42] R. Bahar, M. Benazzoug, and S. Kenai, "Performance of compacted cement-stabilised soil," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 7, pp. 811–820, 2004, doi: [10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003).
- [43] I. Alam, A. Naseer, and A. A. Shah, "Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas," *Constr. Build. Mater.*, vol. 77, pp. 154–159, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.046>.
- [44] A. Pinel, "Transition liquide-solide dans des dispersions d'argiles contrôlée par un biopolymère : Application à la construction en terre To cite this version : HAL Id : tel-01920833 Transition liquide-solide dans des dispersions d'argiles contrôlée par un biopo," 2018.
- [45] C. Guerrieri, Ed., "Characterization of compressed earth blocks built with natural low-cost energy stabilizers," 2012, pp. 125-130 illus.
- [46] A. A. R. Corrêa, L. M. Mendes, N. P. Barbosa, T. de P. Protásio, N. de A. Campos, and G. H. D. Tonoli, "Incorporation of bamboo particles and 'synthetic termite saliva' in adobes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 250–256, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.009>.
- [47] D. Manu, "Strength and Durability Properties of Cow Dung Stabilised Earth," vol. 3, no. 13, pp. 117–126, 2013.
- [48] B. Sorgho *et al.*, "Strength and creep behavior of geomaterials for building with tannin addition," *Mater. Struct.*, vol. 47, no. 6, pp. 937–946, 2014, doi: [10.1617/s11527-013-0104-7](https://doi.org/10.1617/s11527-013-0104-7).
- [49] BENGHIDA Tarek., "THEME : Situation de la filière lait en Algérie," 2021.
- [50] I. Batlle, *Carob tree: Ceratonia siliqua L.-Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 17.*, vol. 17. Bioersivity International, 1997.
- [51] F. S. Calixto and J. Cañellas, "Components of nutritional interest in carob pods (*Ceratonia siliqua*)," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 33, no. 12, pp. 1319–1323, Dec. 1982, doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740331219>.
- [52] P. Dakia, B. Wathélet, and M. Paquot, "Isolation and chemical evaluation of carob (*Ceratonia siliqua* L.) seed germ," *Food Chem.*, vol. 102, pp. 1368–1374, Dec. 2007, doi: [10.1016/j.foodchem.2006.05.059](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.05.059).
- [53] P. Feillet and T. M. Roulland, "Caroubin: A Gluten-like Protein Isolated from Carob Bean Germ," *Cereal Chem.*, vol. 75, no. 4, pp. 488–492, Jul. 1998, doi: <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1998.75.4.488>.
- [54] AFNOR French-Standards-NFP94-093, "Sols : reconnaissance et essais - Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol : essai Proctor normal, essai Proctor modifié," 1993.
- [55] AFNOR French-Standards-NFP94-057, "Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols – Méthode par sédimentation.," 1992.

- [56] AFNOR French-Standards NFP94-051., “Norme française. Sols: reconnaissance et essais. Détermination des limites d’Atterburg: limite de liquidité la coupelle, limite de plasticité au rouleau, NF P 94-051. AFNOR, pp. 15.,” no. mm, pp. 7–9, 1993.
- [57] N. anglaises S. BSI, “BS 1377:2,” 1990.
- [58] A.-T. : E. DES TERRASSEMENTS, “NF P 94-068 NORMALISATION ISSN: 0335-3931,” 1993.
- [59] AFNOR, “P94-047 Teneur en Matière Organique Par Calcination,” 1998.
- [60] AFNOR, “(NF ISO 10390 Mai 2005 / X31-117) Qualité du sol - Détermination du pH,” 2005.
- [61] D. ASTM, “2166. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil,” *West Conshohocken, PA, United States*, 2016.
- [62] S. A. of Zimbabwe, “Norme-SAZS-724,” 2012.
- [63] A. Weisz, A. Kobe, A. M. McManus, and A. Nataatmadja, “Durability of Mudbrick–Comparison of Three Test methods,” in *Proceeding of the 4th Australian Masonry Conference, Sydney*, 1995, pp. 249–258.
- [64] V. N. Nguyen, “Caractérisation de l’érosion des sols par le Jet Erosion Test.” Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris, 2014.
- [65] Nguyen. V. N., “Application of Drip test for study the erosion of earthen wall by rain fail-case of le havre area,” 2015.
- [66] DIN 18945, “Earth Blocks – Terms and Definitions, Requirements, Test Methods.,” *Dtsch. Inst. für Normung.*, 2013.
- [67] AFNOR French-Standards-XP-P94-041, “Sols : reconnaissance et essais – Identification granulométrique. Méthode de tamisage par voie humide.,” 1995.
- [68] B. Chassefiere and A. Monaco, “Corrélations entre la minéralogie, la teneur en matière organique et les limites d’Atterberg d’argiles marines,” *Mar. Geol.*, vol. 74, no. 3, pp. 225–235, 1976, doi: [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(87\)90052-1](https://doi.org/10.1016/0025-3227(87)90052-1).
- [69] M. Moevus, R. Anger, and L. Fontaine, “Hygro-Thermo-Mechanical Properties of Earthen Materials for Construction : a Literature Review,” *Terra 2012*, pp. 1–10, 2012.
- [70] S. Muguda *et al.*, “Mechanical properties of biopolymer-stabilised soil-based construction materials,” *Géotechnique Lett.*, vol. 7, no. 4, pp. 1–18, 2017.
- [71] R. Eko, E. Offa, T. Ngatcha, and L. Seba Minsili, “Potential of salvaged steel fibers for reinforcement of unfired earth blocks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 340–346, Oct. 2012, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2011.11.050](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.050).
- [72] G. J. Frencham, “The performance of earth buildings,” *Deakin Univ. Geelong*, 1982.
- [73] B. Serbah, N. Abou-Bekr, S. Bouchemella, J. Eid, and S. Taibi, “Dredged sediments valorisation in compressed earth blocks: Suction and water content effect on their mechanical properties,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 158, pp. 503–515, 2018, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2017.10.043](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.043).