

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : GEOTECHNIQUE

Présenté par : HAMD AOUI Salah

*Thème : étude du comportement mécanique et durabilité des briques
en terre crue*

Sous la direction de : Pr. NOUAOURIA Mohamed Salah

Juin 2023

Remerciement

Tout d'abord, je remercie mon Dieu le **TOUT-PUISSANT**, le Très **MISERICORDIEUX**, qui m'a donné la force et la patience de terminer le parcours académique après une rupture de plusieurs années.

C'est avec grand plaisir que nous réservons ces quelques lignes en signe de gratitude et d'appréciation à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de recherche.

Ce travail a été réalisé grâce à l'apport scientifique et aux encouragements de M. Pr **NOUAOURIA Mohammed Salah**, qui a tout d'abord accepté de me encadrer et de me guider tout au long de cette recherche. Il a toujours été disponible, attentif à mes nombreuses questions, et toujours intéressé par l'avancée de mon travail. Mes profonds respects et mes sincères remerciements pour votre dévouement et votre présence au quotidien.

Mes remerciements vont également **NOUAOURIA Abd Elssalam** qui, grâce à lui, j'ai pu avoir la matière première de cette recherche. Et d'avoir encouragés à aller en avant et son aide surtout dans la phase expérimental.

Mes remerciements vont également à toute le Staff Académique du Département de Génie Civil et Hydraulique a l'Université de 8 mai 1945.

Mes remerciements vont également à toute l'équipe administrative de l'université 8 mai 1945.

DEDICACE

A la mémoire de de mon père.... Allah yarhmou.

A ma chère mère ...Rabi yahfedha.

*A ma chère femme... ma source de sacrifice et de soutenance.
source de tendresse et d'amour.*

A mes chères filles.. Acil et Rama mon espoir de vie.

A mes frères.. Riad, Sofiane et Walid.

A mes sœurs .. naima, radja et hasna.

*A tous ceux qui ont participé de loin ou de pré.
a la réalisation de ce travail.*

Résumé

Dans le cadre d'équilibre entre la lutte contre la pollution environnementale et le développement de la construction en terre crue à base de kaolin de djebel debagh, nous avons besoin d'une véritable alternative pour réduire la part des émissions de CO₂ et eu même temps une révolution dans le secteur de la construction avec des matériaux écologiquement propres. Dans cet objectif, ce matériau trouvé en abondance doit pouvoir justifier de bonnes résistances à la compression simple et d'une tenue à l'eau convenable dans des conditions particulièrement sévères qu'imposent dans la nature.

Le présent travail vise la valorisation de la construction en terre crue en général et l'utilisation de la brique en terre comprimé en particulier.

Une étude bibliographique a été réalisée sur les différents types de construction en terre crue et leurs principales techniques constructives.

Après avoir abordé d'une façon détaillée la technique de construction en brique en terre crue, les différentes normes qui se rapportent à la construction en terre en général et les brique en terre crues en particulier. Nous avons exposées une étude expérimentale a été menée afin d'étudier la granulométrie, la plasticité, la résistance a la compression simple et la durabilité des briques en terre crue stabilisée. La caséine a été utilisée comme un adjuvant stabilisateur.

Mots clé : Kaolin, brique en terre crue (BTC), brique en terre comprimé stabilisé (BTCS), construction en terre, compression simple, durabilité.

ملخص

ملخص

في اطار التوازن بين محاربة التلوث البيئي و تطوير البناء الترابي , (كاولين جبل دباغ) , نحن بحاجة لبديل فعال من اجل التقليل من انبعاث غاز ثاني اكسيد الكربون , و كذلك ثورة في مجال البناء بمواد صديقة للبيئة , وفي هذا السياق هاته المادة الموجودة بوفرة لابد ان تثبت مقاومة فعالة للضغط و الماء في ظل الظروف القاسية التي تفرضها الطبيعة.

يهدف هذا العمل الى تعزيز البناء بالتربة بشكل عام و البناء بالطوب الترابي بشكل خاص.

تم انجاز دراسة بيبلوغرافية على مختلف انواع البناء الترابي و كذا التقنيات المستعملة.

بعد ذلك تم التطرق بشكل مفصل حول تقنيات البناء و المعايير التي تدخل في استخدام تقنية البناء الترابي بشكل عام و البناء بالطوب الطيني المضغوط بشل خاص. قمنا بدراسة تجريبية على عينة و تمت دراسة الجزيئات الحبيبية, المرنة, مقاومة الضغط البسيط و استدامة الطوب الترابي المضغوط المثبت . تم استعمال الكازيين كمعزز تثبيت

الكلمات المفتاحية : الكاولين ، الطوب الترابي المضغوط (BTC) ، الطوب الترابي المضغوط و المثبت (BTCS) ، البناء الترابي ، الضغط البسيط ، الاستدامة.

Abstract

As part of the balance between the fight against environmental pollution and the development of raw earth construction based on kaolin from djebal debagh, we need a real alternative to reduce the share of CO2 emissions and at the same time a revolution in the construction sector with ecologically clean materials. For this purpose, this material found in abundance must be able to justify good resistance to simple compression and a suitable water resistance under particularly severe conditions imposed in nature.

This work aims to enhance the value of raw earth construction in general and the use of compressed earth brick in particular.

A bibliographic study was carried out on the different types of construction in raw earth and their main construction techniques.

After having approached in a detailed way the technique of construction in raw earth brick, the various standards which relate to the construction in earth in general and the raw earth brick in particular. We have exposed an experimental study was conducted to study the grain size, plasticity, resistance to simple compression and durability of stabilized raw earth bricks. Casein was used as a stabilizing adjuvant.

Keywords: Kaolin, compressed earth block (CEB), compressed stabilized earth blocks (CSEBs), Earthen construction, simple compression, durability.

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE

Introduction Générale.....	1
CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA CONSTRUCTION EN TERRE CRUE	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Les constructions en terre crue dans le monde.....	5
I.3 La construction en bloc de terre en Algérie.....	7
I.4. Les techniques de construction en terre.....	9
I.4.1 Terre découpée.....	10
I.4.2 Terre coulée.....	11
I.4.3 Superadobe.....	12
I.4.4 Adobe.....	12
I.4.5 Épi.....	13
I.4.6 Le pisé.....	14
I.4.7 Le torchis.....	14
I.4.8 Terre façonnée.....	15
I.4.9 La bauge.....	16
I.4.10 La brique de terre compressée.....	16
I.5 Impact environnemental, avantage et inconvénient de la construction en terre crue...19	
I.6 Normes et Critères de choix des matériaux.....	20
I.6.1 Introduction.....	20
I.6.2 Utilisation des normes.....	20
I.6.3 Normes propres aux briques de terre comprimée (BTC).....	22
I.6.4 Critères de choix des matériaux.....	23
I.6.4.1 La distribution granulométrique.....	23
I.6.4.2 Les limites d'Atterberg.....	25
I.6.4.3 La plasticité.....	25
I.6.4.4 Compactage.....	26
I.6.4.5 La résistance à la compression simple.....	27
CONCLUSION.....	27
CHAPITRE II : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES TECHNIQUES DE STABILISATION.	
II.1 Introduction.....	29
II.2 Les techniques de stabilisation.....	29
II.2.1 Stabilisation mécanique.....	32
II.2.1.1 Stabilisation par compactage.....	32
II.2.1.2 Stabilisation par vibration.....	32
II.2.1.3 Stabilisation par matériaux de renforcement.....	33
II.2.1.4 Avantages de la stabilisation mécanique.....	33
II.3 La stabilisation aux liants classiques.....	34
II.3.1 La stabilisation aux liants minéraux.....	34
II.3.1.1 Stabilisation au ciment.....	34
II.3.1.2 Stabilisation à la chaux.....	36
II.3.1.3 Stabilisation avec des liants minéraux alternatifs.....	37
II.3.2 La stabilisation aux liants organiques.....	38
II.3.2.1 Stabilisation aux Fibres naturelles.....	38
1) Fibres animales.....	38

TABLE DES MATIERES

2) Fibres végétales.....	39
II.3.2.2 Stabilisation aux biopolymère.....	39
1) Polysaccharides.....	39
a) Amidon.....	39
b) Chitine.....	40
c) Cellulose.....	40
2) lipides.....	41
a) Mucilage.....	41
b) Cire.....	42
c) Huile de lin.....	42
3) Protéines.....	43
a) L'ovalbumine.....	44
b) L'albumine du sang.....	44
c) Caséine.....	44
II.3.2.2.1 éclaircissement sur l'utilisation de la caséine.....	45
II.3.2.2.2 Précipitation de la caséine après ajout d'acide	46
II.3.2.2.3 Production de Caséine.....	46
II.3.2.2.4 Utilisation de la caséine en géotechnique.....	47
II.3.3 Effet sur les résistances mécaniques.....	48
CONCLUSION	50
CHAPITRE III : IDENTIFICATION DU SOL ET VERIFICATION AVEC NORME B.T.C	
III Introduction.....	53
III.1 Matériaux étudiés.....	53
III.1.1 le kaolin.....	53
III.1.2 Situation géographique.....	54
III.1.3 Collecte de l'échantillon.....	54
III.2 Essais d'identification.....	54
III.2.1 Examen visuel.....	55
III.3 .2 Essai au toucher.....	55
III.3.3 Analyse granulométrique par lavage et sédimentométrie selon les normes NF P18-560 et NF P94-057.....	55
III.3.4 Essai au bleu de méthylène Conforme NF P 94-068.....	58
III.3.5 Limites d'Atterberg (NORME NF P 94-051).....	60
1) Limite de liquidité (WL).....	60
2) Limite de plasticité (WP).....	62
III.3.6 Limite de Retrait linéaire LR la norme BS 1377.....	64
III.3.7 L'essai Proctor selon la norme NF 94-093.....	65
III.3.7.1 Essai Proctor normal.....	67
III.3.7 .2 Essai de Proctor modifié.....	67
III.4 Rang d'échantillon du sol naturel par rapport aux recommandations du BTC.....	69
III.4.1 Rang par rapport aux normes de la granulométrie.....	69
III.4.2 Rang par rapport aux normes des limites d'Atterberg.....	70
III.4.3 Rang par rapport aux normes du compactage.....	71
III.5 Conclusion sur l'utilisation du sol naturel (SN) dans les BTC.....	72
CHAPITRE IV : COMPORTEMENT MECANIQUE ET DURABILITE DE LA BTC	
IV Introduction.....	76
IV.1 Produit de traitement utilisé	76

TABLE DES MATIERES

IV.2 Essai de compression simple (ISO 17892-7:2017)	77
IV.3 Durabilité et érosion de surface.....	80
IV.3.1 Érosion de surface.....	81
IV.3.2 Drip Test (Essai de goutte à goutte selon La norme NZS 4298).....	81
IV.3.2.1 Mesure de la profondeur d'érosion des gouttes.....	82
IV.3.3 dip test (Essai immersion selon La norme DIN 18945).....	85
IV.3.3.1 Résultats.....	86
CONCLUSION.....	87

Liste Des Figures

<i>Figures</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
Chapitre I		
Fig 1.1	Arche de Ctésiphon en Irak	4
Fig 1.2	Ville de Shibam au Yémen	4
Fig 1.3	Palais du Potala	5
Fig 1.4	Cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou	5
Fig 1.5	Architecture en terre crue dans le monde	6
Fig 1.6	Bâtiments en terre au Yémen	7
Fig 1.7	Grande Mosquée de Djenné au Mali	7
Fig 1.8	Timimoun Au Désert Algérien	9
Fig 1.9	Région du Touat	9
Fig 1.10	La Roue Des Techniques De Construction En Terre	10
Fig 1.11	De la Pierre Découpée	11
Fig 1.12	Extraction de blocs en Terre Découpée	11
Fig 1.13	Travaux coulage de la terre	11
Fig 1.14	Construction en Superadobe	12
Fig 1.15	Superadobe en Dômes	12
Fig 1.16	Façonnage de la Adobe	13
Fig 1.17	La technique de l'épi	13
Fig 1.18	Compactage des couches de terre crue à l'aide d'un pilon	14
Fig 1.19	Mur en Torchis	15
Fig 1.20	Façonnage directement la Terre	15
Fig 1.21	contrôle du retrait	15
Fig 1.22	Mélangé Sol Argileux et la Paille	16
Fig 1.23	Panneaux Muraux	16
Fig 1.24	Confection d'une Brique Comprimé	17
Fig 1.25	brique comprimé stabilisés	17
Fig 1.26	Processus de production (BTC)	18
Fig 1.27	Fuseaux de courbes granulométriques conseillées pour construire en BTC, en Pisé ou en adobe (BTM = Brique de Terre Moulée) selon la [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], CRATerre-EAG [1998], MOPT [1992] (Jiménes et Guerrero, 2007).	24
Fig 1.28	Fuseaux de plasticité conseillées pour construire en BTC, en Pisé ou en BTM selon la norme française [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], CRATerre-EAG [1998] et Houben and Guillaud [1989]. (Jiménes et Guerrero, 2007)	25
Fig 1.29	Fuseaux de compactage recommandés pour construire en BTC, en Pisé ou en Adobe selon Houben and Guillaud [1994].	26
Fig 1.30	Résistance à la compression des matériaux terreux (Van-Damme et Houben, 2017).	27
Chapitre II		
Fig 2.1	presse manuel	30
Fig 2.2	presse mécanique	30

LISTE DES FIGURES

Fig 2.3	stabilisants chimiques avec la chaux	31
Fig 2.4	stabilisants chimiques avec le ciment	31
Fig 2.5	stabilisation physique avec le mélange de fibres	31
Fig 2.6	amélioration à la fissuration	31
Fig 2.7	Compactage des couches de terre crue à l'aide d'un pilon	32
Fig 2.8	Compactage des couches de terre crue à l'aide d'une aiguille vibrante	32
Fig 2.9	Stabilisation par fibres	33
Fig 2.10	Fibres animales	39
Fig 2.11	Fibres végétales	39
Fig 2.12	amidon glucide	40
Fig 2.13	chitine à base d'insecte	40
Fig 2.14	Cellulose	40
Fig 2.15	Le mucilage	42
Fig 2.16	La cire	42
Fig 2.17	huile de graines de lin	42
Fig 2.17	L'ovalbumine a base de blanc d'œuf	44
Fig 2.18	L'albumine sanguine	44
Fig 2.19	caséine dans le lait	44
Fig 2.20	Les molécules de caséines	44
Fig 2.21	processus de production de la caséine	44
Chapitre III		
Fig 3.1	échantillon de kaolin	53
Fig 3.2	vue aérienne du gisement	54
Fig 3.3	Situation géographique du gisement	54
Fig 3.4	Collecte de l'échantillon	54
Fig 3.5	Matériel nécessaire pour essai proctor	56
Fig 3.6	Courbe granulométrique du sol étudié	58
Fig 3.7	Matériel nécessaire Essai au bleu de méthylène	58
Fig 3.8	Détermination de la valeur au bleu de méthylène du sol	59
Fig 3.9	Matériel nécessaire Limites d'Atterberg	61
Fig 3.10	Courbe Limite de liquidité	62
Fig 3.11	Abaque de Casagrande	64
Fig 3.12	Matériel nécessaire pour essais de Limite de Retrait linéaire	65
Fig 3.13	Matériel nécessaire pour essai Proctor	66
Fig 3.14	Courbes de l'essai Proctor normal et modifié	68
Fig 3.15	Rang de la courbe de distribution granulométrique de SN par rapport aux [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], [MOPT, 1992]	69
Fig 3.16	Rang de la courbe de distribution granulométrique de SN par rapport aux [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], [MOPT, 1992], [BTC (houben.H 1989, Rigassi1995)]	72
Fig 3.17	Rang de plan (LL, PI) du SN par rapport aux [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], [MOPT, 1992]	71
Fig 3.18	Rang compactage (OPN et OPM) du sol naturel (SN) par rapport à la zone recommandée pour les BTC.	74

LISTE DES FIGURES

<i>Chapitre IV</i>		
Fig 4.1	Echantillon de Caséine	77
Fig 4.2	Presse UNIFRAME	78
Fig 4.3	Moule en PVC pour confection d'éprouvette	79
Fig 4.4	Eprouvettes compactée et sceller dans papier film	79
Fig 4.5	Eprouvettes obtenues	79
Fig 4.6	Chargement de force pour l'essai de compression simple	79
Fig 4.7	Courbes des essais de compression	80
Fig 4.8	dispositif de goutte à goutte	82
Fig 4.9	Courbe Érosion Sol naturel	81
Fig 4.10	Courbe érosion Sol + 1 % de Caséine	81
Fig 4.11	Courbe érosion Sol + 2 % de Caséine	82
Fig 4.12	Histogramme des résultats de l'essai de goutte à goutte	82
Fig 4.13	dispositif d'essai d'immersion	84
Fig 4.14	Histogramme des résultats de l'essai d'immersion	85

Liste Des Tableaux

Liste Des Tableaux

Tableau	Titres	Pages
Chapitre I		
Tableau 1.2	Repères chronologiques de la construction en terre (C. Delbecq 2011).	7
Tableau 1.2	Les opérations de construction en terre en Algérie (Source : CNERIB, 2000)	8
Tableau 1.3	Les types de recommandations pour le choix des sols (Taleb Boulerbah, 2019).	21
Tableau 1.4	Les types de recommandations pour le choix des sols (Taleb Boulerbah, 2019).	22
Tableau 1.5	Les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé, BTC) (Hakkoum Soumia, 2015).	23
tableau 1.6	distribution granulométrique la norme française NF P18-560	24
tableau 1.7	les fourchettes de l'indice de plasticité	25
Chapitre II		
Tableau 2.1	Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées au ciment (fc: résistance à compression, n.m: non mesurée)	34
Tableau 2.2	Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées à la chaux	36
Tableau 2.3	Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées avec des liants minéraux alternatifs	37
Tableau 2-4	Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées avec des liants organiques	47
Chapitre III		
Tableau 3.1	d'Analyse granulométrique et sédimentométrie	57
Tableau 3.2	Résultat de l'essai au bleu de méthylène	59
Tableau 3.3	Classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène	60
Tableau 3.4	Limite de liquidité	62
Tableau 3.5	Limite de liquidité	63
Tableau 3.6	Etat du sol en fonction de l'indice de plasticité	63
Tableau 3.7	Limite de Retrait linéaire	65
Tableau 3.8	Résultats de l'essai Proctor Normal	67
Tableau 3.9	Résultats de l'essai Proctor modifié	68
Tableau 3.10	La teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale pour chaque essai	68
Tableau 3.11	Teneurs en eaux initiales et les poids volumiques secs maximales des BTC ([craterre 2012],[Jiménez et al. 2007],[Morel 2003],[Olivier, 1994]	71
Chapitre IV		
Tableau 4.1	Masse de chaque composant des mélanges sol - liant	76
tableau 4.2	Résultats des essais de compression	78
tableau 4.3	Résultats d'essais goutte à goutte	80
tableau 4.4	Résultats d'essais immersion	84

Notations et Symboles

Abréviation	Signification
ONU	Organisation des Nations Unies
DTR	Document Technique Réglementaire
CNERIB	Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment
AFNOR	Association Française de NORmalisation
ASTM	American Society for Testing and Materials
BTC	Briques de Terre Compressée
BTCS	Briques de Terre Compressée Stabilisée
SN	Sol Naturel
Wopt	La teneur en eau optimum.
VBS	Valeur de Bleu de Méthylène.
OPN	Optimum Proctor Normal
OPM	Optimum Proctor Modifié
IP	Indice de plasticité.
LP	Limite de plasticité.
LL	Limite de liquidité.
pd	Masse volumique sèche
ph	Masse volumique humide
Rc	Résistance à la Compression simple
n.m:	non mesurée
Ic :	Indice de Consistance ;
Dmax :	Dimension maximale des plus gros éléments contenus dans un sol
th :	état très humide
h :	état humide
m :	état moyen
s :	état sec
ts :	état très sec

INTRODUCTION GENERAL

Introduction Générale

Selon les dernières statistiques de l'ONU, plus de 2 milliards de personnes dans le monde vivent encore dans diverses formes de constructions en terre. Ces bâtiments en terre sont construits en utilisant des matériaux à base de terre comme matériau structurel principal ou comme structure d'enceinte enveloppante. D'ailleurs c'est l'élément le plus important dans la construction traditionnelle. En outre, il présente beaucoup d'avantages comme la faible consommation d'énergie, de bonnes performances thermiques, absorption acoustique, de prévention des radiations et de protection de l'environnement écologique, de sorte qu'il s'agisse d'une construction à développement durable. Mais la mise en œuvre et la sélection de la qualité du sol pour la construction exigent de performances réglementaires minimales, et il est nécessaire de réaliser des tests de contrôle de la qualité des matériaux.

Les briques de terre compressée (BTC) sont actuellement un matériau de construction qui se distingue pour être considéré comme moins polluant que les briques cuites et les parpaings. Elles sont fabriquées selon une technique simple qui consiste à mélanger de la terre (avec des propriétés géotechniques adaptées), du liant et de l'eau, suivi d'un pressage, et ne nécessitant pas l'étape de frittage dans le processus de fabrication, ce qui réduit les émissions de gaz carbonique à effet de serre dans l'atmosphère. Le principal constituant des (BTC) est le sol, qui est disponible en abondance. Donc, c'est un avantage économique et des propriétés thermiques et acoustiques similaires ou supérieures aux autres produits de matériaux de construction. Néanmoins, ces matériaux en terre crue sont très sensibles à l'eau, que ce soit en absorbant l'humidité du sol ou lorsque les briques sont exposées à la pluie, et cela favorise la désagrégation ou l'érosion de la maçonnerie en terre crue, ce qui affecte directement la durabilité des bâtiments. Pour cela les briques doivent être stabilisées afin de résoudre ce problème.

La stabilisation peut être physique, mécanique ou chimique. Dans la stabilisation physique, la texture du sol est modifiée par la température pendant le processus de séchage.

La stabilisation mécanique se produit lorsqu'une force de compression est utilisée pour compacter le matériau, modifiant sa structure en accueillant les particules et en réduisant les vides. L'utilisation d'un compactage à haute énergie lors de la fabrication de briques améliore le contact entre les particules, augmente la densité du matériau et réduit la taille et le nombre de pores, améliorant ainsi les propriétés mécaniques des particules et les rendant

INTRODUCTION GENERALE

moins sensibles à l'effet de l'eau. Cependant, la stabilisation mécanique ne résout pas totalement le problème et une stabilisation chimique est nécessaire, cette étape se produit lorsque on ajoute des additifs qui favorisent la stabilisation, et entraîne des liaisons solides entre les particules. Certains stabilisants ont été utilisés dans la fabrication de (BTC) tels que le ciment, la chaux, les géopolymères et autres. Le ciment est le plus populaire parmi les matériaux stabilisants malgré les inconvénients écologiques, et c'est parce qu'il est facile à trouver que d'autres liants courants, tels que la chaux au lieu d'autres types de bio-liants.

Des recherches éparses traitant de la stabilisation des terres non cuites avec des polymères organiques naturels, ont mis en évidence les difficultés à évaluer leur efficacité. La variété des polymères organiques naturels disponibles, l'état dans lequel ils sont utilisés, la combinaison avec d'autres produits chimiques et la composition du sol stabilisé devraient influencer l'efficacité de la stabilisation.

Cette recherche vise à la faisabilité de comportement mécanique et durabilité des briques en terre crue, nous avons abordé les points les plus importants qui aident à développer des perceptions et des solutions à ce dilemme.

Le premier chapitre présente un aperçu bibliographique sur la construction en terre crue dans le monde et en Algérie ainsi que ses différentes techniques, en suite nous développerons sur le matériau terre et son impact environnemental.

Le deuxième chapitre comporte l'étude bibliographique sur les techniques de stabilisation nous avons abordé dans ce chapitre l'importance de la valorisation du bio-liant dans la construction.

Le troisième chapitre est consacré aux essais d'identification, de sol et vérification avec norme de fabrication des briques en terre crue

Le quatrième et dernier chapitre comportement mécanique et durabilité de la BTC conclusion et perspectives

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

SUR LA CONSTRUCTION EN

TERRE CRUE

I.1 Introduction

La terre est certainement le matériau naturel facilement accessible et inépuisable au monde. Utilisée par des générations entières pour la construction, la terre crue fait désormais partie des matériaux oubliés. Pourtant, la construction en terre crue offre de nombreux avantages et peut être mise en œuvre selon différentes techniques. Selon sa dénomination, la terre crue correspond à une construction dont la terre est le matériau de base à employer, qui peut être mélangée avec du sable ou de la paille par exemple.

La construction en terre crue n'est pas exclusive à aucune région au monde. Les résidents de vastes régions des pays arabes, d'Asie, d'Afrique et d'Europe ont construit leurs maisons et leurs abris à l'aide de ce matériau.

Donc, la terre est utilisée depuis des millénaires, est sans aucun doute l'un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'humanité. En effet, les fouilles archéologiques ont montré que les civilisations perses, assyriennes, égyptiennes et babyloniennes édifiaient déjà de nombreux bâtiments à l'aide de ce matériau. Certains étaient même monumentaux tout comme l'arche de Ctésiphon en Irak, **fig 1.1**, certaines ville au Yémen, **fig 1.2**, le palais du Potala au Tibet en chine **fig 1.3**, la cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou, **fig 1.4** et encore bien d'autres. Les sites archéologiques en terre sont donc présents sur tous les continents habités. Cela est dû au fait que « la terre est l'un des trois matériaux premiers, au même titre que la pierre et le bois ».(Paulus J, 2015).[1]

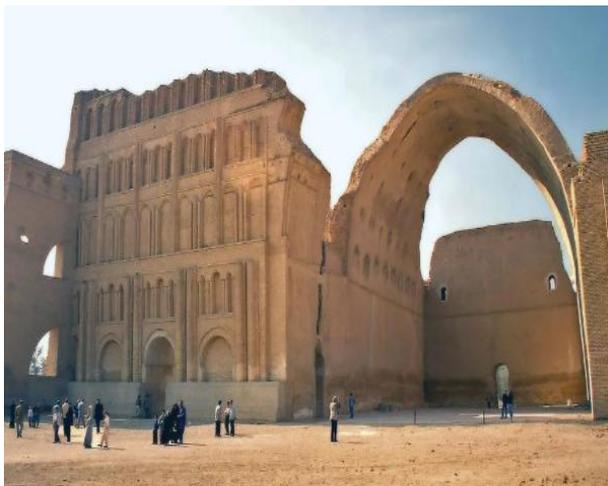


Fig 1.1 Arche de Ctésiphon en Irak

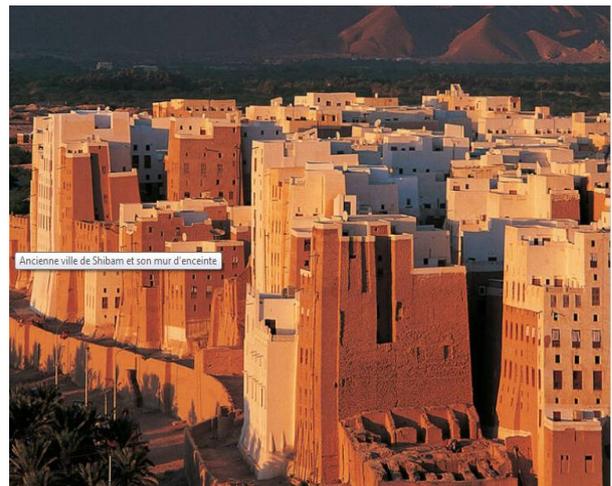


Fig 1.2 Ville de Shibam au Yémen



Fig 1.3 Palais du Potala



Fig 1.4 Cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou

I.2 Les constructions en terre crue dans le monde

Dans tous les pays **fig 1.5**, les gens ont hérité des techniques, de savoir-faire et de la culture de la construction en boue, les ont échangés et chacun a contribué à faire combiner, développer et diffuser les expériences.

Cependant, ce qui est remarquable dans cette architecture en boue, c'est sa solidité et sa force pour résister aux conditions climatiques et aux facteurs d'érosion, ainsi que sa conception technique exquise et merveilleuse et l'organisation sociale étroite qui la gère.

Les habitants ont utilisé leurs anciennes connaissances dans le progrès économique, la fortification militaire, la stabilité sociale, la cohésion de la population et la sécurité spirituelle et physique des habitants de la région. Cette architecture est devenue un document qui parle de la culture, des coutumes et des origines de la population, car elle brosse un tableau clair de la façon dont ils vivaient et géraient leur environnement physique, leur environnement politique, leurs aspirations économiques, leurs croyances et leurs interactions avec les autres, à travers le temps et l'âge, **Tableau 1.1**.

Aujourd'hui, cet important patrimoine est menacé de disparition, malgré son importance économique, sociale et environnementale, et dans la réalisation d'un développement durable et la préservation des ressources naturelles du gaspillage et de la pollution. La construction moderne en béton s'est répandue dans toutes ces zones, et menace ses composantes naturelles par le vandalisme et la destruction.

Les bâtiments en terre existent en abondance dans les villes yéménites **fig 1.6**, et il est

considéré comme l'un des endroits les plus importants au monde qui compte des centaines de milliers de bâtiments en terre à travers l'histoire, ce qui est une source de fierté pour beaucoup d'entre eux, Et plus attrayant pour les visiteurs et les touristes.

Quant à la plus grande construction en matériaux de terre du monde, il s'agit de la Grande Mosquée de Djenné au Mali **fig 1.7**, en Afrique. La construction de cette mosquée a été achevée en 1907. Il a été construit avec des briques de boue séchées au soleil et recouvert de plâtre de boue, ce qui donne une touche douce aux murs. La mosquée a été construite sur une superficie de 75 x 75 mètres et sa hauteur est de 3 mètres au-dessus du niveau du marché. Les habitants de Djenné sont fiers de leur mosquée. Un festival annuel est organisé pour aider à le préserver; Les festivités comprennent des repas, de la musique et des concours de réparation des dommages causés à la mosquée par l'érosion.

L'étude des méthodes traditionnelles d'architecture en terre crue est nécessaire pour préserver cet important patrimoine, préserver la mémoire, préserver l'environnement, assurer l'autosuffisance, lutter contre la pauvreté et les inégalités sociales.

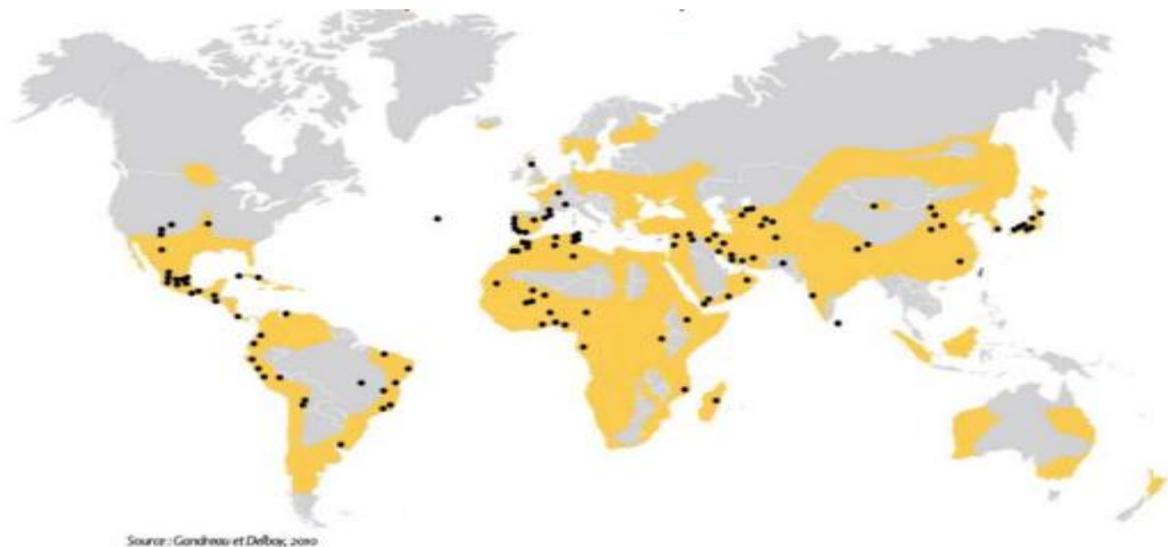


Fig 1.5 Architecture en terre crue dans le monde



Fig 1.6 Bâtiments en terre au Yémen



Fig 1.7 Grande Mosquée de Djenné au Mali

Tableau 1.1. Repères chronologiques de la construction en terre (C. Delbecque 2011)[2].

Temps	Événement
11 000 ans	Premières traces de la construction en terre en Amérique du sud.
10 000 ans	En Syrie construction en terre par empilement de pains de terre façonnés à la main.
8 500 ans	Apparition de la brique de terre en Turquie.
8 000 ans	Apparition de l'utilisation de la terre dans l'habitat en Europe occidentale.
5 000 ans	Apparition des premières villes d'architecture de terre crue en Mésopotamie.
1860	Apparition des fours à feux continus qui permettent une production plus industrielle de la brique.
1918 et 1945	Début des reconstructions suite aux conflits mondiaux et abandon de la terre crue en milieu urbain.
A partir de 1980	Redécouverte de la terre crue pour la sauvegarde du patrimoine dans un premier temps puis pour ses qualités environnementales.

I.3 La construction en bloc de terre en Algérie

La construction en terre ou en brique de terre est l'une des caractéristiques les plus marquantes du désert algérien, **fig 1.8**, et la région du Touat occupe une grande partie de ce vaste désert, **fig 1.9**. Elle est construite avec de la boue, qui est considérée comme un patrimoine culturel matériel qui exprime la culture et l'histoire de la région, mais elle souffre

de beaucoup de négligence et de marginalisation. Ce qui entraîne la perte de nombreux trésors architecturaux et faits historiques si l'affaire perdure dans cette manière. Et que la chose la plus simple que fasse le chercheur est de chercher à préserver ce patrimoine en le recherchant, en le faisant revivre, et en l'exploitant pour revenir au style architectural traditionnel d'origine, en le modernisant dans les zones désertiques, et en l'exploitant sous l'aspect du tourisme et développement économique.

Au cours des 50 dernières années l'Algérie a enregistré beaucoup de programmes qui ont été réalisés, **Tableau 1.2** nous consignons quelques opérations pilotes citées par ordre chronologique.

Tableau 1.2. Les opérations de construction en terre en Algérie (Source : CNERIB, 2000)[3]

Années de réalisations	Projets réalisés
1969	Réalisation de 136 logements en pisé au village agricole de Bouhlilet à Batna
1971	Une équipe franco-belge réalise Zéralda un groupe expérimental d'habitations rurales.
1973	30 des 300 logements du village de Mustapha ben Brahim, sont réalisés en pisé
1975	Le village d'Abadla a été construit selon le procédé de la terre remplissant
1976	100 logements du village agricole de Felliache à Biskra sont réalisés en Toub.
1980	120 logements du village agricole de Madher à Boussaada sont réalisés en BTS.
1981	40 logements sont réalisés à Cheraga près d'Alger en blocs de terre comprimée (BTC)
1984	Un prototype bioclimatique fut réalisé à Tamanrasset en BTC. Un prototype fut réalisé au CNERIB en BTC.
1986	10 logements sont réalisés à Adrar en BTC. 10 logements sont réalisés à Reggane en BTC
1994	24 logements sont réalisés à Tamanrasset par l'office de promotion et de gestion Immobilière en BTC. 44 logements sont réalisés par l'ETR de Tamanrasset en BTC.
1998	Un prototype en pisé fut réalisé au CNERIB
2006	Un projet intitulé « réalisation d'un logement rural avec efficacité énergétique » est lancé au CNERIB et financé par l'union européenne.



Fig 1.8 Timimoun au désert algérien



Fig 1.9 Région du Touat

I.4. Les techniques de construction en terre

Le défi d'une construction solide et durable depuis des siècles nous fait voir qu'il existe plusieurs techniques constructives et différents bâtiments érigés, Chaque technique est née selon des contextes géographiques et climatiques de chaque région, différents modes de vie et coutumes, ou même selon les matériaux disponibles. Les techniques de construction les plus répandues sont: le pisé, l'adobe, le torchis, la bauge et les briques de terre comprimée (BTC). C'est pourquoi nous nous concentrons dans cette recherche mais il en existe de nombreuses autres que nous ne pouvons pas mentionner pleinement. Chaque technique a ses spécificités mais l'utilisation de la terre est un élément commun dans toutes ces techniques. D'après H. Guillaud et H. Houben (1995)[4], il y a douze principales techniques de construction en terre et ça a été schématisé dans « la roue des techniques de construction en terre », **fig 1.10**, mais ils précisent tout de même qu'il en existe en réalité une centaine autres techniques. En plus d'être simple, ce tableau circulaire ne fait pas non plus de différenciation entre les techniques traditionnelles et les nouvelles techniques.

Pour entrer rapidement dans le monde de l'architecture en terre, voici quelques techniques de construction utilisées sur le terrain

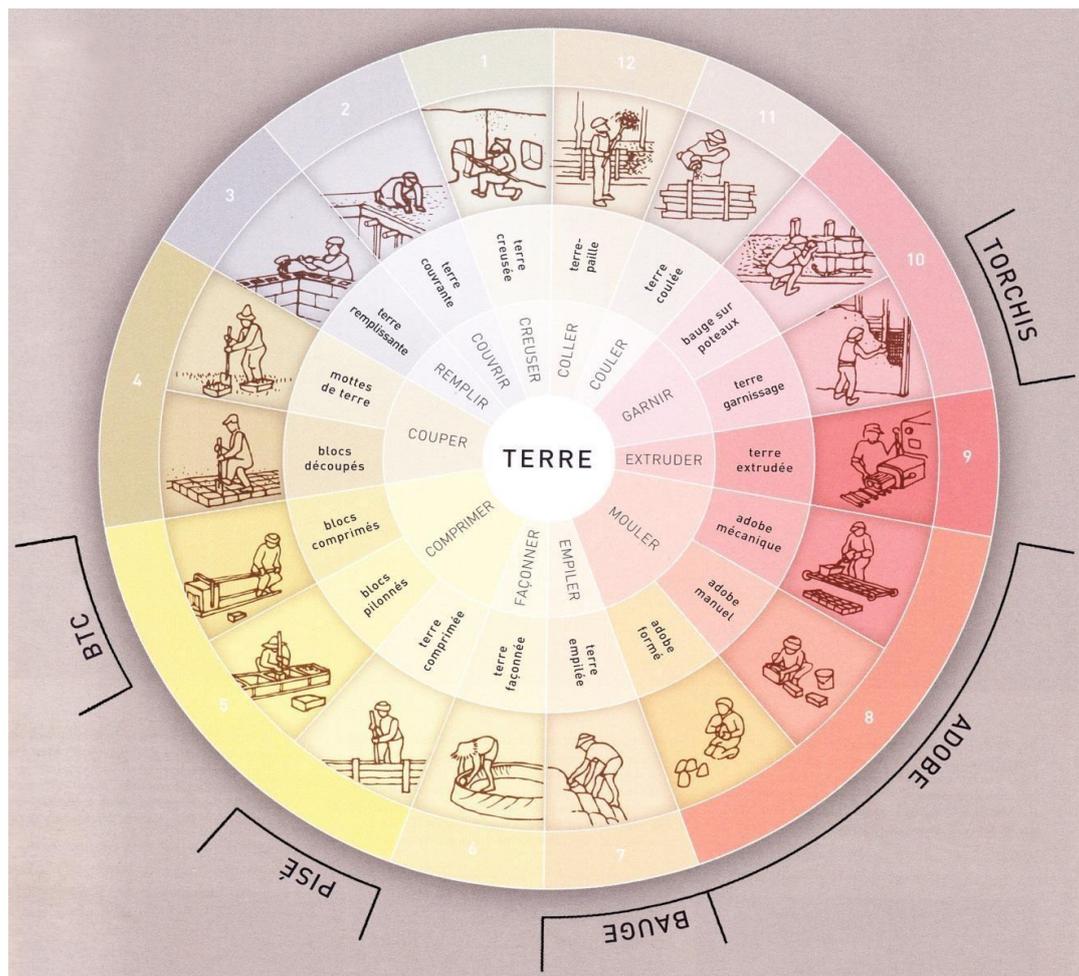


Fig. 1.10 la roue des techniques de construction en terre

I.4.1 Terre découpée

Dans cette méthodologie de construction, les sols cohésifs et contenant des concrétions de carbonates sont découpés sous forme de blocs qui servent de briques ou de pierres, **fig 1.11**, Ces blocs se trouvent généralement dans les zones tropicales où les sols latéritiques servant de matériaux de construction. Le sol latéritique se trouve généralement en deux étapes - un sol mou, qui durcit avec le temps en raison de l'exposition à l'air, et une croûte dure qui s'est durci au fil des années **fig 1.12**, Dans les régions où le sol n'est pas suffisamment cohérent, un mélange de terre végétale et d'herbe est utilisé pour créer des blocs empilés les uns sur les autres.



Fig 1.11 Pierre découpée



Fig 1.12 Extraction de blocs en terre découpée

I.4.2 Terre coulée

La terre coulée est similaire au béton, en ce sens que les deux matériaux sont mélangés et coulés dans une charpente, **fig 1.13**. Le principal facteur qui les distingue les uns des autres est l'agrégat dans les deux matériaux, c'est-à-dire le sable/gravier pour le béton et le sol ordinaire pour la terre coulée. Le sol idéal pour la terre coulée doit avoir une faible teneur en argile. L'un des inconvénients de cette technique est la forte teneur en eau du sol. Il induit un retrait une fois que la forme sèche, ce qui entraîne des fissures.



Fig 1.13 Travaux de coulage de la terre



I.4.3 Superadobe

Développé par l'architecte iranien Nader Khalili, le superadobe est un type de construction en sacs de terre, **fig 1.14**, La technique utilise des sacs de sable longs ou courts qui sont remplis de terre humidifiée et disposés en couches ou en bobines. Des fils de fer barbelés sont placés entre chaque couche et servent à la fois de renforts et de mortier. Les structures construites selon cette technique utilisent également des voûtes et des arcs en encorbellement ainsi que des dômes pour créer des coques solides, **fig 1.15**.



Fig 1.14 Construction en Superadobe



Fig 1.15 Superadobe en dômes

I.4.4 Adobe

Cette technique particulière est utilisée partout dans le monde depuis des milliers d'années. La brique d'argile séchée au soleil, c'est-à-dire l'adobe, est l'un des plus anciens matériaux de construction utilisés par l'humanité. Les adobes sont constitués d'une épaisse boue malléable souvent mélangée à de la paille et façonnée à la main ou dans des moules en bois, **fig 1.16**, Ils peuvent être assemblés facilement avec le mélange d'adobe utilisé également comme lien pour les briques individuelles. Les structures en Adobe sont extrêmement durables et le matériau a une masse thermique élevée. Cependant, les structures en adobe sont susceptibles d'être endommagées par un tremblement de terre si elles manquent d'un renforcement approprié.



Fig 1.16 Façonnage de la Adobe

I.4.5 Épi

La construction en épi est une technique ancienne qui consiste à superposer un mélange d'argile et de paille. La technique n'utilise pas de mortier ou de cadre, mais utilise plutôt les mains et les pieds pour atteindre une forme, **fig 1.17**. Par conséquent, il se prête à des formes organiques telles que des murs courbes, des arcs et des niches. En raison de sa nature poreuse, le torchis est assez résistant aux intempéries et peut supporter de longues périodes de pluie sans faiblir.



Fig 1.17 La technique de l'épi

I.4.6 Le pisé

Les structures en terre battue sont formées à partir du sol suffisamment humide pour tenir ensemble. La terre est mélangée à de l'eau pour former une bouillie qui est ensuite tassée entre les volets à l'aide d'une pilonneuse manuelle ou pneumatique. La forme d'un mur construit selon la technique du pisé est fonction du coffrage utilisé, **fig 1.18**. Les murs en pisé sont généralement laissés tels quels en raison du motif esthétique des strates qui se développe à partir du pilonnage. Les murs construits peuvent être sculptés dans une certaine mesure alors que la terre est humide. La terre battue a un taux de retrait moindre, une longue durée de vie ainsi qu'une résistance par rapport aux autres techniques.



Fig 1.18 Compactage des couches de terre crue à l'aide d'un pilon

I.4.7 Le torchis

Les torchis (Wattle and Daub) sont l'une des techniques de murs de remplissage les plus courantes. Il est utilisé depuis au moins 6 000 ans et est encore largement utilisé dans plusieurs parties du monde. Le bois forme un treillis tissé et est enduit d'un mélange de terre qui se compose généralement de terre humide, d'argile, de sable, d'excréments d'animaux et de paille, **fig 1.19**.



Fig 1.19 mur en torchis

I.4.8 Terre façonnée

Semblable à la façon dont un potier façonne la boue en pots, la technique de la terre façonnée façonne directement sans moule ni coffrage, **fig 1.20**. Les trois facteurs qui jouent un rôle clé dans cette méthode sont la qualité du sol, sa préparation et la consistance de l'eau. Un grand avantage de cette méthode est l'utilisation minimale d'outils ainsi que la main-d'œuvre. La terre façonnée permet une grande fluidité dans l'architecture et quelques limites de cette technique sont la compréhension de la qualité du sol ainsi que le contrôle du retrait une fois la structure sèche, **fig 1.21**.

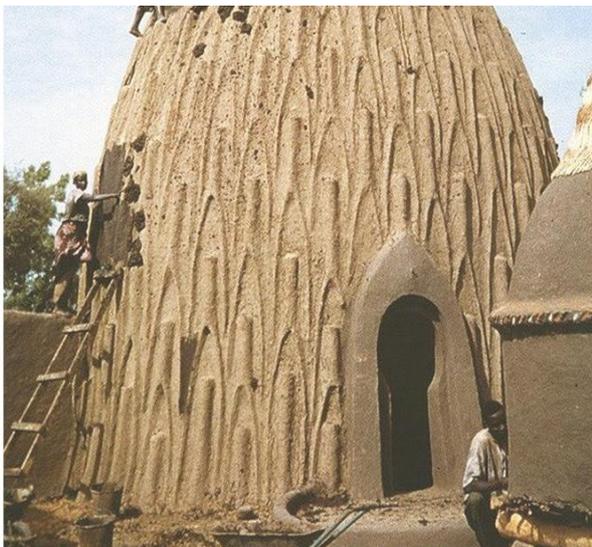


Fig 1.20 Façonnage de la terre directement



Fig 1.21 Contrôle du retrait

I.4.9 La bauge

Dans cette technique, le sol argileux est mélangé à de l'eau puis ajouté à de la paille **fig 1.22**. La terre aide à lier la paille ensemble. L'argile de paille est facilement adaptable pour la préfabrication de panneaux muraux **fig 1.22**, de revêtements de sol et de grandes briques. Il sert de substitut aux cloisons sèches ainsi qu'à l'isolation et permet une construction légère avec de bonnes propriétés thermiques **fig 1.23**.



Fig 1.22 Mélangé sol argileux et la paille



Fig 1.23 Panneaux muraux

I.4.10 La brique de terre compressée

La technique de fabrication des BTC est relativement simple. La première étape consiste à sélectionner le bon sol. Le sol doit être exempt de matière organique et avoir une bonne plasticité. Le sol est ensuite mélangé avec de l'eau et un liant, tel que le ciment ou la chaux. Le mélange est ensuite versé dans un moule et compacté sous pression (une presse manuelle ou motorisée) **fig. 1.24**. La pression expulse l'air du mélange et crée une brique dense et solide. L'ajout de stabilisateurs a permis la construction de murs plus hauts et plus minces qui ont une grande résistance à la compression et à l'eau. **fig. 1.25**.



Fig. 1.24. Confection d'une brique comprimé



Fig. 1.25. Brique comprimé stabilisés

La brique est un corps parallélogramme fait d'argile ou de divers autres matériaux. Par ailleurs la brique est un bloc solide qui résiste au feu et aux dommages causés par les conditions climatiques fluctuantes. La brique est un élément de construction telle que les maisons, les bâtiments commerciaux et publics, les cheminées et les fours.

Les (BTC) ou les (BTCS) sont des matériaux de construction respectueux de l'environnement. Il est parfois appelé brique de terre comprimé ou brique de terre pressée. Il est fabriqué en combinant les bonnes proportions de sous-sol inorganique relativement sec, d'argile non expansive, de sable et d'agrégats Il existe principalement deux types de blocs de terre

- Brique de terre comprimée
- Brique de terre comprimée stabilisée

Par rapport aux autres matériaux de construction, la (BTC) offrait de nombreux avantages. Il augmente l'utilisation de matériaux locaux et réduit les coûts de transport car la production est in situ, met des logements de qualité à la disposition d'un plus grand nombre de personnes et génère une économie locale plutôt que de dépenser pour importer des matériaux. Une méthode de construction plus rapide et plus simple a entraîné une main-d'œuvre moins qualifiée, une bonne résistance, des propriétés d'isolation thermiques, moins d'émissions de carbone et d'énergie intrinsèque dans la phase de production, crée un niveau extrêmement faible de déchets et se débarrasse facilement, ne cause aucune pollution directe de l'environnement pendant toute la durée cycle de vie. La brique de terre a également la capacité d'absorber l'humidité atmosphérique, ce qui a pour résultat de créer un environnement sain à l'intérieur d'un bâtiment pour son occupant.

La production de (BTC) nécessitait un ouvrier modéré à peu qualifié puisque la fabrication de

(BTC) est très simple **fig. 1.26**. Il ne prend que 3 étapes de processus qui sont :

- préparation du sol ;
- compression du mélange ;
- le durcissement ;

Dans la préparation du sol, il faut une sélection soigneuse et correcte du sol pour obtenir le meilleur résultat et après que le mélange est mis dans le moule, il doit recevoir une charge de compression appropriée. La méthode de durcissement dans la production de (BTC) tirait généralement parti de l'humidité naturelle où les briques pouvaient s'empiler immédiatement après la compression, mais le gain de résistance au fil du temps et il est important d'empêcher un dessèchement rapide, d'où la brique durcie à un atmosphère humide où l'humidité relative de l'air >70% est la meilleure condition pour assurer une hydratation maximale du stabilisant utilisé pendant environ 28 jours .

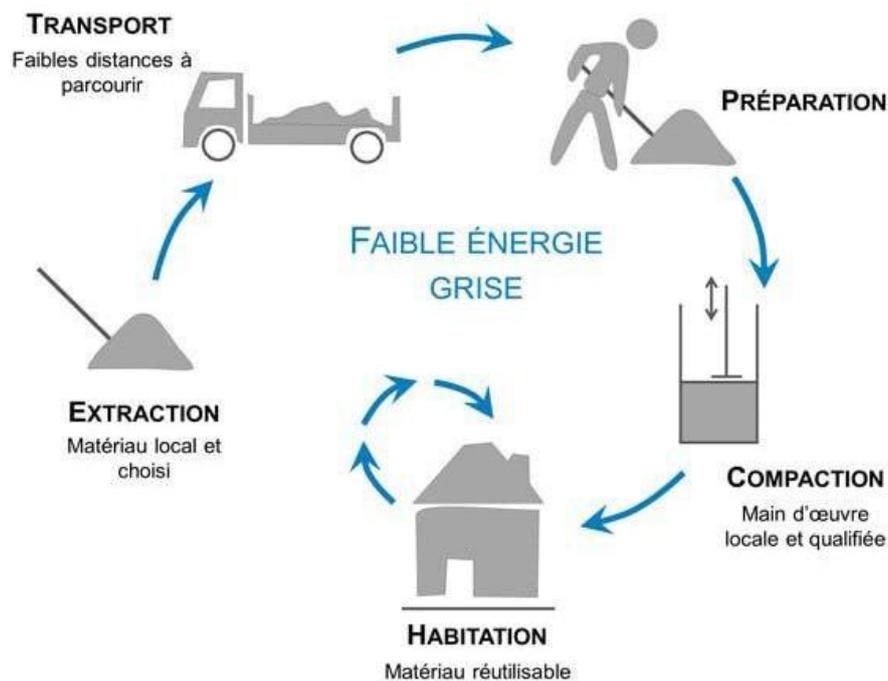


Fig. 1.26. Processus de production (BTC)

I.5 Impact environnemental, avantage et inconvénient de la construction en terre crue

Les bâtiments de l'Antiquité étaient faits de matériaux simples. Là où les gens utilisaient les matériaux disponibles dans la Nature, ils mélangeaient du sable, de la boue, de la paille et de l'eau pour former le matériau de construction. Cette façon naturelle de construire des maisons était durable et porteuse, et ces maisons étaient en harmonie avec la nature. Ce mode de construction a disparu du fait de l'industrie et de la modernisation des modes de construction. Mais il est encore utilisé dans les zones pauvres, où les ressources naturelles sont les seuls refuges pour les travaux de construction.

L'utilisation de matériaux naturels est non seulement rentable et écologique, mais également bénéfique pour la santé. Les matériaux naturels ont des pores qui permettent une circulation naturelle de l'air dans la maison, contrairement aux matériaux artificiels, qui créent un environnement malsain.

Il n'y a donc pas beaucoup de points négatifs sur l'environnement, à l'exception de certains qui ont recours au bulldozer des terres agricoles afin d'obtenir le sol utilisé dans sa production, ou pendant le processus de production, dans lequel la méthode de brûlage du sol est utilisée, laissant des polluants dans l'environnement.

Les coûts de construction représentent un élément essentiel dans le système constructif. L'étude scientifique a été orientée vers la prise en compte de l'utilisation de la terre et la tentative de la développer comme un matériau favorable à la durabilité et préserver l'environnement à travers la possibilité de l'utiliser efficacement dans la construction des villes. La recherche dans ce domaine a pris une part importante en raison de la disponibilité des matériaux et leur faible coût, la possibilité de construire une maison sans l'intervention de spécialistes la maniabilité de la terre nous permet de créer des murs courbés, des coins arrondis, et des ouvertures qui ont un charme dans les styles rustiques ou modernes une longue durée de vie L'argile a une faible conductivité thermique, c'est pourquoi le bâtiment n'a pas besoin d'isolation supplémentaire

La construction en brique de terre a un poids important en raison des valeurs élevées de densité, ce qui augmente considérablement la charge sur la base du bâtiment.

En conséquence, il est difficile de réaliser des bâtiments de grande hauteur, ou que la

fondation soit solide et énorme, et cela représente un coût supplémentaire en temps.

Le matériau doit être complètement séché avant les travaux de construction.

Comme vous pouvez le voir, les défauts sont minimisés, nous pouvons donc dire en toute sécurité que la la construction en terre crue est plus proche d'un matériau idéal que beaucoup d'autres.

I.6 Normes et Critères de choix des matériaux

I.6.1 Introduction

Il existe un certain nombre de normes et de critères qui peuvent être utilisés pour choisir les matériaux en terre crue pour la construction. Ces normes et critères peuvent être utilisés pour s'assurer que les matériaux conviennent à l'usage prévu et qu'ils répondront aux normes de performance requises.

Certaines des normes et critères les plus importants pour le choix des matériaux de terre crue comprennent :

- Distribution granulométrique
- Plasticité
- Compressibilité
- Perméabilité
- Composition chimique

En plus de ces normes et critères, il est également important de tenir compte du climat local et de l'utilisation prévue de la structure lors du choix des matériaux en terre crue. Par exemple, les sols qui ont tendance à gonfler et à rétrécir ne doivent pas être utilisés dans des régions aux climats extrêmes.

En considérant attentivement les normes et les critères de choix des matériaux de terre crue, il est possible de sélectionner des matériaux qui répondront aux normes de performance requises et qui conviendront à l'usage prévu.

I.6.2 Utilisation des normes

Dans le cadre de la construction en terre, Plusieurs et différentes normes de la construction en terre existent, l'objectif de la normalisation c'est de disposer une procédure valable et commune à tous les produits dont les briques de terre comprimé (BTC), mortier de terre (MT) et maçonneries de bloc de terre comprimée (MBTC).

Ces normes abordent principalement les critères de sélection des matériaux qui peuvent offrir les meilleures propriétés physiques, mécaniques, et thermiques. A la fin, d'avoir les valeurs aptes pour une résistance à la compression et durabilité de la brique de terre comprimée

D'une façon globale, beaucoup de normes reconnue pour des usages communs et répétés, des règles, des lignes directrices ou des caractéristiques, pour des activités ou leurs résultats, garantissant un niveau d'ordre optimal dans un contexte donné.

Les objectifs des normes sont :

- économiques et sociaux.
- faciliter les échanges des biens et produits.
- assurer la protection du citoyen (sécurité, qualité des produits, etc.).

Tableau 1.3.: Les types de recommandations pour le choix des sols (Taleb Boulerbah, 2019)[5].

Pays	Document	Techniques	Approches pour le choix de sol
États-Unis	NMAC 14.7.4 (2000)	A, BTC, TE	Petites recommandations. Des unités de construction doivent être examinées.
Espagne	XP P 13-901 (2001)	BTC	Abaques de granularité et de plasticité. Classification par la nature du sol
Nouvelle-Zélande	NZS 4297 (1998) 4298 NZD 1998 4299 NZD 1998)	A, BTC, TE	Recommandations non quantitative au sujet des sols qui ne doivent pas être employés. Mouiller/essai sec nécessaire. Système pour l'essai des unités
Pérou	NTE E 080 (2000)	A	Les petites recommandations et ceux-ci sont pour la granularité
Afrique régionale	ARSO (1996)	BTC	Abaques de granularité et de plasticité. Classification par la nature. Énumérer et classer les essais de sol, pas de procédures expliquées.
Zimbabwe	SAZS 724 (2001)	TE	Les recommandations pour la granularité, les sels, le contenu organique et le ruban examinant.
Espagne	Lehmbau Regeln (1999)	A, BTC, TE	Force de loi, plasticité et granularité d'essai essentiel. Énumérer et expliquer les essais en laboratoire simples et donnant des recommandations pour certains d'entre eux.
Australie	HB 195 (2002) Bulletin 51 992 EBAA (2001)	A, BTC, TE	Énumération de champs et d'essais en laboratoire, avec des procédures données pour certaines. Recommandations de granularité pour chaque technique *Recommandations générale qualitative pour la granularité. Convenance par l'essai des unités. Observation de l'exécution de l'héritage existant *recommandations non quantitatives au sujet des sols.

Espagne	MOPT (1992) IETcc (1971)	À, BTC, TE	Pour ne pas employer Convenance par l'essai sur le terrain avec un diagramme de décision. Essais en laboratoire recommandés, avec des recommandations pour la granularité.
CYTED international	CYTED (1995)	A, CEB, TE	Quelques dispositions pour des états généraux de sol Pas une approche directe pour le choix du sol. Recommandations selon des essais de force sèche
Houben et Guillaud (1994)		À, BTC, TE	Propriétés essentielles : granularité, plasticité, compactibilité et cohésion. Préliminaire et essai d'identification de laboratoire expliqué. Abaques pour la granularité, la plasticité et la compactibilité. Classification par la nature
Rigassi V (1995)		BTC	Granularité, plasticité et compactibilité essentielles. Des essais de sol d'identification de champ et de laboratoire sont expliqués.
Mc. Henry PG (1984)		À, TE	Offre les sols moyens qui ont montré la bonne exécution dans les bâtiments existants
Smith et Austin (1996)		A, BTC, TE	L'identification et le choix des sols ne sont pas donnés beaucoup d'importance. Dispositions très petites. Les unités d'essai sont la meilleure manière.
OIA (1970)		À, BTC, TE	Convenance par l'essai sur le terrain avec un diagramme de décision. Identification par des essais en laboratoire sans recommandations
Spencer et Cook (1983)		À, BTC, TE	Arrangement essentiel, les propriétés d'index : dimension particulière, limites d'Atterberg, tassement et classifications des sols bien que recommandations non données. L'essai des unités est essentiel.

I.6.3 Normes propres aux briques de terre comprimée (BTC)

Les normes d'utilisation des terres dans la construction en BTC se basent principalement sur leur granulométrie et leur plasticité. Ces caractéristiques influent le comportement des BTC produits (Taleb Boulerabah, 2019).[5]

Tableau 1.4 : Les types de recommandations pour le choix des sols (Taleb Boulerabah, 2019).

Pays	Documents de référence	Critères de sélection de la terre
USA	NMAC 14.7.4 (2000)	Peu de recommandations : les unités constructives doivent être testées
France	XP P 13-901 (2001)	Granularité, plasticité et nature de la terre
Nouvelle Zélande	NZS 4297 (1998)	Les unités constructives doivent être testées
Pérou	NTE E 080 (2000)	Granularité

Afrique	ARSO (1996)	Granularité, plasticité et nature de la terre
Zimbabwe	SAZS 724 (2001)	Granularité, sels, teneur en matière organique et cohésion
Allemagne	Lehmbau Regeln (1999)	Force de liaison, plasticité et granularité.
Australie	HB 195 (2002)	Granularité
Espagne	MOPT (1992)	Granularité

Une comparaison entre les valeurs caractéristiques des différentes techniques de construction en terre est présentée dans le tableau 1.5.

Tableau 1.5: Les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé, BTC) (Hakkoum Soumia, 2015)[6].

Caractéristique	Adobe	Pisé	BTC
Masse volumique (kg/m ³)	1200-1700	1700-2200	1700-2200
Résistance à la compression (MPa)	2-5	< 2,4	< 2,4
Résistance à la traction (MPa)	/	0,5-1	/
Conductivité Thermique λ (W/m.°C)	0,46-0,81	0,81-0,93	0,81-1,04
Chaleur Spécifique (J/kg.°C)	900	850	/
Capacité Thermique (KJ/m ³ .°C)	1350	510	/
Absorption d'eau (%)	5	10-20	10-20
Isolation Acoustique (dB)	/	50 dB pour 40 cm 40 dB pour 20 cm	50 dB pour 40 cm 40 dB pour 20
Retrait de Séchage (mm/m)	1	1-2	0,2-1

I.6.4 Critères de choix des matériaux

Le choix de la terre est nécessaire dans le processus de décision concernant le choix d'une technologie de transformation de la terre en matériau de construction pour la fabrication des BTC, :

I.6.4.1 La distribution granulométrique

La distribution granulométrique est la première propriété à prendre en compte lors de l'évaluation de l'aptitude d'un matériau en terre pour la construction.

La connaissance de la granulométrie est une indication importante mais non suffisante à la

sélection d'un sol. La terre est un matériau granulaire dont la distribution granulométrie peut être particulièrement large. Le **tableau 1.6**, résume les principaux types de sols et leur aptitude à être utilisés pour la construction en terre.

tableau 1.6 distribution granulométrique la norme française NF P18-560		
Maxi	Appellation	Mini
200 mm	cailloux	20 mm
20 mm	graviers	2 mm
2 mm	sables grossiers	0,2 mm
0,2 mm	sables fins	20 μm
20 μm	limons	2 μm
2 μm	argiles	

À partir de ces normes, ils ont conclu que les prescriptions relatives à la taille des particules sont plus restrictives pour la construction en BTC, pisé et BTM : (brique de terre moulée comme l'adobe).

Aussi à partir de ces recommandations, des fuseaux granulométriques sont tracés pour distinguer les limites des tailles des particules utilisées dans la construction en terre pour différentes techniques de construction **fig. 1.27**.

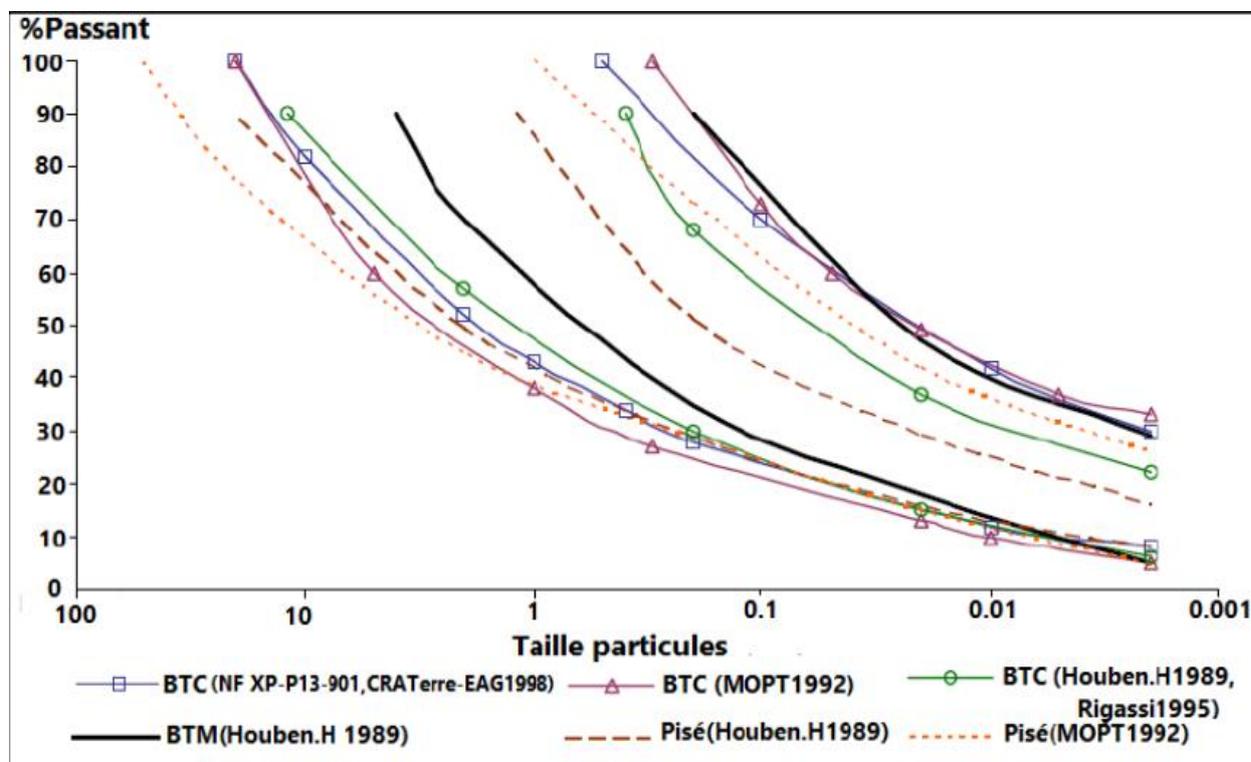


Fig. 1.27. Fuseaux de courbes granulométriques conseillées pour construire en BTC, en Pisé ou en adobe (BTM = Brique de Terre Moulée) selon la [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], CRATerre-EAG [1998], MOPT [1992] (Jiménes et Guerrero, 2007).

La granularité du matériau utilisé sera de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de texture qui suit et dont elle épousera l'allure générale.

I.6.4.2 Les limite d'Atterberg

Une classification de terre ne pourra être obtenue, en connaissant uniquement les pourcentages de ces différents constituants, mais elle sera toujours complétée par les limites d'Atterberg (obtenues selon le procédé normalisé ASTM-D-423). Ces limites, une fois déterminées feront l'objet d'une comparaison avec les fourchettes **tableau 1.7**. La capacité de gonflement de la terre pourra aussi être estimée à partir de ces limites.

Suivant la valeur de l'indice de plasticité I_p , les sols peuvent se classer comme suit:

tableau 1.7 les fourchettes de l'indice de plasticité

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

I.6.4.3 La plasticité

La plasticité est le pouvoir à se déformer sans se fissurer ou se désintégrer. La plasticité d'une terre et les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg (limite de liquidité LL, limite de plasticité PL, l'indice de plasticité PI).

Pour obtenir la meilleure résistance des matériaux de terre (BTC, pisé et adobe), tant aux sollicitations mécaniques qu'à l'action de l'eau, il est nécessaire de choisir les limites les mieux adaptées pour les blocs de terre selon la norme française [Norme-NF-XP-P13-901, 2001].

La **fig. 1.28** montre les limites de plasticité d'un matériau conseillés par différents auteurs et normes.

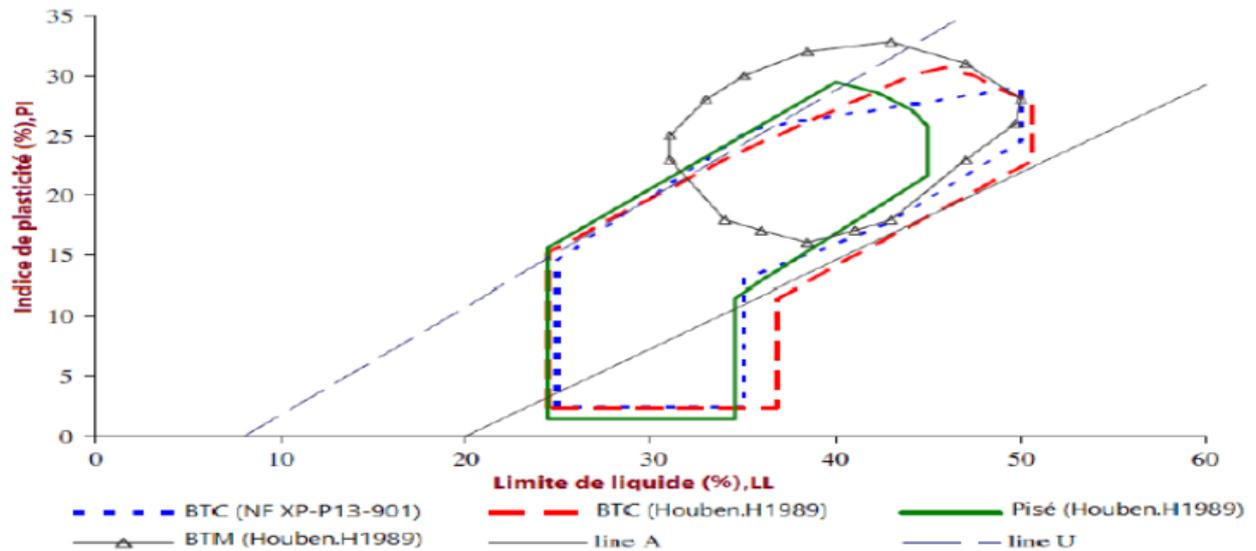


Fig. 1.28 Fuseaux de plasticité conseillés pour construire en BTC, en Pisé ou en BTM selon la norme française [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], CRATerre-EAG [1998] et Houben and Guillaud [1989]. (Jiménes et Guerrero, 2007)

La plasticité du matériau sera de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de plasticité qui suit **fig. 1.28**. Les limites du fuseau recommandé sont approximatives.

1.6.4.4 Compactage

Un certain nombre d'études s'est intéressé à la relation entre la densité de la terre et l'effort de compactage. La teneur en eau optimale est celle pour laquelle la masse volumique est maximale. Pour cela on utilise un essai de Proctor normal ou modifié, pour choisir la terre utilisable en fabrication des matériaux terreux (BTC) qui est déconseillé pour les sols argileux mais le compactage statique est mieux adapté aux sols argileux [Mesbah et al., 1999b], **fig. 1.29**.

1.29.

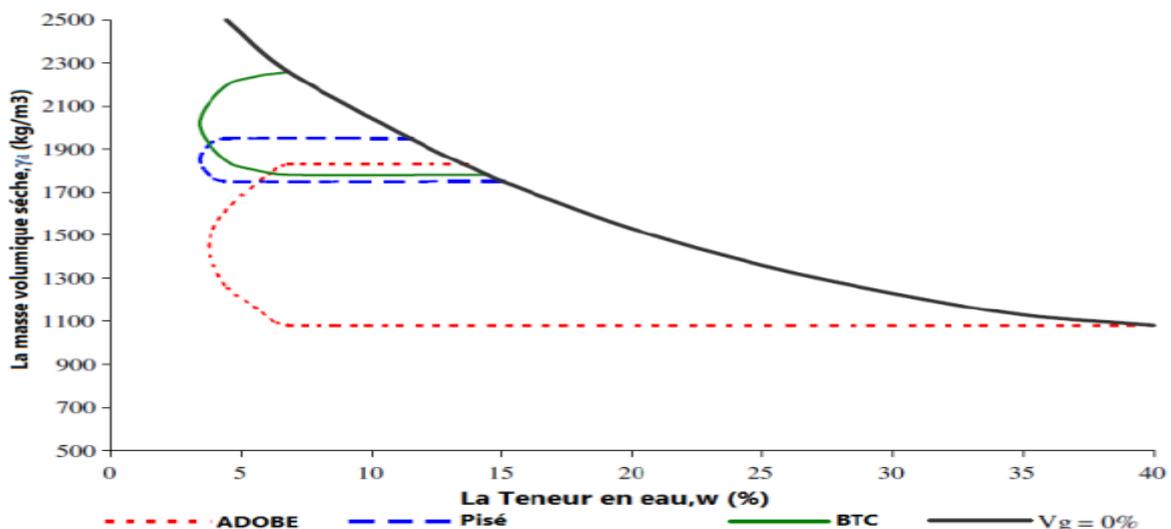


Fig. 1.29. Fuseaux de compactage recommandés pour construire en BTC, en Pisé ou en Adobe selon Houben and Guillaud [1994].

I.6.4.5 La résistance à la compression simple

La résistance à la compression est un paramètre important dans les exigences sur les BTC, chaque norme a défini ses propres intervalles de valeurs minimales de la résistance R_c .

La résistance à la compression simple de la terre crue (non stabilisée) séchée à l'air libre est régulièrement de quelques dixièmes de MPa, (0.5 à 1.5 MPa pour la bauge, 1 à 2.5 MPa pour l'adobe) à quelques MPa pour le pisé (1 à 4MPa) et les blocs de terre compressée BTC entre 1 à 7MPa, **fig. 1.30**. [Van-Damme et Houben, 2017].[9]

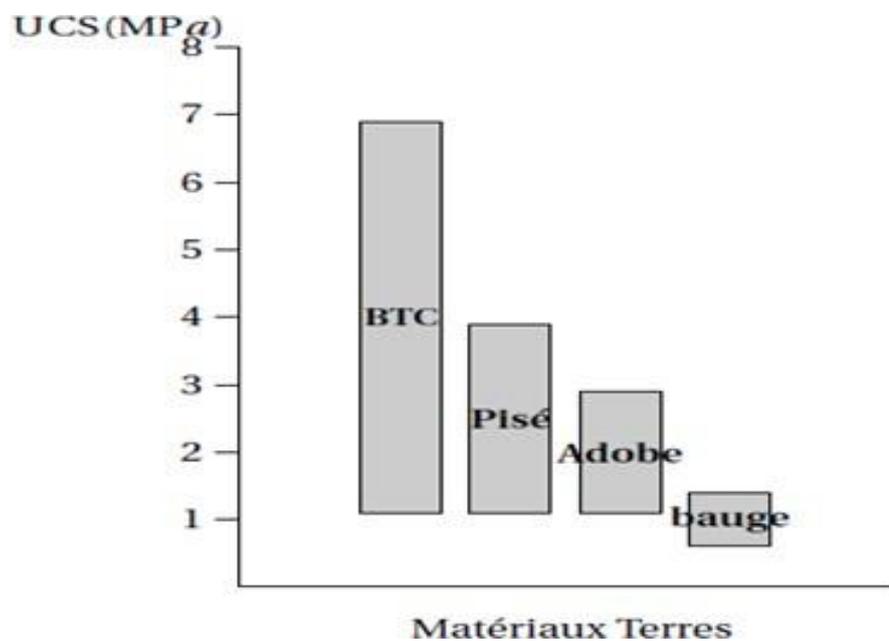


fig. 1.30. Résistance à la compression des matériaux terreux (Van-Damme et Houben, 2017).

CONCLUSION.

Dans ce chapitre, nous avons exposé constructions en terre crue, L'historique et ses techniques, Les avantages et les inconvénients, les techniques et les normes qui peuvent être utilisées pour choisir les bon matériaux et techniques pour une construction en terre crue. Ces normes et critères peuvent être utilisés pour s'assurer que les matériaux conviennent à l'usage prévu et qu'ils répondront aux normes de performance requises.

En plus de ces techniques et normes, il est également important de tenir compte du climat local et de l'utilisation prévue de la structure lors du choix des matériaux en terre crue. Par exemple, les sols qui ont tendance à gonfler et à rétrécir ne doivent pas être utilisés dans des régions aux climats extrêmes.

En général, les matériaux en terre crue sont un bon choix pour la construction lorsque les conditions suivantes sont remplies :

Les matériaux sont disponibles localement ;

Les matériaux sont adaptés à l'usage prévu ;

Les matériaux sont abordables ;

Les matériaux sont durables et peuvent résister au climat local.

Si ces conditions sont remplies, les matériaux en terre crue peuvent constituer une alternative durable et respectueuse de l'environnement aux matériaux de construction traditionnels.

CHAPITRE II

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

SUR LES TECHNIQUES

DE STABILISATION

II.1 INTRODUCTION

Le domaine de la construction en BTC exige des matériaux de meilleures caractéristiques car le comportement mécanique et la durabilité des briques dépend de la qualité des matériaux utilisés. Le type de stabilisation utilisé dépendra des propriétés spécifiques du sol et des performances souhaitées de la construction. Par exemple, si le sol est très compressible, une stabilisation mécanique peut être utilisée pour améliorer sa résistance et sa durabilité. Si le sol est très sablonneux, une stabilisation physique peut être utilisée pour améliorer sa maniabilité et réduire sa perméabilité. Si le sol est très acide, une stabilisation chimique peut être utilisée pour neutraliser l'acidité et améliorer sa durabilité. La fabrication de la BTC ont souvent connu le problème des matériaux de bonne qualité qui deviennent de plus en plus exigeants dans le besoin de fabrication de la BTC. Cette situation a conduit aux différentes recherches qui ont trouvé des solutions alternatives telles que les différentes techniques de stabilisation. Dans l'ensemble, il existe une variété de techniques qui peuvent être utilisées pour stabiliser les matériaux de construction en terre crue dont nous allons voir dans ce chapitre.

II.2 Les techniques de stabilisation

Nous avons vu lors de l'étude bibliographique qu'il existait un grand nombre de techniques de construction en terre crue. Parmi ces techniques, les plus faciles à moderniser sont le pisé, la construction des briques en terre crue et les bétons de terre, les premières briques de terre comprimée produits soulèvent des questions importantes sur leur équilibre entre leurs performances mécanique et leurs durabilités. Ce mode d'utilisation de la terre nécessite encore beaucoup d'études de laboratoire et nous avons préféré nous concentrer dans le cadre de cette thèse sur ce matériau dans le but d'améliorer les performances de la construction en terre crue par une ou plusieurs techniques.

La stabilisation mécanique fait référence au compactage du matériau entraînant des modifications de sa densité, de sa résistance mécanique, de sa compressibilité, de sa perméabilité et de sa porosité. Cela peut être fait en utilisant une variété de méthodes, telles que le compactage manuel, **fig 2.1**, le bourrage ou le compactage mécanique, **fig 2.2**.

La stabilisation chimique consiste à ajouter d'autres matériaux et produits chimiques qui modifient les propriétés du sol soit par une réaction physico-chimique entre les grains et les

matériaux, soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les grains. Les stabilisants chimiques les plus courants sont la chaux, **fig 2.3**, le ciment, **fig 2.4**, et les cendres volantes.

La stabilisation physique fait référence à la modification de la texture des matériaux. Cela comprend le mélange contrôlé de différentes fractions de grains ou de sols naturels et le mélange de fibres dans le sol, **fig 2.5**. Les fibres peuvent aider à améliorer la résistance à la traction du matériau et à le rendre plus résistant à la fissuration, **fig 2.6**.

Il est important de noter que la stabilisation peut avoir un impact significatif sur la performance environnementale de la construction en terre. Par exemple, l'utilisation de ciment peut contribuer aux émissions de gaz à effet de serre. Par conséquent, il est important d'examiner attentivement les impacts environnementaux des différentes techniques de stabilisation avant de prendre une décision.

Voici quelques considérations supplémentaires lors du choix d'une technique de stabilisation :

Coût : Le coût de la stabilisation peut varier selon le type de stabilisateur utilisé et la quantité du matériau à traiter.

Disponibilité : Certains stabilisants, comme la chaux, peuvent ne pas être facilement disponibles dans toutes les régions.

Performances : Les performances des différentes techniques de stabilisation peuvent varier en fonction des propriétés spécifiques du sol. Il est important de tester le sol avant de prendre une décision.

Impact environnemental : Comme mentionné ci-dessus, l'utilisation de certains stabilisants peut avoir un impact significatif sur l'environnement. Il est important d'examiner attentivement les impacts environnementaux des différentes techniques de stabilisation avant de prendre une décision.



Fig 2.1 Presse manuelle



Fig 2.2 Presse mécanique



Fig 2.3 Stabilisants chimiques avec la chaux



Fig 2.4 Stabilisants chimiques avec le ciment



Fig 2.5 Stabilisation physique avec le mélange de fibres



Fig 2.6 Amélioration à la fissuration

II.2.1 Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique est une technique polyvalente qui peut être utilisée pour améliorer les propriétés d'une grande variété de matériaux de construction. C'est un moyen économique et écologique d'améliorer la résistance, la durabilité et la maniabilité des matériaux de construction en appliquant des forces mécaniques. Cela peut être fait par compactage, vibration ou l'utilisation de matériaux de renforcement.

II.2.1.1 Stabilisation par compactage

Le compactage est le processus de réduction des vides dans un matériau en appliquant une pression. Cela peut être fait à la main ou avec presse mécanique. Le compactage augmente et améliore les propriétés mécaniques de ce matériau de construction naturel, ce qui améliore sa résistance et sa durabilité, **fig 2.7**.

II.2.1.2 Stabilisation par vibration

La vibration est le processus d'application de forces oscillantes à un matériau. Cela peut être fait avec un vibreur électrique ou pneumatique, aiguille ou plaque. La stabilisation avec vibration est utilisée dans les matériaux de construction à base de terre crue pour améliorer leur résistance et leurs propriétés mécaniques. Cette technique vise à renforcer par compactage la densité des matériaux en éliminant les vides et en favorisant une meilleure répartition des particules **fig 2.8**.



Fig 2.7 Compactage des couches de terre crue à l'aide d'un pilon

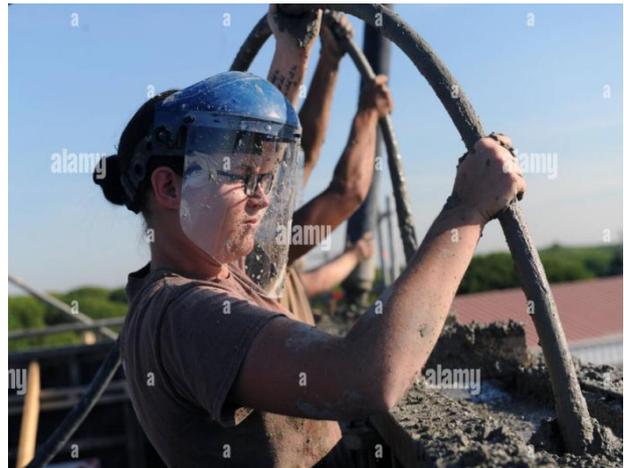


Fig 2.8 Compactage des couches de terre crue à l'aide d'une aiguille vibrante

II.2.1.3 Stabilisation par matériaux de renforcement

Des matériaux de renforcement peuvent être ajoutés aux matériaux de construction en terres crues pour améliorer sa résistance et sa durabilité, tout en réduisant les risques de fissuration et de déformation. Ces matériaux peuvent inclure des fibres, des mailles ou des fils. Les fibres sont de petits morceaux de matériau allongés qui sont ajoutés au matériau pendant le mélange. Le maillage est un réseau de fils qui est ajouté au matériau après mélange. Le fil est un morceau de matériau long et fin qui est ajouté au matériau après le mélange. Le choix des matériaux de renforcement dépendra des propriétés spécifiques du matériau de terre, des exigences structurelles et des contraintes du projet de construction, **fig 2.9**.

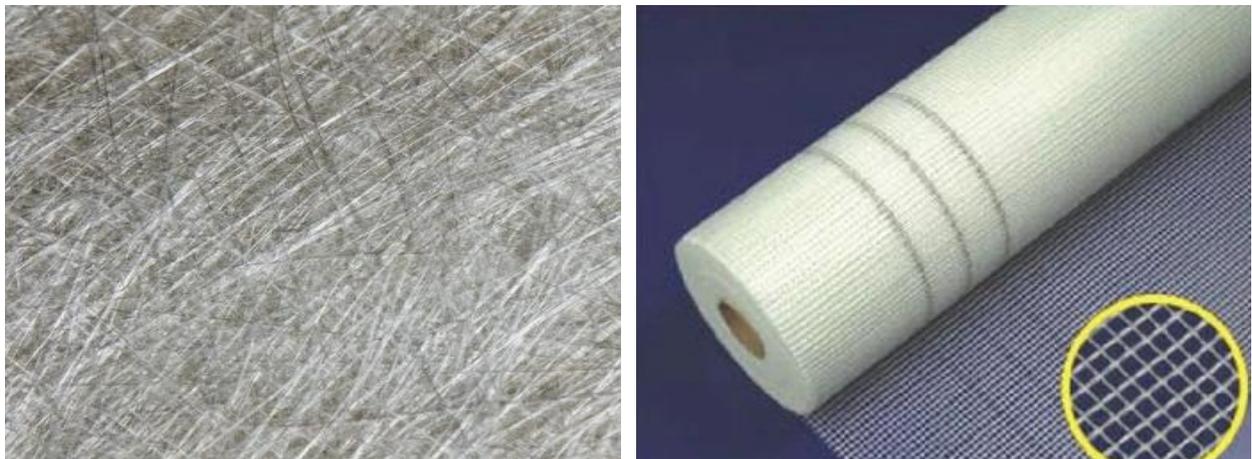


Fig 2.9 Stabilisation par fibres

II.2.1.4 Avantages de la stabilisation mécanique :

Résistance améliorée : La stabilisation mécanique peut augmenter la résistance d'un matériau jusqu'à 50 %. Cela rend le matériau plus résistant à la fissuration et à la déformation.

Durabilité améliorée : La stabilisation mécanique peut rendre un matériau plus durable en le rendant plus résistant aux intempéries et à d'autres facteurs environnementaux.

Amélioration de la maniabilité : la stabilisation mécanique peut rendre un matériau plus facile à travailler, ce qui peut réduire la quantité de déchets et améliorer l'efficacité de la construction.

La stabilisation mécanique est un moyen sûr et efficace d'améliorer la qualité des matériaux de construction. C'est une technique éprouvée qui est utilisée depuis des siècles pour créer des structures résistantes et durables.

II.3 La stabilisation aux liants classiques

La stabilisation aux liants classiques peut également être utilisée dans les constructions en terre crue pour renforcer les caractéristiques mécaniques et la durabilité de ce matériau naturel. Lorsque la terre crue est utilisée comme matériau de construction, elle peut présenter de faible performance en résistance mécanique, en durabilité et en résistance aux intempéries. La stabilisation aux liants classiques permet de surmonter ces limitations en ajoutant des liants traditionnels au mélange de terre.

Le ciment peut être utilisé comme liant dans la stabilisation des constructions en terre crue. En mélangeant du ciment avec la terre crue, on obtient un matériau hybride appelé "béton de terre" ou "terre cimentée". Le ciment réagit chimiquement avec les particules de terre pour former des liaisons solides, ce qui améliore considérablement la résistance et la durabilité de la structure.

La chaux peut également être utilisée comme liant dans la stabilisation des constructions en terre crue. La chaux agit de manière physique en améliorant la cohésion et la résistance de la terre. Elle réduit également la sensibilité de la terre aux variations d'humidité, ce qui contribue à une meilleure stabilité du matériau.

Lorsqu'on utilise des liants classiques dans la stabilisation des constructions en terre crue, il est essentiel de trouver le bon équilibre entre la quantité de liant ajoutée et les propriétés naturelles de la terre. Trop de liant peut rendre le matériau trop rigide et réduire ses qualités thermiques et écologiques. Par conséquent, il est important de mener des essais et des études préliminaires pour déterminer la proportion optimale de liant à ajouter.

II.3.1 La stabilisation aux liants minéraux

La stabilisation aux liants minéraux est la plus répandue dans la littérature. Dans une Revue bibliographique sur la stabilisation de la terre menée par (Danso et al., 2015), 90% des travaux portent sur l'utilisation de liants minéraux dont 50% avec du ciment et le reste est partagé entre les chaux et d'autres additions minérales ou un mélange de plusieurs liants minéraux

II.3.1.1 La stabilisation au ciment

Il existe de nombreuses études sur la stabilisation des briques en terre à l'aide de ciment mais malheureusement peu d'entre elles sont utilisables car il manque parfois des données

importantes (dimensions des échantillons, conditions de cure, ...). Le Tableau 2.1 présente les données de 10 articles sur la stabilisation des briques de terre fabriquées selon différentes techniques comme les blocs de terre comprimée (BTC) ou les adobes (terre moulée à la main et séchée au soleil). Le temps de cure et l'éclatement sont donnés dans ce tableau.

Tableau 2.1 : Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées au ciment

(fc: résistance à compression, n.m: non mesurée)

Reference	Type	Eclatement	Temps de cure (j)	Ciment (%)	fc (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
(Alavéz-Ramírez et al., 2012)	BTC	1	28	0	0,6
				10	23,5
(Medjo Eko 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
(Sore et al., 2018)	BTC	n.m	21	0	1,4
				8	8,2
(Dao et al., 2018)	Adobe	1	Pas de cure	0	2,2
				2	2,6
				4	2,8
				8	3,0
				12	3,2

Les résultats du Tableau 2.1 montrent que le gain de résistance en compression avec l'ajout de ciment est très peu marqué sauf dans l'étude de (Alavéz-Ramírez et al., 2012) où l'ajout de 10% de ciment permet de passer d'une résistance en compression de 0,6 à 23,5 MPa. Pour les autres études, cette augmentation est beaucoup plus faible. Par exemple dans les études de (Alam et al., 2015) et (Dao et al., 2018), les résistances passent respectivement de 1,0 MPa à 2,0 MPa avec 10% de ciment et de 2,2 MPa à 3,2 MPa avec 12% de ciment mais dans ces deux études, il n'y a pas eu de cure humide ce qui peut expliquer la faiblesse des résistances en

compression. Un autre exemple est celui de (Bahar et al., 2004) pour lesquels la résistance passe de 1,6 MPa à 6,4 MPa avec 20% de ciment. Certaines de ces très faibles valeurs de résistance soulèvent des questions car il est classique avec des briques de terre crue fabriquées avec des terres suffisamment argileuses d'avoir des résistances en compression supérieures à 2 MPa. (Aubert et al., 2016), par exemple, ont travaillé sur des briques extrudées non stabilisées et, pour une des terres utilisées, les résistances en compression atteignaient 5,5 MPa et 7,5 MPa pour des élancements respectifs de 2 et 1. La faible augmentation des résistances en compression avec l'ajout de ciment (parfois dans des fortes proportions) confirment les conclusions faites dans l'article de Van Damme et Houben (Van Damme et al., 2017)

II.3.1.2 Stabilisation à la chaux

Il existe aussi certaines études dans lesquelles les briques de terre crue sont stabilisées à la chaux. Le Tableau 2-2 présente les résultats synthétiques de 5 références. Les données présentées sont les mêmes que pour le Tableau 2.2 mais une colonne a été ajoutée sur la nature de la chaux utilisée car les comportements sont très différents entre une chaux hydraulique (mélange de chaux et de minéraux hydrauliques) et une chaux « pure » qu'elle soit éteinte (Ca(OH)_2) ou vive (CaO).

Tableau 2.2 : Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées à la chaux

Référence	Type	Elancement	Durée de cure (j)	Test de tenue à l'eau	Type de chaux	Chaux (%)	fc (MPa)
(Millogo et al., 2008)	Adobe	1	Pas de cure		Mélange de chaux vive et de chaux hydratée	0	2,3
						4	3,2
						6	3,3
						8	3,4
						10	3,5
					12	3,2	
(Alavéz-Ramírez et al., 2012)	CEB	1	28	X	Chaux hydratée	0	0,6
						10	16,5
(Eires et al., 2014)	CEB	1,2	56	X	Chaux hydratée	0	1,0
						4	0,8
						Chaux vive	4
(Alam et al., 2015)	CEB	1	Pas de cure	X	Non spécifié	0	1,0
						5	0,6
						7	0,8
						10	1,3
(Seco et al., 2017)	CEB	1,2	28	X	Chaux hydraulique naturelle (NHL-5)	0	n.m
						10	4,5-5,5

Comme pour les résistances avec 10% de ciment, les résistances en compression sèche avec 10% de chaux des travaux de (Alavéz-Ramírez et al., 2012) sont anormalement élevées en comparaison des résultats des autres études (16,5 MPa à 28 jours). Pour les autres études, le gain de résistance en compression sèche est très faible quelle que soit la teneur en chaux (jusqu'à 12%) et quelle que soit la nature de la chaux utilisée (même pour une chaux hydraulique).

II.3.1.3 Stabilisation avec des liants minéraux alternatifs

Le Tableau 2-3 présente les stabilisations de la terre crue avec les liants minéraux alternatifs.

Tableau 2.3 : Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées avec des liants minéraux alternatifs

Référence	Liant alternatif	Type	Elancement	Durée de cure (jour)	Liant (%)	fc (MPa)
(Alavéz-Ramírez et al., 2012)	Chaux – Cendres de bagasse de canne à sucre	BTC	1	-	0	0,6
				7	20	17,7
				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,					
Villamizar et al. (2012)	Cendre de charbon	BTC	0,5	-	0	1,9
					5	3,3
					10	1,0
(Degirmenci, 2008)	Gypse	Adobe	1	-	0	1
					5	1,2
					10	3,0
					15	4,5
					20	4,6
	25	4,8				
	Phosphogypse	Adobe	1	-	5	1,1
					10	3,0
					15	3,0
					20	4,0
25					4,5	
(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
(Alam et al., 2015)	Gypse	Adobe	1	-	0	1,0
					10	2,4
(Seco et al., 2018)	Géopolymère (Métakaolin)	BTC	n.m	7	0	1,4
					5	2,8

	activé au NaOH)				10	4,4
					15	6,7
					20	8,9

L'objectif de ces études est de proposer de réduire la quantité de ciment ou de chaux avec une pouzzolane à faible empreinte carbone. Un second intérêt est de valoriser des sous-produits industriels (cendres de charbon, cendre de bagasse de canne à sucre ou poussière de fourneau de ciment). Certains de ces liants sont un mélange de pouzzolanes et de ciment ou de chaux ou, dans le cas des géopolymères, l'activation de la pouzzolane (ici du métakaolin) se fait avec de la soude concentrée (Sore et al. 2018). Bien que ces solutions soient supposées moins polluantes que le ciment et la chaux seules, les quantités de liants utilisés semblent élevées (jusqu'à 20%).

Là également, les résultats de (Alavéz-Ramírez et al., 2012) paraissent surprenants : moyennant 20% de mélange de chaux et de cendres de bagasse de canne à sucre, il obtient jusqu'à 21,3 MPa de résistance à la compression. Pour les travaux où l'effet de la cure est étudié (Alavéz-Ramírez et al., 2012; Hossain et al., 2011), on constate que les durées pour obtenir les meilleures résistances sont relativement grandes, ce qui correspond au mécanisme d'action des liants pouzzolaniques dont la cinétique est lente par rapport au ciment.

II.3.2 La stabilisation aux liants organiques

La stabilisation des matériaux de construction avec des liants organiques est un moyen économique et écologique d'améliorer la résistance, la durabilité et la résistance à l'eau d'un matériau. C'est une technique polyvalente qui peut être utilisée dans une variété d'applications, notamment :

II.3.2.1 Stabilisation aux Fibres naturelles : Des fibres naturelles, telles que la cellulose, le chanvre et le jute, peuvent être ajoutées à un matériau pour améliorer sa résistance et sa durabilité. Les fibres naturelles sont longues, fines et flexibles, ce qui les rend efficaces pour renforcer les matériaux.

1) Fibres animales

Composées de substances organiques, les fibres animales, ou protéiniques, se présentent sous forme de poils, de plumes ou de soies tel que : (Laine, Alpaga, Chameau, Cachemire, Guanaco...), **fig 2.10**.

2) Fibres végétales

L'utilisation des fibres naturelles d'origine végétale dans la construction remonte à la période où l'on fabrique des briques renforcées par la paille ou des roseaux. Dans le temps moderne (depuis les années 70), le premier composite liant avec les fibres végétales c'était le plâtre.

Plusieurs ouvrages sont réalisés avec du plâtre renforcé de fibres végétales. Actuellement, le monde connaît de récents développements dans le domaine de renforcement du béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs recherches sont orientées vers la substitution de l'amiante par des fibres végétales. Les différents types des fibres végétales sont : (Coton, Lin, Ramie, Alfa, Sisal, Bambou...), **fig 2.11**



Fig 2.10 Fibres animales

Fig 2.11 Fibres végétales

II.3.2.2 La stabilisation aux biopolymère

Un biopolymère, également appelé polymère biologique, est un polymère produit par des organismes vivants. Les biopolymères contiennent des monomères dérivés de sources biologiques, telles que des plantes, des animaux ou des micro-organismes et il est réparti en quatre grandes familles de molécules : polysaccharides, lipides, protéines, autres molécules complexes :

1) Polysaccharides :

Des polysaccharides, tels que l'amidon, Chitine et la cellulose, peuvent être ajoutés à un matériau pour améliorer sa maniabilité et sa rétention d'eau. Les polysaccharides sont de longues chaînes de molécules de sucre, qui peuvent former une matrice semblable à un gel lorsqu'ils sont mélangés avec de l'eau.

a) Amidon: L'amidon est un glucide (sucre) complexe composé d'unités D-glucose (sucre simple). Il s'agit d'une molécule de réserve pour les végétaux supérieurs et un élément

courant de l'alimentation humaine, **fig 2.12**. Chez les animaux et les champignons, l'équivalent de l'amidon est le glycogène : molécule de stockage de glucides et donc d'énergie.

b) Chitine : La chitine est un polysaccharide naturel présent dans les exosquelettes d'insectes et d'autres invertébrés, **fig 2.13**. C'est un matériau solide et durable qui est utilisé pour fabriquer une variété de produits, y compris le chitosane, un biopolymère qui possède des propriétés antimicrobiennes.

c) Cellulose: La cellulose est le principal composant des parois cellulaires végétales. C'est un matériau solide et flexible qui est utilisé pour fabriquer du papier, des textiles et d'autres produits, **fig 2.14**.

➤ **Avantages de la stabilisation avec des bios polymères Polysaccharides**

La stabilisation avec des biopolymères polysaccharides présente plusieurs avantages dans l'industrie des matériaux. Les avantages clés de la stabilisation avec des biopolymères polysaccharides :

Ressources naturelles renouvelables : Les biopolymères polysaccharides sont généralement dérivés de sources naturelles telles que les plantes, les algues, les champignons, etc. Ces sources sont renouvelables, ce qui réduit la dépendance aux ressources fossiles non renouvelables utilisées dans d'autres liants et stabilisateurs.

Respect de l'environnement : Les biopolymères polysaccharides sont biodégradables et non toxiques, ce qui en fait des alternatives respectueuses de l'environnement par rapport aux liants synthétiques. Ils présentent une faible empreinte carbone tout au long de leur cycle de vie, contribuant ainsi à la durabilité et à la réduction des déchets.

Amélioration des propriétés mécaniques : Les biopolymères polysaccharides peuvent améliorer les propriétés mécaniques des matériaux en les stabilisants. Ils peuvent agir comme des agents de renforcement, augmentant la résistance à la traction, à la compression et la rigidité des matériaux, leur durabilité par la résistance aux intempéries.



Fig 2.12 amidon glucide



Fig 2.13 chitine a base d'insecte



Fig 2.14 Cellulose



2) lipides :

Les bios polymères lipidiques sont un type de bio polymère composé de lipides. Les lipides sont une classe de composés organiques insolubles dans l'eau et solubles dans les solvants non polaires. Les biopolymères lipidiques peuvent être utilisés pour stabiliser les matériaux de construction en formant une couche protectrice à la surface du matériau. Cette couche peut aider à empêcher le matériau d'absorber l'eau et de se dégrader en raison de l'exposition au soleil et à d'autres facteurs environnementaux.

Il existe un certain nombre de types différents de biopolymères lipidiques qui peuvent être utilisés pour stabiliser les matériaux de construction. Certains des types les plus courants incluent:

a) Mucilage: Le mucilage est un type de polysaccharide produit par les plantes. C'est un matériau soluble dans l'eau qui peut former une couche protectrice à la surface d'un matériau
fig 2.15.

b) Cire : La cire est un type de lipide produit par les plantes et les animaux **fig 2.16**. C'est un matériau insoluble dans l'eau qui peut former une couche protectrice à la surface d'un matériau.

Ces types de stabilisation composée de lipides peuvent être appliqués sur des matériaux de construction pour les aider à les protéger de l'eau, de la lumière du soleil et d'autres facteurs environnementaux.

c) Huile de lin : L'huile de lin ou « huile de graines de lin » est une huile végétale de couleur jaune d'or **fig 2.17**, tirée des graines mûres du lin cultivé, pressées à froid et/ou à chaud ; parfois, elle est extraite par un solvant en vue d'un usage industriel ou artistique, principalement comme siccatif, ou huile auto-siccative.

La stabilisation des matériaux de construction avec des bios polymères lipidiques est une technique relativement nouvelle. Cependant, il a le potentiel d'être un outil précieux pour améliorer la durabilité et la durée de vie des matériaux de construction.

➤ **Avantages de la stabilisation avec des bios polymères lipidiques :**

Durabilité améliorée : les bios polymères lipidiques peuvent aider à empêcher la dégradation des matériaux de construction due à l'exposition à l'eau, à la lumière du soleil et à d'autres facteurs environnementaux.

Coûts d'entretien réduits : Les matériaux de construction stabilisés nécessitent moins d'entretien que les matériaux non stabilisés.

Efficacité énergétique accrue : Les matériaux de construction stabilisés peuvent aider à réduire les coûts énergétiques en réduisant les pertes de chaleur et la pénétration d'humidité.

Amélioration de la résistance au feu : Les matériaux de construction stabilisés peuvent aider à améliorer la résistance au feu en ralentissant la propagation du feu.

Respectueux de l'environnement : Les bio polymères lipidiques sont une ressource renouvelable et sont biodégradables.

La stabilisation des matériaux de construction avec des biopolymères lipidiques est une technique prometteuse qui a le potentiel d'améliorer la durabilité, la durée de vie et la durabilité des matériaux de construction.



Fig 2.15 Le mucilage



fig 2.16 La cire



Fig 2.17 huile de graines de lin

3) Protéines:

Les protéines sont essentielles à la vie et jouent un rôle vital dans de nombreux processus biologiques. Ils sont constitués d'acides aminés, qui sont liés entre eux par des liaisons peptidiques. Les protéines interagissent fortement avec les argiles. Les parties hydrophiles s'adsorbent sur les particules argileuses recouvertes de fines couches de molécules d'eau, tandis que les parties hydrophobes restent à l'extérieur de la matière et donc au contact de l'air, formant une sorte de pellicule de surface qui repousse l'eau.

Les protéines sont de véritables colles des argiles et peuvent également présenter un effet hydrophobes en réduisant la sensibilité à l'eau des enduits en terre stabilisés

Les bio polymères à base de Protéines sont un groupe large gamme d'applications et se sont également explorés comme substitut potentiel des plastiques à base de pétrole.

Il existe un certain nombre de types différents de biopolymères à base de Protéines qui peuvent être utilisés pour stabiliser les matériaux de construction. Certains des types les plus courants incluent:

a) L'ovalbumine : L'ovalbumine est une protéine majeure présente dans le blanc d'œuf, **fig 2.17**, représentant environ 54% de la protéine totale. C'est une protéine globulaire d'un poids moléculaire de 45 kDa. L'ovalbumine est une glycoprotéine, ce qui signifie qu'elle est liée de manière covalente aux glucides. La teneur en glucides de l'ovalbumine est d'environ 4 %.

L'ovalbumine est une source très importante pour le développement des bios polymères. Il fournit une colle de source d'acides aminés.

b) L'albumine du sang : L'albumine sanguine est une protéine fabriquée par le foie. C'est la protéine la plus abondante dans le plasma sanguin, **fig 2.18**, représentant environ 60% de la protéine totale. L'albumine sanguine est une protéine globulaire composée de 584 acides aminés, donc aussi une bonne source d'un bio polymère

c) Caséine

Dans notre recherche ont été intéressés par la stabilisation de la BTC avec de la Caséine et c'est pour ça une recherche bibliographique un peu approfondie a été faite vers la Caséine

La caséine est une protéine qui se trouve dans le lait. C'est la principale protéine du lait, représentant environ 80% de la protéine totale. La caséine est une protéine complexe composée de plusieurs sous-unités différentes, **fig 2.19**. Son nom appliqué à une famille de phosphoprotéines généralement trouvée dans le lait de vache, et se trouve généralement sous forme de suspension de particules appelées « micelles de caséine ». Ces micelles de caséine sont maintenues ensemble par des ions calcium et des interactions hydrophobes.

La caséine isoélectrique (acide) précipite dans le lait liquide via acidification à pH 4,6 (HCl est généralement utilisé) et par centrifugation ou filtration. La caséine a une grande variété d'utilisations, y compris dans aliments, peintures industrielles, colles, plastiques, et médicaux et dentaires produits. Parmi les applications industrielles, la caséine a été utilisée comme liants à forte résistivité à l'eau.

Les molécules de caséines, **fig 2.20**, sont présentes dans le lait sous forme de micelle. C'est une pelote sphérique de 100 nm de diamètre en moyenne, constituée d'un assemblage de nombreuses molécules de caséine. La taille de ces dernières est de l'ordre de 10 nm. [10]

Les sources de caséine sont variées : Le lait est la source la plus courante de caséine. Tous les types de lait, contiennent de la caséine même avec une légère différence de pourcentage, le fromage blanc 0 % de matière grasse et la caséine en poudre. Les molécules de caséine sont naturellement organisées en petites pelotes. Pour fabriquer la colle de caséine, cette structure doit être cassée, les molécules de caséine dispersées. Lors de cette étape, le lait ou le fromage blanc perd sa couleur blanche pour devenir translucide. Certaines recettes emploient pour cette étape une base forte, comme l'ammoniaque, du carbonate d'ammonium ou du borax. [11]

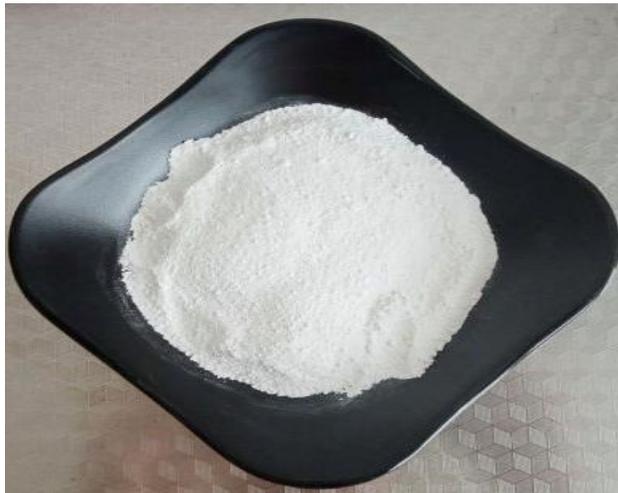


Fig 2.17 L'ovalbumine a base de blanc d'œuf



Fig 2.18 L'albumine sanguine



Fig 2.19 caséine dans le lait

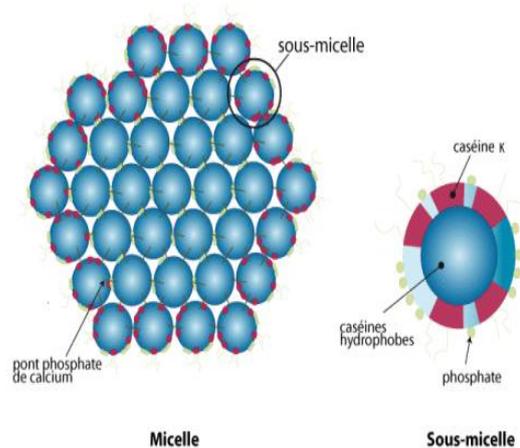


Fig 2.20 Les molécules de caséines

II.3.2.2.1 éclaircissement sur l'utilisation de la caséine

La caséine possède plusieurs propriétés fonctionnelles, telles que sa capacité à former des gels, à stabiliser les émulsions et à se lier aux minéraux tels, Ces propriétés font de la caséine un ingrédient polyvalent dans l'industrie, notamment dans l'utilisation comme un liant.

Les molécules de caséine sont toutes petites en comparaison de la taille des pelotes de caséine. Une fois libérées par l'ammoniaque, ces molécules sont en partie chargées négativement. Elles conservent sur certains morceaux de leur chaîne leur caractère hydrophobe. [11]

Ce sont donc des molécules amphiphiles : capables de lier à la fois l'eau et à la fois l'air ou des composés ou matériaux hydrophobes. La présence d'une charge négative entraîne, suivant les conditions de pH et de force ionique, une attraction ou une répulsion d'origine électrostatique.

Suivant la charge portée par les argiles, la caséine peut donc avoir un rôle de dispersant (par neutralisation de charge) ou de colle en liant fortement les particules d'argile entre elles.

La caséine est utilisée pour la fabrication de peintures à eau, de papier couché, de plastiques ininflammables, de fibres textiles, de produits pharmaceutiques, etc.... (Génin, 1958). La colle industrielle à base de caséine s'obtient en ajoutant un alcali dans de la caséine préalablement délayée dans l'eau (Beau, 1941). En 2015, la production du lait s'élevait à plus de 25 milliards de litres. 30% sont utilisés pour la fabrication de produits intermédiaires dont la caséine et ses dérivés. En équivalent masse sèche utile du lait, la production de caséine et de caséinate représente 2,1% ("L'économie laitière en France," 2010). [12]

II.3.2.2.2 Précipitation de la caséine après ajout d'acide

Lorsque le pH du lait est compris entre ses valeurs habituelles soit entre 6,3 et 6,6, les protéines sont dispersées dans le liquide et forment une solution homogène. Mais si la valeur du pH diminue par ajout d'un acide, les macromolécules de protéines se regroupent et se lient entre elles pour former un solide insoluble, les micelles de caséines, qui précipite au fond du récipient, ceci lorsque la valeur du pH du lait atteint 4,6. Ainsi, la charge électrique de la caséine varie avec le pH. [12]

II.3.2.2.3 Production de Caséine

Le procédé d'extraction des caséines est très spécifique, **fig 2.21**. Les principales étapes sont les suivantes:

- Coagulation du lait (écrémé), obtention d'un caillé
- Séparation solide (caillé) / liquide (sérum), par centrifugation
- Purification des grains de caillé (le "lavage")

- Séchage sur séchoir vibre-fluidisé
- Éventuellement broyage des grains

La caséine est largement utilisée comme ingrédient alimentaire (dans les glaces, les yaourts, les charcuteries, les sauces, etc.), mais aussi dans les cosmétiques, la chimie (liants dans les peintures, les adhésifs) et même par le passé pour faire de beaux boutons de vêtements [13]

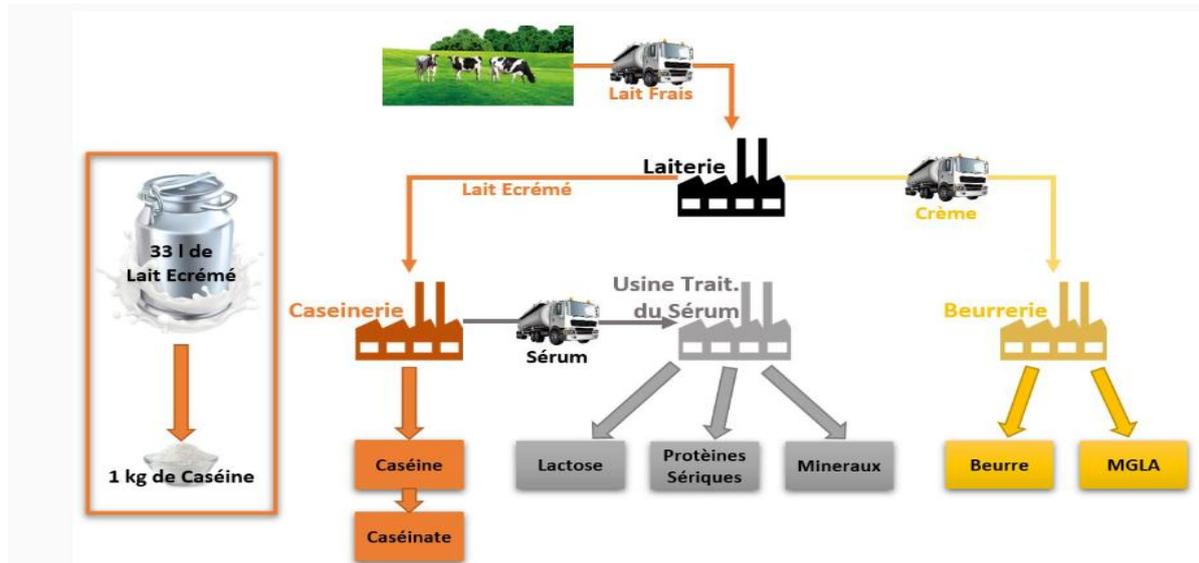


fig 2.21 processus de production de la caséine

II.3.2.2.4 Utilisation de la caséine en géotechnique

La caséine est couramment utilisée en géotechnique. Dont les expérimentations en laboratoire ont montré de bons résultats dans l'amélioration des propriétés mécaniques des sols sableux et argileux.

Et elle est utilisée dans une large variété d'applications géotechniques, notamment :

Stabilisation du sol : La caséine peut être ajoutée au sol pour améliorer sa résistance et sa stabilité. Cela peut être fait en mélangeant de la caséine avec de l'eau, puis en l'ajoutant au sol. La caséine formera un film autour des particules de sol, ce qui aidera à les lier ensemble.

Contrôle de l'érosion : la caséine peut être utilisée pour prévenir l'érosion. Cela peut être fait en appliquant de la caséine à la surface du sol ou en mélangeant de la caséine avec de l'eau puis en la pulvérisant sur le sol. La caséine formera un film à la surface du sol, ce qui aidera à empêcher l'eau et le vent d'éroder le sol.

Jointoiment : La caséine peut être utilisée pour jointoyer le sol. Cela peut être fait en mélangeant de la caséine avec de l'eau, puis en l'injectant dans le sol. La caséine remplira les vides du sol, ce qui contribuera à améliorer sa résistance et sa stabilité.

La caséine est un matériau sûr et efficace qui peut être utilisé dans une variété d'applications géotechniques. C'est un bon choix pour les projets où la résistance, la stabilité et le contrôle de l'érosion sont importants.

➤ **Avantages de l'utilisation de la caséine en géotechnique :**

La caséine est une matière naturelle biodégradable.

La caséine est non toxique et sans danger pour l'environnement.

La caséine est facile à utiliser et peut être appliquée avec une variété de méthodes.

La caséine est rentable et peut être utilisée pour améliorer la résistance et la stabilité du sol à une fraction du coût des autres matériaux.

Si vous recherchez un moyen sûr, efficace et rentable d'améliorer la résistance et la stabilité du sol, la caséine est une bonne option.

Depuis quelques années, la caséine est devenue l'un des bio-polymères utilisés dans les études géotechniques dont les expérimentations en laboratoire ont montré de bons résultats dans l'amélioration des propriétés mécaniques des sols sableux et argileux.

II.3.3 Effet sur les résistances mécaniques

Le Tableau 2-4 présente les résistances à la compression des matériaux stabilisés avec des liants organiques. Dans une optique de cohérence, nous avons recalculé les pourcentages massiques équivalents des liants à partir des données disponibles dans les références. En effet, certains liants sont ajoutés sous forme liquide ou sous forme dilués dans de l'eau.

Tableau 2-4 : Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées avec des liants organiques

Référence	Liant (s) organique (s)	% liant	Activation	Fibres	Type	Elancement	(MPa)
(Aguilar et al., 2016)	Chitosan dissoute à 0,5%-3% en masse dans une solution d'acide acétique	0%		-	adobe	2,1	2,1
		1%	Solution de 1% d'acide acétique				3,9
(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% ammoniacque	1,3-7,5				

Marín et al., 2010)	Alginate	0%	0,5% Lignum (résine de Guayacan)	0%	BTC	1	2,2
		19,5% (en solution, concentration non renseignée)		0%, 0,25% et 0,50% de laine de mouton			3,8-4,4
(Pineda Piñón et al., 2007)	Dodécylamine cationique	0%	-	-	adobe	1	n.m
		0,33%	3% bitume émulsifié	-			2,2
		0,25%	3% bitume émulsifié	-			1,8
(Camões et al., 2012)	Huile usée 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)	Tanins (décoction de cosses de Parkia Biglobosa)	0%	-	-	BTC	1	2,0
		1,44%	-	-			2,1
(Millogo et al., 2016)	Bouse de vache	1%-3%	-		adobe	1	2,1
				Bouse de vache			2,5-2,7
(Nakamatsu et al., 2017)	Carageenan En solution	0%	-	-	adobe	2	2,1
		0,125%-0,5%	-	-			3,9
(Chang et al., 2015)	Gomme Xanthan	0%	-	-	adobe	1	0,4
		1%	-	-			3,7
(Yalley and Manu, 2013)	Bouse de vache	0%	-		BTC	n.m	4,6
		5%-30%	-	Bouse de vache			4,6-5,8
(Pinel et al., 2017)	Alginates	0%	-		coulé	2	n.m
		0,5%	0,075% CaCO ₃ , 0,275% GDL (glucono-delta lactone), HMP-Na (Hexametaphosphate de sodium)	-			2,5
(Corrêa et al., 2015)	Salive synthétique de termites	0%			adobe	1	0,6
		0,067%	0,02% de sulfate d'aluminium (Al ₂ (SO ₄))	2%-6% fibres de fines de bambou			1,0-1,1
(Alhaik et al., 2017)	amidons	0%		-	coulé	1	3,0
		1%	Chauffage à 120°C	-			4,0-7,0

Bien qu'on retrouve les quatre grandes familles de polymères organiques naturels (polysaccharides, protéines, lipides et autres molécules complexes), le nombre de recherches sur ces types de liants reste faible au regard de la très grande variété de produits existants dans la nature. Dans la plupart des cas, les liants organiques sont utilisés en association avec des agents d'activation. Par exemple, (Pinel et al., 2017) a démontré qu'en plus d'une source de calcium, des agents régulateurs (hexaméthaphosphate de sodium et le GDL) sont nécessaires pour une bonne efficacité de l'alginate. De même, (Guerrieri, 2012) explique le rôle que l'ajout d'un modificateur de pH comme l'ammoniaque est nécessaire pour déployer les propriétés collantes de la caséine. Enfin, (Alhaik et al., 2017), en étudiant onze amidons, a montré que selon la source et le traitement industriel de l'amidon ainsi que la nature du sol stabilisé, les résultats étaient très différents.

Si les agents d'activation sont nécessaires pour certains liants organiques (alginate, caséine, etc.), le mélange avec des fibres, et même des liants minéraux (chaux) rend difficile l'identification de l'effet propre aux liants organiques. En général, le gain de résistance à la compression des sols avec l'ajout des liants organiques est très faible. Cela démontre que le principal intérêt de ces ajouts n'est pas l'amélioration des performances mécaniques du matériau. Pour certaines études comme (Corrêa et al., 2015), (Yalley and Manu, 2013), ou (Sorgho et al., 2014), l'ajout des liants organiques n'a aucun effet sur les résistances à la compression du matériau.

CONCLUSION

Toutes les techniques de stabilisation ne sont pas favorables à n'importe quel type de technique de construction en terre crue et/ou à n'importe quelle dimension car elles ont été expérimentées, étudiées dans les conditions bien précises. C'est pourquoi une technique peut être efficace dans une telle technique de construction en terre crue mais pas dans une autre, être adaptée avec un tel type de sol mais pas avec l'autre, etc. Chaque situation est unique d'où il faut une étude comparative des différentes techniques de stabilisation pour trouver une meilleure solution. L'objectif de cette étude est de comparer les résultats de techniques de stabilisation en bio-liant (caséine) et d'apprécier son efficacité. En d'autres termes, il s'agit de trouver un pourcentage idéal pour améliorer l'échantillon de son comportement mécanique et durabilité naturel à un bon comportement. Le travail consiste à échantillonner,

formuler et élaborer le kaolin et appliquer la technique de stabilisation en bio-liant et trouver un pourcentage optimal du dosage en bio-liant.

CHAPITRE III

IDENTIFICATION DU SOL ET VERIFICATION AVEC NORME B.T.C

III Introduction

La détermination des caractéristiques d'un sol nécessite une description détaillée du sol à étudier et son utilisation à travers la réalisation de différents essais, ces derniers ont des normes à respecter qui définissent comment doivent être conduites les opérations de qualification d'un échantillon. Ce processus nous permettra de bien tracer le chemin qui mène à la faisabilité ou non de ce matériau. Notre recherche a ciblé principalement le kaolin de djebel Debagh à Guelma dans le but d'assurer la faisabilité technique et la durabilité de l'utilisation de ce sol dans la fabrication des briques en terre crue BTC.

La première partie consiste à présenter les matériaux, il s'agit de la terre utilisée pour confectionner les briques et la caséine comme un stabilisant organique. La deuxième partie présente les normes, le matériau utilisé ainsi que les résultats des essais réalisés. La dernière partie présente le processus et les manipulations faites pour la confection des briques en terre crue.

III.1 Matériaux étudiés

III.1.1 le kaolin

Le kaolin est une argile blanche, friable et réfractaire, composée principalement de kaolinite, qui est un silicate d'aluminium, utilisé dans l'industrie du papier, la médecine et les cosmétiques. Le terme kaolin tire son nom de la colline en Chine (Kao-ling), où il a été exploité pendant des siècles. Des échantillons de kaolin, **fig 3.1** ont d'abord été envoyés en Europe par un missionnaire jésuite français jusqu'en 1700 comme exemple de matériau, qui est utilisé par les Chinois dans la fabrication de porcelaine



Fig 3.1 échantillon de kaolin

III.1.2 Situation géographique

Le Gisement de Djebel Debagh s'étale sur une superficie de 391 hectares, **fig 3.2**. Il se trouve à 17 Km de la ville de Hammam Debagh, **fig 3.2**, chef lieu de daïra. Les villes de Guelma et d'Annaba sont respectivement à 35 km au Sud-Est et à 90 Km au Nord-Est.



Fig 3.2 vue aérienne du gisement



Fig 3.3 Situation géographique du gisement

III.1.3 Collecte de l'échantillon

L'échantillon est récupéré et dégagé proprement dans une zone bien localisée sans extraire ou ajouter quoi que ce soit de son état naturel. Propre sans matière organique telle que des racines végétales, des graines, **fig 3.4**.

Afin de pouvoir mener l'ensemble des essais prescrit pour caractériser une terre à utiliser comme matériau de construction, on extraira des échantillons d'environ 80 kg.



Fig 3.4 Collecte de l'échantillon

III.2 Essais d'identification

Dans les études géotechniques, les essais d'identifications sont des tâches principales. Ces Essais sont effectués comme suit :

III.2.1 Examen visuel

L'examen visuel du sol est une étape importante dans l'évaluation de la qualité du sol et de ses caractéristiques. Il s'agit d'une méthode d'observation directe du sol pour recueillir des informations sur sa couleur, sa texture, sa structure, sa porosité et d'autres caractéristiques visibles. En effet, la limite de visibilité à l'œil nu correspond aux dimensions supérieures à 0,08 mm. (Horsch B, 2014) (Guillaud, H, 1995).

III.3 .2 Essai au toucher

Pour réaliser le second test, on effrite une petite quantité de terre entre les doigts et la paume de la main. Si l'on éprouve une certaine rugosité au toucher et s'il n'y a aucune cohésion entre les grains même après humidification de l'échantillon, la terre sera désignée comme sableuse. Si l'on ressent une faible rugosité et qu'après humidification, l'échantillon devient moyennement plastique, la terre sera silteuse. Si la terre présente des mottes résistant à l'écrasement à l'état sec et qu'elle devient plastique et collante lorsqu'on l'humidifie, la terre sera argileuse. Bien entendu, on ne se limitera pas à analyser l'échantillon mais on observera également toute la zone environnante : les constructions en terre déjà présentes, la terre utilisée pour les routes avoisinantes, l'épaisseur des différentes couches de sol, etc. (Horsch B, 2014) (Guillaud, H, 1995).

III.3.3 Analyse granulométrique par lavage et sédimentométrie selon les normes NF P18-560 et NF P94-057

L'analyse granulométrique est un essai qui consiste à étudier et déterminer à travers deux essais la composition granulaire de l'échantillon, c'est-à-dire la distribution des grains suivant leurs dimensions en déterminant par pesée l'importance relative des classes de grains de dimension bien définies par pourcentages. Elle se fait par tamisages ; en passant dans une série de tamis de maille carrée de plus en plus petit pour la fraction de granulats.

L'opération consiste à éliminer par lavage à l'eau des fillers puis à procéder à un tamisage après séchage à l'étuve. À partir de la masse on détermine les différents pourcentages des refus. Les résultats sont exprimés sous forme d'un graphique appelé courbes granulométriques. Cette courbe est l'un des indicateurs permettant de caractériser la distribution granulométrique du matériau.

a) Matériel nécessaire :

Une série des tamis ,Une étuve pour le séchage, Brosse, Balance électrique , éprouvettes cylindriques graduées en verre transparent ,un densimètre, un thermomètre , un chronomètre ,un agitateur manuel ,une balance de précision de 0.01g, un tamis de diamètre 80 μ m , un bac pour recueillir le tamisât , un agitateur manuel , eau distillé, **fig 3.5**

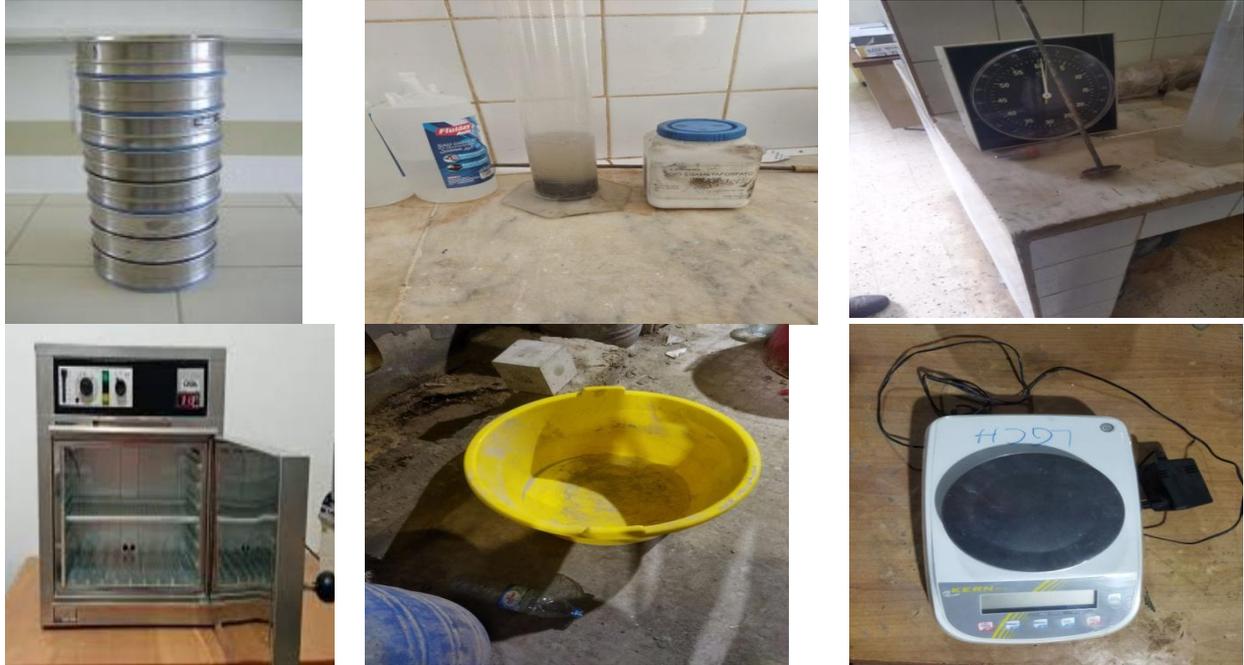


Fig 3.5 Matériel nécessaire pour essai proctor

b) Mode opératoires :

Les préparations avant l'essai :

Après l'échantillonnage (c'est à dire bien homogénéise le matériau), le tas Reserve pour l'essai granulométrique par tamisage est recueilli dans un plat et puis en pèse l'échantillon. On trempe le matériau pesé dans l'eau pendant 24h et puis l'exécution de l'essai.

Lavé et élimine les éléments au moyen d'une série de tamis empiler dans l'ordre croissant; c'est-a-dire le tamis des petites diamètre en bas et le plus grand en haut, puis agiter doucement horizontalement le tout manuellement jusqu'a ce qu'il ne passe pratiquement plus de matière susceptible d'influencer les résultats de façon significative . Puis agiter individuellement chaque tamis, supérieure jusqu'au dernier (tamisage). Ensuite nous mettons les tamis dans l'étuve pour séchage avant pèse le refus cumule c'est a dire peser le contenu de premier tamis puis y ajouter le contenu immédiatement inférieure pour avoir le refus cumule puis en porte les résultats des refus cumules en gramme dans le tableau.

La fraction fine de taille inférieure à 80 μ m est reprise pour faire l'essai de sédimentométrie. Les particules passant 80 μ m séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans

de l'eau additionnée d'un défloquant. Les particules décantent à différentes vitesses en relation avec leur taille. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de la masse volumique de la solution qui évolue au fur et à mesure qu'elle se décante.

1) Résultat d'Analyse granulométrique

Tableau d'Analyse granulométrique et sédimentométrie

Tableau 3.1 d'Analyse granulométrique et sédimentométrie

Masse total de l'échantillon 700 gr					
tamis (mm)	poids refus partiels(g)	refus partiels (%)	poids de refus cumulés (g)	refus cumulés (%)	passant (%)
6,30	67,06	9,58	67,06	9,58	90,42
5,00	14,84	2,12	81,90	11,70	88,30
4,00	11,80	1,69	93,70	13,39	86,61
3,35	14,89	2,13	108,59	15,51	84,49
2,00	31,64	4,52	140,23	20,03	79,97
1,18	38,55	5,51	178,78	25,54	74,46
0,80	26,69	3,81	205,47	29,35	70,65
0,63	13,86	1,98	219,33	31,33	68,67
0,50	15,56	2,22	234,89	33,56	66,44
0,40	8,46	1,21	243,35	34,76	65,24
0,30	20,83	2,98	264,18	37,74	62,26
0,25	8,31	1,19	272,49	38,93	61,07
0,16	29,44	4,21	301,93	43,13	56,87
0,08	10,77	1,54	312,70	44,67	55,33
0,0737					55,31
0,0525					53,92
0,0377					52,33
0,0240					48,96
0,0171					47,37
0,0124					45,66
0,0099					43,68
0,0065					40,96
0,0038					39,20
0,0016					36,30

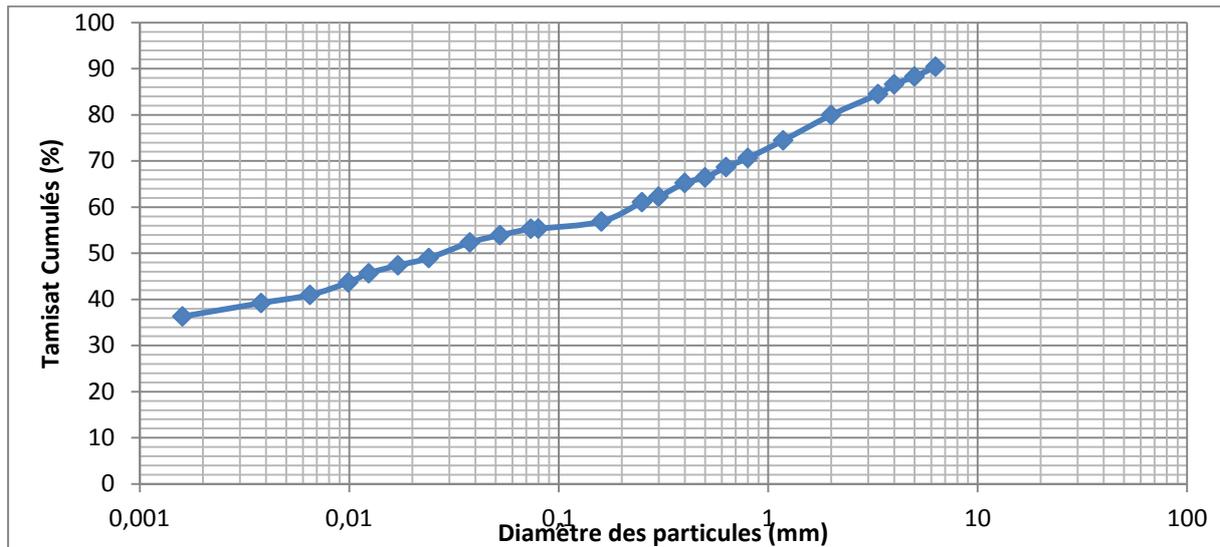


Fig 3.6 Courbe granulométrique du sol étudié

III.3.4 Essai au bleu de méthylène Conforme NF P 94-068

L'essai au bleu de méthylène dit (a la tache) permet la détermination de l'activité et de la quantité de la fraction argileuse d'un échantillon.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement des quantités de solution de "bleu" et en contrôlant l'adsorption au fur et à mesure. Une goutte de suspension est prélevée et est déposée sur un filtre. L'essai consiste à déterminer l'adsorption maximale obtenue lorsque la tâche est entourée d'une auréole bleu-clair persistante.

a) Matériel nécessaire :

agitateur électrique, tige de verre, papier filtre, Liquide de bleu de méthylène, eau distillé, burette graduée 50cm³ ,fig 3.7



Fig 3.7 Matériel nécessaire Essai au bleu de méthylène

b) Mode opératoires :

Agiter la solution à la vitesse de 700 tr/min pendant 5 min, puis agiter continuellement à 400 tr/min pendant la poursuite de l'essai.

Après chaque injection de colorant à l'aide de la burette (5ml toutes les minutes), le test à la tache consiste à prélever à l'aide de la tige de verre une goutte de la suspension et de la déposer sur le papier filtre disposé au fond du bécher. La tache qui se forme est composée d'un dépôt central de matériau, en général d'une couleur bleu foncé, entouré d'une zone humide incolore), **fig 3.8**.

La quantité de suspension prélevée par la goutte doit permettre d'obtenir un dépôt dont le diamètre est compris entre 8 mm et 12 mm. Le test est considéré comme positif si, dans la zone humide, une auréole bleu clair persistante d'environ 1 mm apparaît autour du dépôt central. Le point final doit être confirmé en répétant le test à la tache toutes les minutes pendant 5 min sans ajout de solution de colorant.

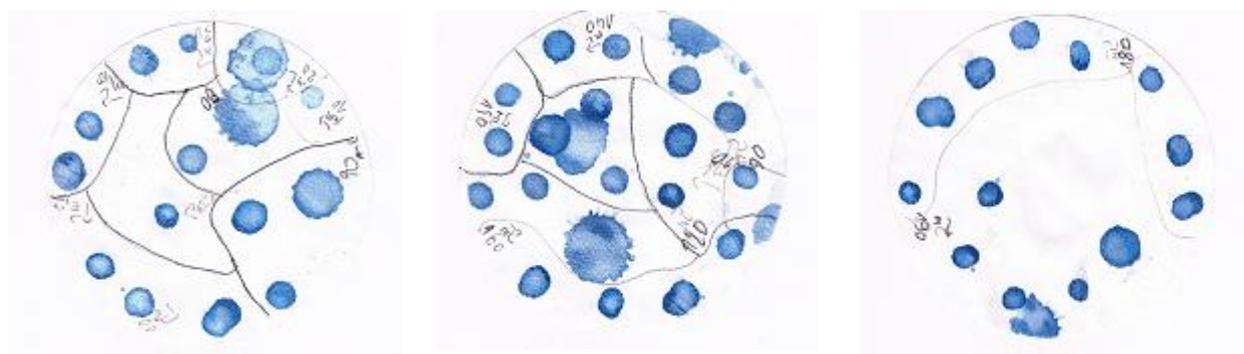


Fig 3.8 Détermination de la valeur au bleu de méthylène du sol

1) Résultats de l'essai au bleu de méthylène

Tableau 3.2 Résultat de l'essai au bleu de méthylène

poind	30
fraction	0,04
volumede bleu	190
massede bleu	3,8
VBS	6,33

B : masse de bleu introduite (solution à 0/l) : $B = V \times 0,01$

$B = 180 \times 0,01 = 1,80 \text{ g}$

$VBS = (B/m_0 \times C) \times 100$ Si : $D_{max} > 5\text{mm}$.

$VBS = (B/m_0) \times 100$ Si : $D_{max} < 5mm$.

Donc : $VBS = (1.90/30) \times 100 = 6,33$

La valeur de bleu (VBS) s'exprime par la quantité de bleu en grammes consommée par 100 grammes de fines. **Tableau 3.3** montre la classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène.

Tableau 3.3 Classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène

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

D'après les résultats trouvés et rapportés au tableau 4.3, le sol étudié est considéré comme **sol argileux**.

III.3.5 Limites d'Atterberg (NORME NF P 94-051)

Les limites d'atterberg informe sur l'étendue de la plage de la teneur en eau à l'intérieure à la quelle l'échantillon remanié a un comportement plastique. C'est l'un des essais de laboratoire le plus complexe car elle demande la présence effective, l'attention ainsi que le bon sens de l'opérateur. L'essai s'effectue sur les fines passant au travers du tamis d'ouverture 400 μm

1) Limite de liquidité (W_L):

Le but de cette essai est de déterminée la teneur en eau d'un échantillon a sont passage de l'état plastique a l'état liquide. L'essai consiste a déterminé le nombre de coup a coupelle de casagrande de renfermer d'environ 1cm les deux lèvres de la rainure et de déterminer la teneur en eau correspondant au nombre de coups. On répète 5 fois l'opération et on trace la droite de la limite de liquidité appel courbe d'écoulement, représentant la teneur en eau en fonction de nombre de coups. la limite de liquidité est ainsi obtenue a partir de cette courbe et correspond a la teneur en eau obtenue avec le 25 coups a la coupelle de casagrande.

Matériel nécessaire :

appareil de Casagrande ,outil à rainurer ,cale d'épaisseur 10 mm ,Une plaque de verre, Un rouleau \varnothing 3 mm, capsules de pesée, étuve, une balance de précision de 0.01g spatule, un tamis de diamètre 400 μ m **fig 3.9**



Fig 3.9 Matériel nécessaire Limites d'Atterberg

Mode opératoire:**a-préparation avant l'essai:**

A près l'échantillonnage, l'échantillon réservé aux limites est lavé à l'eau sur le tamis de 0,4mm. seule les particules fins passant a cette tamis recueillies dans un plat seront retenues pour l'essai.

b-l'execution de l'essai:

L'échantillon est renverse sur la plaque en verre, et on commence le malaxage qui dure quelques minutes. Le but est d'homogénéiser la pate et on la considérera homogène lorsque qu'elle est exempte de morte. une fois homogène et après avoir nettoyé la coupelle de casagrande, la pate est délicatement remplie sur la plateau de la coupelle et on racle soigneusement la moitié que l'on remet sur la plaque. le but de raclage est de respecter la prescription de la norme selon laquelle l'épaisseur au centre doit être de 15 a 20 mm. Aussi, la pression exercée sur la pate permet pour ainsi de rendre le remplissage parfait. A l'aide l'outil a rainurer, on crée d'un seule mouvement une rainure séparant la pate complètement en deux. A l'aide de la manille de la coupelle, effectuer une série de choc régulier d'environ 02 coups\s. pendant ce temps l'attention de l'opérateur doit être fixée sur les deux lèvres de la rainure car il doit arrêter les coups dès lors qu'elle se touche d'environ 15 mm. L'essai n'est acceptable que si l'on obtient un nombre de 15 a 35 coups .Noter chaque nombre de coups et prélevés des tares pous déterminer la teneur en eau après avoir pesé la masse humide les mets dans l'étuve a 105° puis les pesé en état sèche.

Tablau 3.4 Limite de liquidité

Echantillon	1	2	3	4
Nombre de coup	33	26	22	15
Tare (gr)	13,3	15,3	13,5	13,5
Tare + sol humide (gr)	30,8	30,7	33,9	35
Tare + sol sec (gr)	25,5	25,7	25	24,5
M_h (gr)	17,5	15,5	17,3	17,3
M_s (gr)	12,2	10,4	11,5	11
M_w (gr)	5,3	5,1	5,8	6,3
W_L %	43,44	49,04	50,43	57,27
W_L % Moyenne	50,05			

Les résultats son introduit dans la courbe fig 3.10

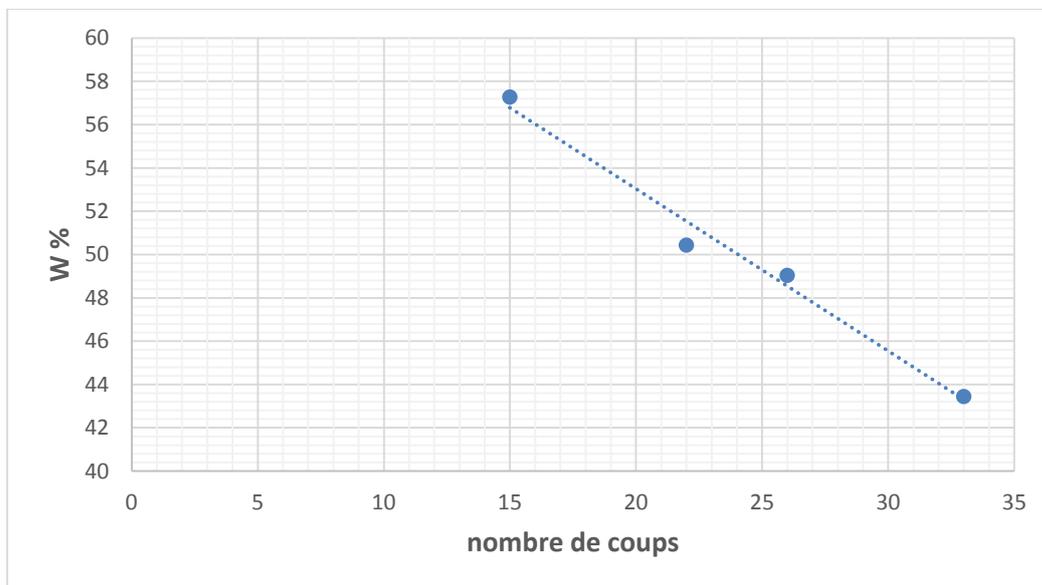


Fig 3.10 Courbe Limite de liquidité

2) Limite de plasticité (W_p):

Cet essai relativement plus simple que le précédent a pour but de déterminer la teneur en eau d'un échantillon de sol de sont passage de l'état solide a l'état de plastique. le principe de l'essai consiste a rouler a la main et contre une plaque un échantillon de sol jusqu'a observer l'apparition des fissures et procéder a la détermination de la teneur en eau dès l'apparition de ces fissures.

Mode opératoire:

L'exécution de l'essai consiste à confectionner un cylindre de terre en roulant à la main et contre une plaque un échantillon de 5g jusqu'à ce qu'il présente des dimensions suivantes:

- Diamètre 3mm
- longueurs de 10-15cm

On s'arrête dès l'apparition des fissures sur le cylindre. Découper ensuite ce cylindre en trois ou quatre parties que l'on partage dans deux tares. Répéter l'opération cinq ou six fois et peser les cylindres dans des tares pour déterminer la masse humide. Des tares sont ensuite mises à l'étuve pour la détermination de la teneur en eau

Tableau 3.5 Limite de liquidité

Echantillon	1	2	3	4
Tare (gr)	3,5	3,3	4,2	4,1
Tare + sol H (gr)	5,2	5,2	5,7	6,4
Tare + sol sec (gr)	4,9	4,8	5,4	5,9
Mh (gr)	1,7	1,9	1,5	2,3
Ms (gr)	1,4	1,5	1,2	1,8
Mw (gr)	0,3	0,4	0,3	0,5
W_p %	21,43	26,67	25	27,78
W_p % Moyenne	25,22			

La limite de plasticité est la moyenne des trois teneurs en eau indiquées au tableau 3.7. Elle est égale à : $W_p = 25,22\%$

IP est l'indice de plasticité : c'est la différence entre les deux limites de liquidité et de plasticité, il caractérise l'étendue ou la zone où le sol étudié a un comportement plastique.

$$IP = WL - WP = 50,05 - 25,22 = 24,83 \% \approx 25 \%$$

D'après ce qui est trouvé, on peut donner la classification du sol étudié.

Tableau 3.6 Etat du sol en fonction de l'indice de plasticité

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

L'état du sol est **Plastique** Tableau 3.6

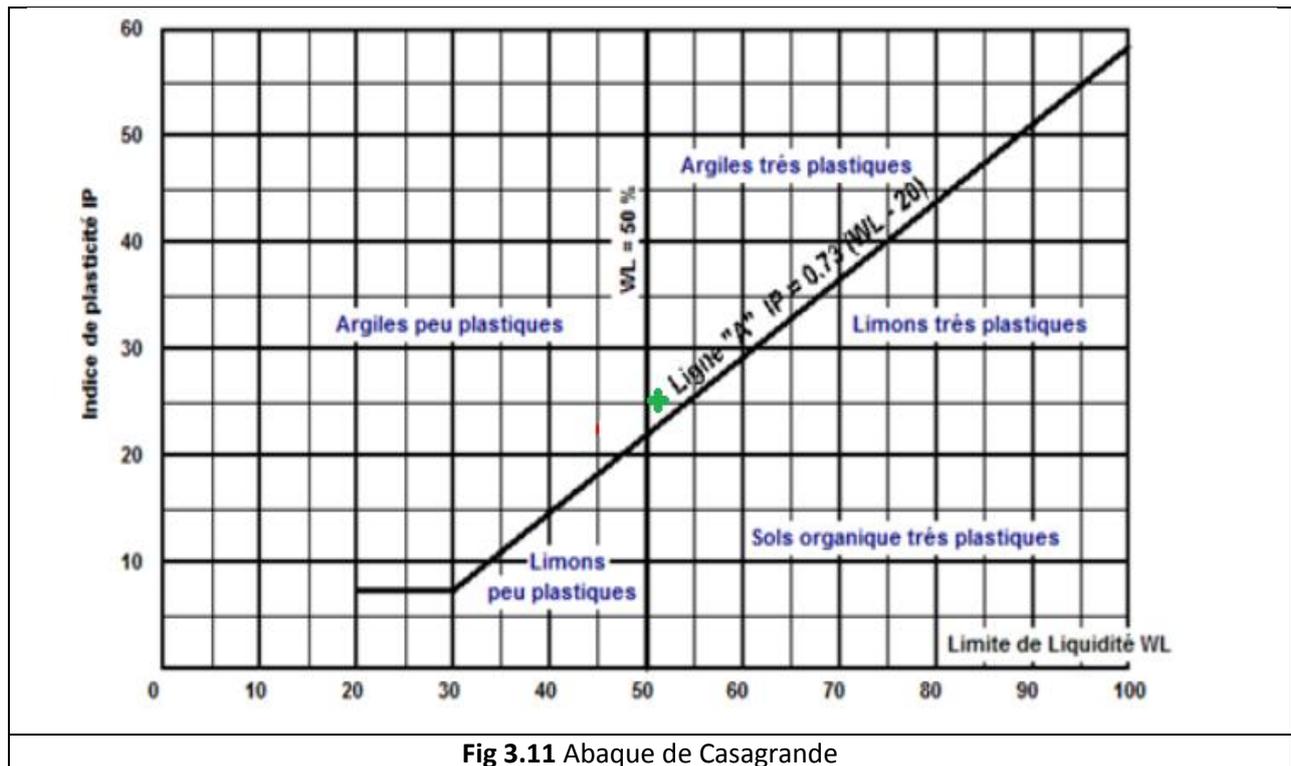


Fig 3.11 Abaque de Casagrande

III.3.6 Limite de Retrait linéaire LR la norme BS 1377

Le retrait linéaire est la teneur en eau pondérale conventionnelle de dessiccation d'un sol remanié, au dessous de laquelle la longueur de l'échantillon est supposée ne plus varier.

Elle est déterminée par la norme BS 1377. Après le séchage de l'échantillon dans un endroit à l'abri du courant d'air pour plusieurs jours, la longueur finale est mesurée.

Le Moule pour la confection d'éprouvettes est un demi-cylindre de 140 mm de longueur et de 12,5 mm de rayon, comme le montre la **fig 3.12**. Cet essai permet la mesure de la limite de retrait linéaire du sol et indique les propriétés plastiques du sol argileux

a) Matériel nécessaire :

Moule demi-cylindre 12,5 mm de rayon et de 140 mm de longueur, pied a coulisse et un tamis 0,4 mm



Fig 3.12 Matériel nécessaire pour essais de Limite de Retrait linéaire

Tableau 3.7 Limite de Retrait linéaire

Dosage en (%)	Longueur initiale (mm) L_0	Longueur finale (mm) L_1	Retrait linéaire moyen (%) $SL = \frac{(L_0 - L_1)}{L_0} \times 100$
0	14	12,51	10,64
1	14	12,62	9,86
2	14	12,75	8,93

D'après le **tableau 3.7**, la limite de retrait est relative en fonction de l'augmentation ou démunissions du dosage du produit de traitement (caséine)

III.3.7 L'essai Proctor selon la norme NF 94-093

C'est l'un des essais les plus utilisés en domaine de géotechnique. Il a pour but de déterminer au laboratoire la teneur en eau optimale (T.E.O) pour notre échantillon et conditions qui conduit à la meilleure compression possible ou encore capacité portante maximale. La T.E.O. coïncide avec la masse volumique la plus grande qu'il est possible d'atteindre avec l'énergie de compactage mise en œuvre. L'interprétation des résultats obtenus est la suivante : « si la masse volumique sèche obtenue à la T.E.O. est comprise entre 1650 et 1760 kg/m³, le résultat est assez médiocre, entre 1760 et 2100 kg/m³, le résultat est très satisfaisant, le matériau assez argileux. Entre 2100 et 2200 kg/m³, le résultat est excellent, le matériau riche en gros éléments. Entre 2200 et 2400 kg/m³, le résultat est exceptionnel » (Doat et al., 1979 : p. 178)[14]. La T.E.O.

Matériel nécessaire :

Moule CBR (éventuellement Proctor), Dame proctor normal et Dame proctor modifié, Règle à araser, Bacs d'homogénéisation pour préparation l'échantillon, Tamis 5 mm Truelle, spatule,

pinceau... etc, Petits récipients (mesures des teneurs en eau), Balance portée 20 kg, précision 5 g, Balance de précision a 0,1 g, Etuve 105°C a 5°C fig 3.12.



Fig 3.12 Matériel nécessaire pour essai Proctor

Mode opératoires :

Assembler moule + embase + disque d'espacement + disque de papier au fond du moule pour faciliter le démoulage puis peser l'ensemble soit P1, adapter la rehausse.

On prend 2,5 kg de l'échantillon préalablement préparé qu'on verse dans un bac.

On ajoute une certaine quantité d'eau proportionnelle au poids de l'échantillon utilisé.

A l'aide de la truelle on malaxe bien l'échantillon.

Introduire la 1ère couche et la compacter. Placer le moule sur un socle en béton d'au moins 100 kg, ou sur un plancher en béton de 25 cm d'épaisseur, pour que l'ensemble de l'énergie appliquée le soit à l'échantillon. Astuces : faire des rayures sur la surface compactée (améliore la liaison avec la couche suivante), Recommencer l'opération pour chaque couche (3 pour énergie de compactage Normal, 5 pour Modifiée). La quantité de matériau à utiliser, pour chaque couche, est approximativement :

Après compactage de la dernière couche, enlever la rehausse. Le sol compacté doit dépasser du moule de 1 cm environ. Sinon, recommencer l'essai, Araser soigneusement à partir du centre ;

on veillera, au cours de l'arasement à ne pas créer de trous sur la surface arasé, Peser l'ensemble juste arasé : soit P2

III.3.7.1 Essai Proctor normal

La présente norme détermine les caractéristiques de compactage d'un sol qui sont la teneur en eau optimale (W_{opt} en %) et la masse volumique sèche maximale (ρ_d max). Le principe de l'essai Proctor normal consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter avec une dame normalisée, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe de variation de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau

Tableau 3.8 Résultats de l'essai Proctor Normal

N° de l'essai	1	2	3	4	5	6
Teneur en eau (%)	10	11	14	16	18	20
Masse du moule m(g)	1798	1798	1798	1798	1798	1798
Masse moule+sol humide (g)	3279,3	3369,3	3477,7	3542,8	3528,8	3468,8
Masse du sol humide (g)	1481,3	1571,3	1679,7	1744,8	1730,8	1670,8
Volume du moule (cm ³)	995.282	995.282	995.282	995.282	995.282	995.282
ρ_h (g/cm ³)	1,488	1,579	1,688	1,753	1,739	1,679
ρ_d (g/cm ³)	1,353	1,410	1,480	1,511	1,474	1,399

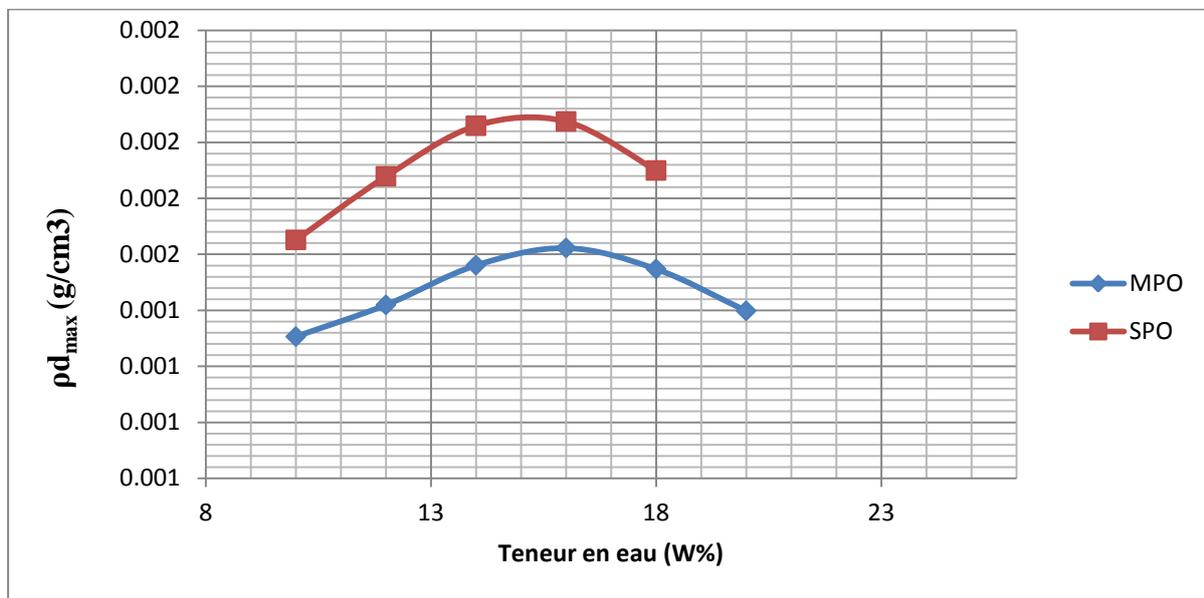
III.3.7 .2 Essai de Proctor modifié

Cet essai normalisé (NF P 94-093) permet de reproduire au laboratoire plus ou moins les conditions de compactage sur chantier. Il est effectué généralement selon deux modes de compactages d'intensités différentes : par l'essai Proctor standard (à énergie moyennement poussée) et par l'essai Proctor modifié à énergie plus intense, ce dernier a été choisi pour mener cette investigation. Si l'on fait varier la teneur en eau de l'échantillon et que l'on représente graphiquement la variation de ρ_d en fonction de w (%), on obtient une courbe en cloche qui représente un point haut qu'on l'appelle « optimum Proctor ». Les résultats de l'essai Proctor modifié sont rapportés au **tableau 3.9**.

Tableau 3.9 Résultats de l'essai Proctor modifié.

N° de l'essai	1	2	3	4	5
Teneur en eau (%)	10	12	14	16	18
Masse du moule m(g)	1798	1798	1798	1798	1798
Masse moule+sol humide (g)	3451,6	3498,6	3657,9	3794,7	3838,2
Masse du sol humide (g)	1653,6	1700,6	1859,9	1996,7	2040,2
Volume du moule (cm ³)	995,282	995,282	995,282	995,282	995,282
ρ_h (g/cm ³)	1,709	1,869	2,006	2,050	1,980
ρ_d (g/cm ³)	1,526	1,639	1,729	1,737	1,650

Les résultats sont traduits dans une courbe **fig 3.13**

**Fig 3.13** Courbes de l'essai Proctor normal et modifié

D'après la **fig 3.13**, la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale pour chaque essai sont rapportés au tableau 3.10.

Tableau 3. 10 La teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale pour chaque essai

	Proctor normal	Proctor modifié
Wopt (%)	16	15,5
ρ_d (g/cm ³)	1,51	1,73

III.4 Rang d'échantillon du sol naturel par rapport aux recommandations du BTC

III.4.1 Rang par rapport aux normes de la granulométrie

La courbe de la distribution granulométrique est présentée sur la **fig 3.14**. Sur cette figure, le fuseau déduit des normes [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], [MOPT, 1992] est représenté en pointillés. Il est à noter que la courbe granulométrique du sol naturel se positionne de manière satisfaisante (à plus de 80%) par rapport au fuseau granulométrique, Par conséquent, ce matériau peut être sélectionné en état naturel pour la confection des BTC

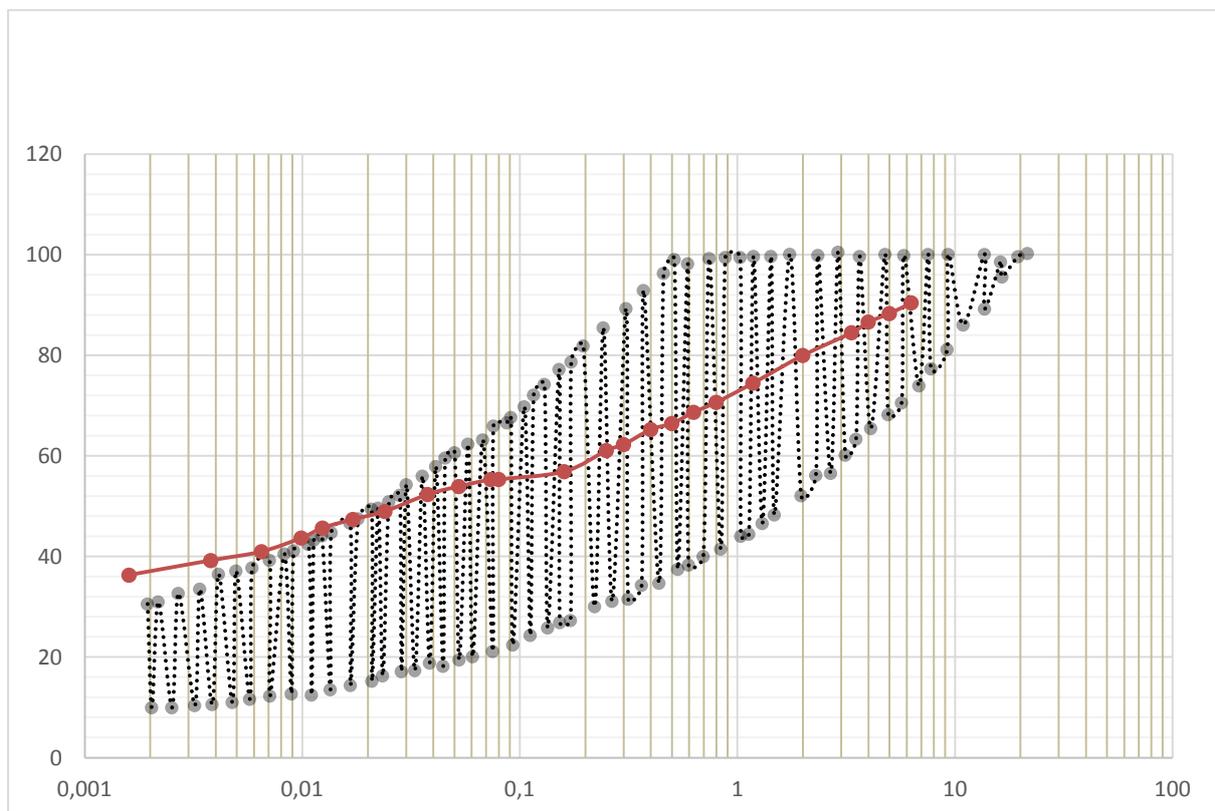


Fig 3.14 Rang de la courbe de distribution granulométrique de SN par rapport aux [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], [MOPT, 1992]

La courbe de la distribution granulométrique est présentée sur la figure **3.15** en ligne jaune sur cette figure, le fuseau déduit des défèrent normes (chaque norme motionnée est représenté)

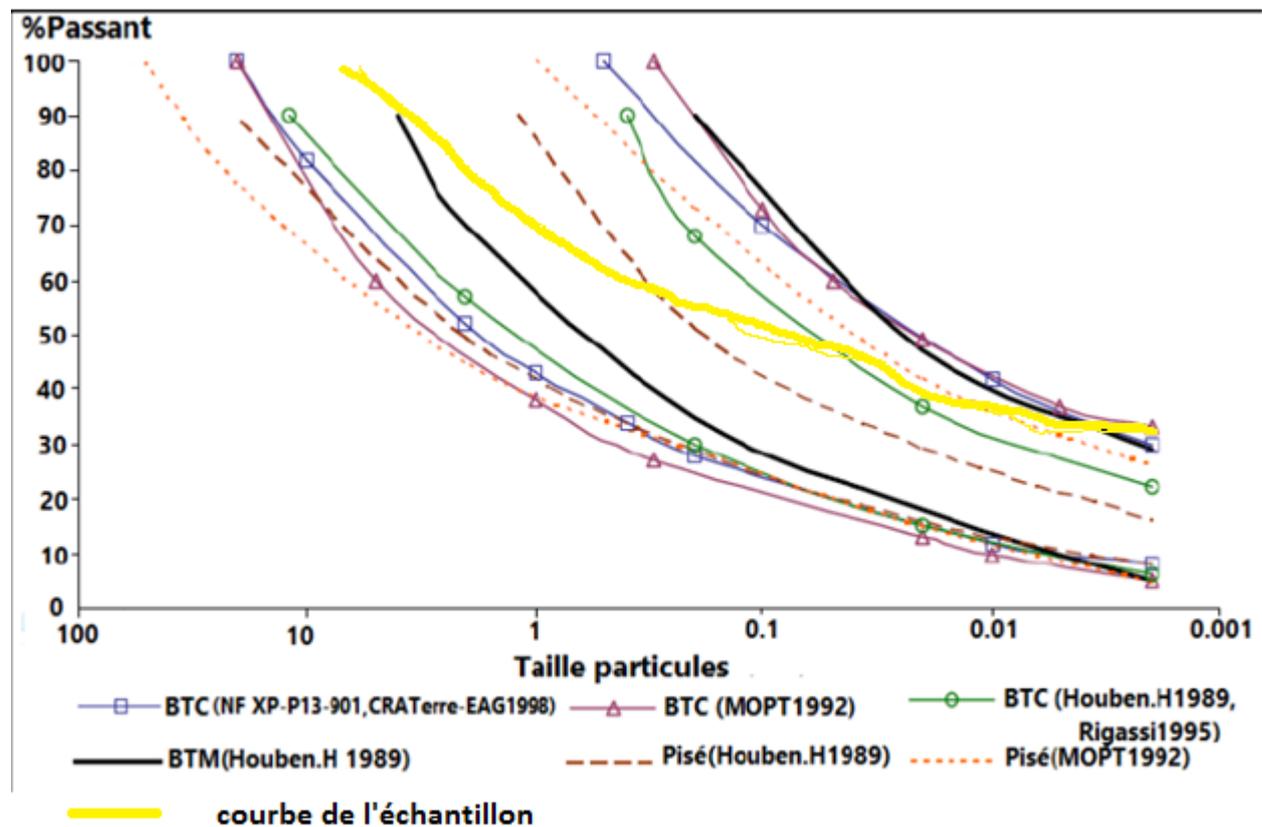


Fig 3.14 Rang de la courbe de distribution granulométrique de SN par rapport aux [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], [MOPT, 1992], [BTC (houben.H 1989, Rigassi1995)]

III.4.2 Rang par rapport aux normes des limites d'Atterberg

La limite de liquidité et l'indice de plasticité du sol naturel sont positionnés dans le diagramme de Casagrande dans le plan (LL, PI), **fig 3.16**. Sur ce même plan, nous avons rapporté les deux fuseaux recommandés par les normes [Norme-NF-XP-P13-901, 2001] et [MOPT, 1992]. On constate que le sol naturel se positionne au-dessus de la droite (A) de l'équation $IP = 0.73 (LL - 20)$. Par ailleurs, on remarque qu'il se trouve à l'intérieur des fuseaux normalisés, le rendant ainsi approprié pour être utilisé pour les BTC

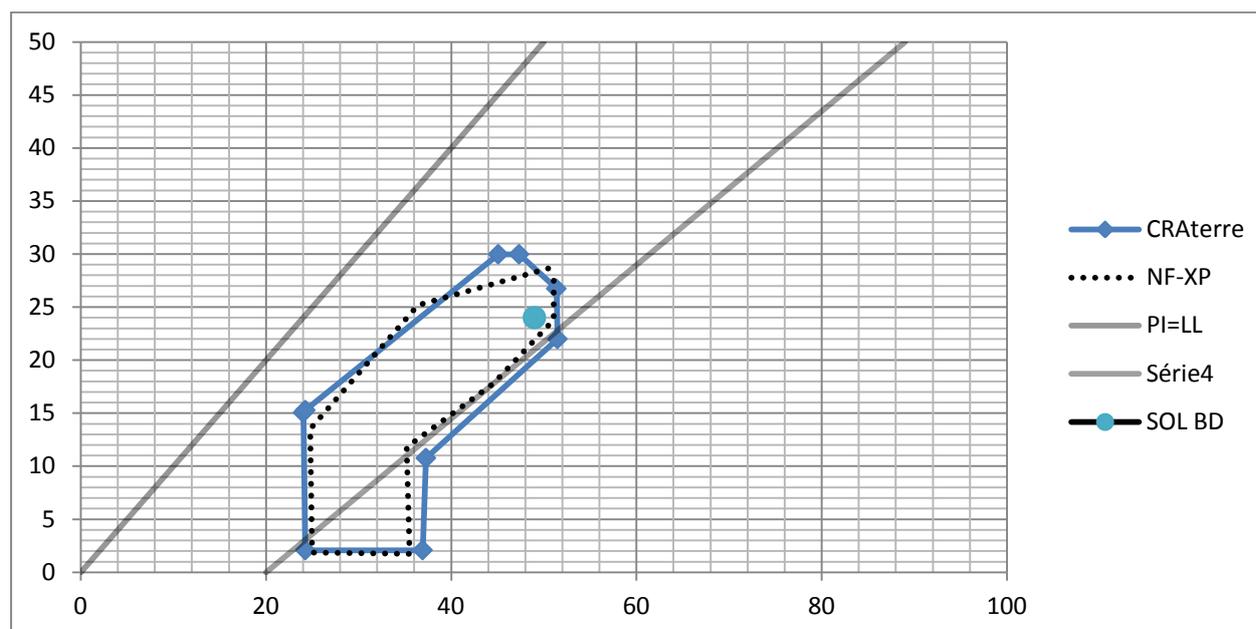


fig 3.16 Rang de plan (LL, PI) du SN par rapport aux [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], [MOPT, 1992]

III.4.3 Rang par rapport aux normes du compactage

Les courbes de compactage à l'optimum de Proctor Normal (SPO) et à l'optimum de Proctor Modifié (MPO) du matériau naturel (SN) sont représentées dans le plan. Sur ce même plan, nous avons positionné le domaine du couple recommandé par Moevus et al. [2012], Houben and Guillaud [1994] et Minke [2006]. On constate que pour l'énergie SPO, la masse volumique sèche maximale est bien au deçà du fuseau recommandé, qui borne la teneur en eau de 16 % et la masse volumique sèche maximale de 1.51 g/cm^3 fig 3.16, mais pour l'énergie MPO, le point correspondant à la masse volumique sèche maximale de 1.74 g/cm^3 et à la teneur en eau optimale de 15,5 % est bien dans le fuseau recommandé.

Le tableau 3.10 résume les différentes valeurs du poids volumique et la teneur en eau relevées dans la littérature concernant la mise en œuvre des BTC.

Tableau 3.11 Teneurs en eaux initiales et les poids volumiques secs maximales des BTC ([Craterre 2012],[Jiménez et al. 2007],[Morel 2003], [Olivier, 1994])

Référence	Technique	γ_{dmax} (kN/m^3)	Wi (%)
Craterre2012	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	/
Hakimi1996	BTC	19.2 à 19.30	9.8 à 10.8
Olivier1994	BTC	18.25à 20.13	12 à 19
Ola 1987	BTC	16 à 19	/

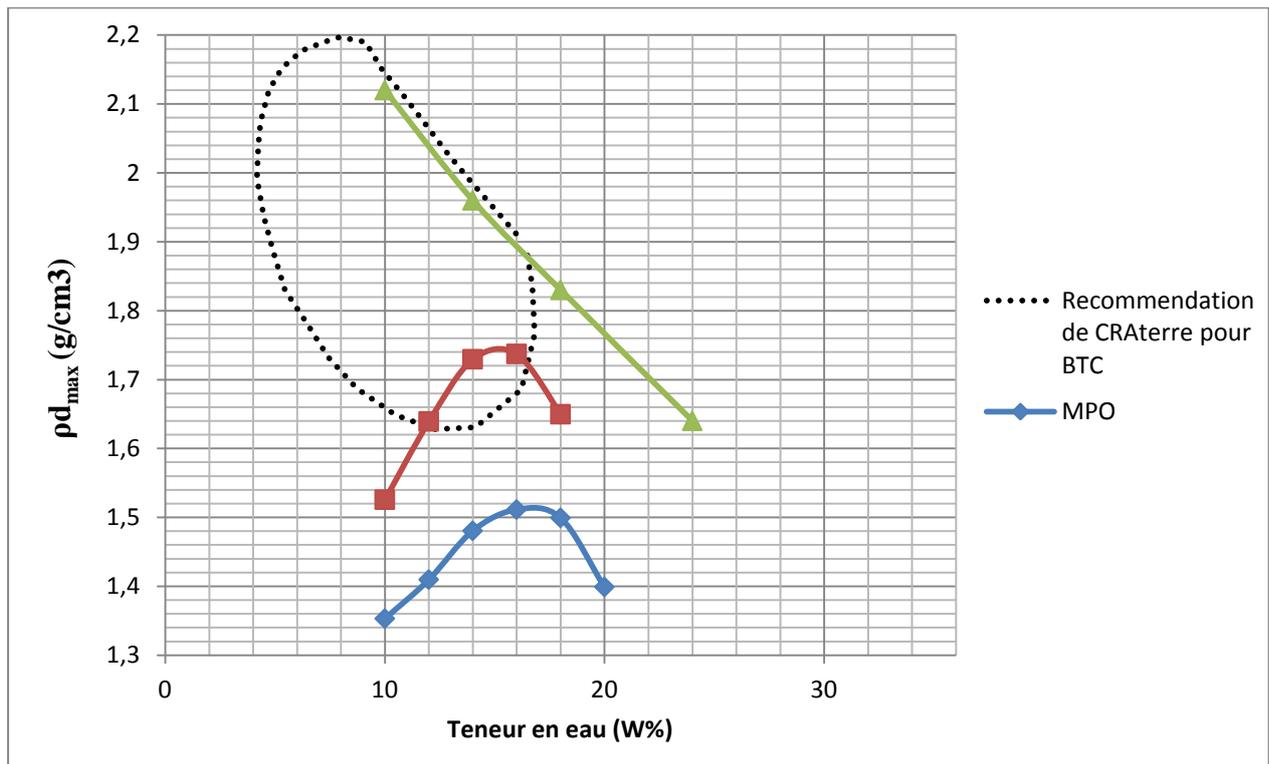


fig 3.16 Rang compactage (OPN et OPM) du sol naturel (SN) par rapport à la zone recommandée pour les BTC.

III.5 Conclusion sur l'utilisation du sol naturel (SN) dans les BTC

À partir des résultats de d'identification, ce sol a montré qu'en termes de granulométrie, et de masse volumique sèche maximale et de plasticité, il répond aux normes et recommandations concernant son aptitude à être utilisé comme matière première pour les BTC

CHAPITRE IV

COMPORTEMENT MECANIQUE ET DURABILITE DE LA B.T.C

IV Introduction

Dans ce chapitre, nous explorerons le comportement mécanique et la durabilité d'un matériau de construction ancestral, la brique en terre compressée. Le comportement mécanique de la brique en terre compressée est d'une importance primordiale pour assurer la stabilité et la sécurité des structures construites avec ce matériau. Les propriétés mécaniques clés de la brique en terre compressée sont la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la capacité de charge. Dans ce chapitre, Nous étudierons la résistance à la compression simple pour des échantillons témoin et des échantillons traités avec la caséine.

Parmi les inconvénients de la brique en terre compressé non stabilisé, la sensibilité à l'érosion d'eau, qui joue un rôle essentiel dans sa longévité et sa résistance aux éléments environnementaux qui peuvent influencer la durabilité de ce matériau, tels que l'exposition aux cycles de gel-dégel, l'humidité, la corrosion chimique et l'érosion. Nous discuterons des techniques de protection et des traitements spécifiques pour améliorer la durabilité de la brique en terre compressée.

En résumé, ce chapitre vise à fournir une analyse du comportement mécanique et de la durabilité de notre brique en terre compressée avant et après la stabilisation avec la caséine.

IV.1 Produit de traitement utilisé

Caséine Le produit de traitement utilisé est la caséine en poudre **fig 4.1**. C'est un produit fabriqué par L'unité de production de la laiterie Soummam à Bejaïa. Les caractéristiques principales ont été présentées précédemment dans le chapitre II

Des études indiquent que la caséine peut être considérée comme une alternative écologique pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols. Étant donné que les matériaux traditionnels de stabilisation des sols, en particulier le ciment, ont des effets néfastes sur l'environnement, les matériaux alternatifs tels que la caséine sont respectueux à l'environnement, renouvelables et peu coûteux.



Fig 4.1 échantillon de Caséine

IV.2 Essai de compression simple (ISO 17892-7:2017)

Mode opératoire et procédure d'essai

Les éprouvettes soumises aux essais de compression sont de forme cylindrique. Elles ont été confectionnées dans un moule en PVC **fig 4.3**, spécialement conçu pour ce type d'essais. Le moule a les dimensions suivantes: $H=15\text{cm}$ et $\varnothing=7,5\text{cm}$. Au total, 18 éprouvettes ont été confectionnées pour des différents dosages et différents temps de cure. La technique de fabrication se déroule selon les étapes suivantes :

1. En premier lieu, le sol est mis à l'étuve pour séchage pendant une période de 24 heures sous une température de 105°C ;
2. Mélanger le sol à sec avec le produit de traitement; 3. Ajouter une quantité d'eau et malaxer jusqu'à l'obtention d'un mélange parfaitement homogène et laisser le mélange dans un sac plastique fermé pendant 24 heures ;
4. Compacter le mélange selon le mode de compactage statique à l'aide de la presse UNIFRAME, **fig 4.2** ;
5. Réaliser le compactage en deux couches, la première couche $2/3$ de la masse totale (de chaque mélange), et la 2ème couche $1/3$ de la masse totale;
6. Après le démoulage, sceller les éprouvettes immédiatement à l'aide d'un papier film, **fig 4.4** afin de prévenir l'évaporation de l'eau contenu dans les mélanges;
7. À l'échéance des temps de cure (7, 14, 28 jours), réaliser les essais de compression simple selon la norme NF P94-077, **fig 4.5**;
8. Prendre les dimensions de l'échantillon à l'aide d'un pied à coulisse (la hauteur et le diamètre

sont pris quatre fois selon deux directions). Pour les calculs de la section nous utiliser les valeurs moyennes ;

9. Placer l'éprouvette du sol sur le plateau d'une presse à chargement axial. Après la mise en contact des deux plateaux de la presse avec l'éprouvette fig 4.6, le chargement axial est appliqué avec une vitesse de déplacement constante de 1,00 mm/min ;

10. À la fin de l'essai, l'échantillon est enlevé ; 11. La force maximale (F_{max}) à la rupture est affichée par la machine. La résistance à la compression simple R_c (la contrainte à la rupture résultant du rapport entre la force de OÙ : R_c (kPa): Résistance à la compression simple, F (kN): Force maximale de compression, A (m^2) : Aire de la section transversale de l'éprouvette.

Les quantités de chaque composant du mélange sont synthétisées dans le tableau Les mélanges sont : Sol naturel ; Mélange 1: sol + 1% caséine ;Mélange 2: sol + 2% caséine

Les masses sont présentées dans le **tableau 4.1**.

Tableau 4.1 Masse de chaque composant des mélanges sol - liant

Dosage (%)	w %	ρ_d (kg/m ³)	Masse du sol (g)	Masse de la caséine (g)	Masse de l'eau (g)
0	15.5	1774	1127	0	169
1	15.5	1774	1116	11	169
2	15.5	1774	1105	22	169

Une fois les mélanges préparés, les éprouvettes sont compactés selon le mode de compactage statique à l'aide de la presse UNIFRAME **fig 4.2**.



Fig 4.2 la presse UNIFRAME



Fig 3.3 moule en PVC pour confection d'éprouvette



Fig 3.4 les éprouvettes compactée et sceller dans papier film

La résistance à la compression simple R_c (la contrainte à la rupture résultant du rapport entre la force de rupture F_{max} et la section transversale de l'éprouvette (A)) s'écrit :

$$R_c = \frac{F_{max}}{A}$$

Où :

R_c (kPa): Résistance à la compression simple,

F (kN): Force maximale de compression,

A (m^2) : Aire de la section transversale de l'éprouvette



Fig 4.5 Les éprouvettes obtenues



Fig 4.6 chargement de force pour l'essai de compression simple

Le **tableau 4.2** et la **fig 4.7** synthétisent les résultats des essais de compression simple du sol naturel et de sol traité avec 1 % ; 2% ; respectivement de Caséine, après 0 ; 7 ; 14 ; 28 jours.

Notons bien que nous avons pris la moyenne de trois résistances de compression pour chaque dosage.

tableau 4.2 Résultats des essais de compression

Temps de cure (jour)	7J	14 J	28 J
Rc(1% bio)(Mpa)	1,3	1,5	1,5
Rc(2% bio)(Mpa)	1,6	1,8	1,8
Rc(SN)(Mpa)	0,9	1,0	0,9

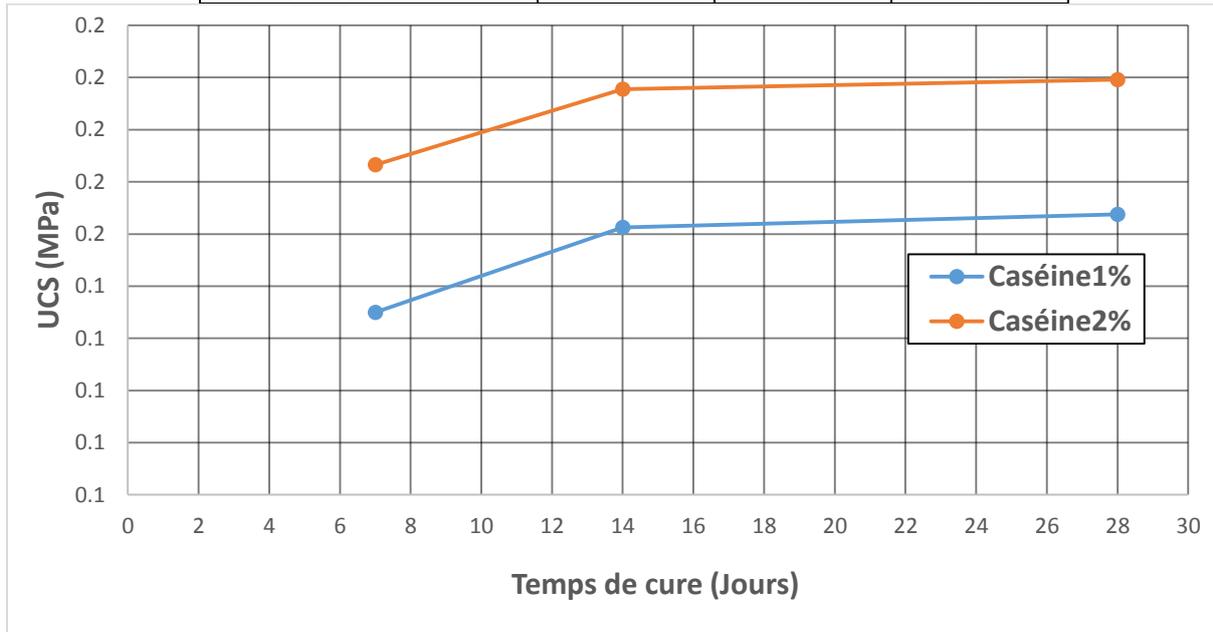


Fig 4.7 Courbes des essais de compression

fig 4.7 montre les facteurs principaux qui influent sur la résistance à la compression simple moyenne; à savoir le temps et le dosage du liant; il est à noter que pour le facteur temps, la résistance moyenne augmente en fonction du temps pour les jours de 7 à 14; après le 14ème jour, l'influence du temps de cure diminue. Quant à l'influence du dosage du liant, la résistance à la compression moyenne augmente avec l'augmentation du dosage.

IV.3 Durabilité et érosion de surface

La Majorité des constructions en terre qui ont vécu longue temps, sont principalement localisées dans des zones de faible précipitation annuelle (zones arides), qui sont protégées par un large avant toit, ou par couvert de revêtement protecteurs. La résistance à la pénétration de l'eau est un critère important pour les constructions à base de terre crue. [Heathcote, 2002] a défini, la durabilité de matériaux de construction comme la résistance à l'érosion au cours du temps. La durabilité des constructions en terre dépend non seulement de ses propriétés

intrinsèques (composition minéralogiques des sols, pourcentage d'argile, densité sèche, teneur en eau, teneur en liants etc.), mais aussi sur les conditions climatiques (pluie, vent, neige et température), [Ghomari, 1989]. Les érosions les plus importantes sont dues aux phénomènes météorologiques. Dans notre cas, des essais d'érosion de surface ont été réalisés sur le matériau à base de terre crue, afin de vérifier la durabilité des constructions en terre dans les zones de fortes précipitations.

IV.3.1 Érosion de surface

Pour étudier l'érosion de surface, nous avons retenu la méthode « Essai Drip Test » Le choix de ces dispositifs expérimentaux nécessite la connaissance de la pluviométrie de la région étudiée, et qui peut être très irrégulière et inégalement répartie dans l'espace.

IV.3.2 Drip Test (Essai de goutte à goutte selon La norme NZS 4298)

D'après les normes [Norme-NZS-4298, 1998], [Norme-SAZS-724, 2012], une mèche textile de 16 mm de largeur est utilisée pour créer des gouttes d'eau, le diamètre de la goutte d'eau est d'environ 6mm avec le nombre de gouttes est d'environ 14 gouttes/min. En fonction du type de mèche utilisée, la quantité d'eau totale écoulée (volume) est de 100 ml, correspondant à un temps variant de 20 à 60 min. La hauteur de chute de 400 mm par rapport à la surface inclinée (27°) de l'échantillon, **Fig 4.8**, néanmoins, les caractéristiques de ces gouttes (fréquence et diamètre) sont impossibles à maîtriser car elles dépendent du type de mèche utilisée. Au lieu d'utiliser une mèche, nous avons utilisé la méthode proposée par ([Weisz et al.,1995], [Heathcote, 2002], [Nguyen, 2014], [Nguyen, 2015]). Un réservoir composé d'une bonbonne inversée et équipée d'un robinet de précision. Ce robinet fixé sur le bouchon fermé de la bonbonne permet de contrôler bien la fréquence et le diamètre des gouttes d'eau. Le diamètre des gouttes est contrôlé en jouant sur le diamètre de la tubulure connectée à ce robinet. Le réservoir est fixé sur un portique au-dessus de l'échantillon à tester. La charge hydraulique est constante et imposée par le réservoir. Pour contrôler le diamètre des gouttes d'eau désirée, nous avons utilisé un tube plastique souple de 4 à 5 cm de longueur avec différents diamètres. L'échantillon est placé sur un support à inclinaison réglable posé dans un bac en plastique à l'aval. Lors de l'essai, la profondeur d'érosion provoquée par l'impact des gouttes sur la surface de l'échantillon est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse. Le schéma simplifié est présenté dans les, **fig 4.9, fig 4.10, fig 4.11** Pour valider ce dispositif d'essai, nous

avons ajusté la fréquence des gouttes à 15 gouttes/min (en moyenne), afin de faire écouler 100 ml d'eau entre 20 à 60 min environ.



Fig 4.8 dispositif de goutte à goutte

IV.3.2.1 Mesure de la profondeur d'érosion des gouttes

Au cours de l'essai, le goutte à goutte sur la surface de l'échantillon se traduit par le creusement d'une cavité. Le pied à coulisse électronique permet de mesurer l'évolution de sa profondeur chaque 15 min, et ce avec une précision de l'ordre de 0.01 millimètre.

Résultats

tableau 4.3 Résultats d'essais goutte à goutte

Temps (min)	Érosion Sol naturel (mm)	Érosion Sol + 1% de Caséine (mm)		Érosion Sol + 2% de Caséine (mm)	
		0 jours	7 jours	28 jours	7 jours
15	1.98	1.45	0.52	1.06	0.44
30	4.01	2.46	1.51	2.12	0.96
45	6.88	3.83	2.78	3.24	2.29
60	8.93	5.53	4.49	4.87	3.54

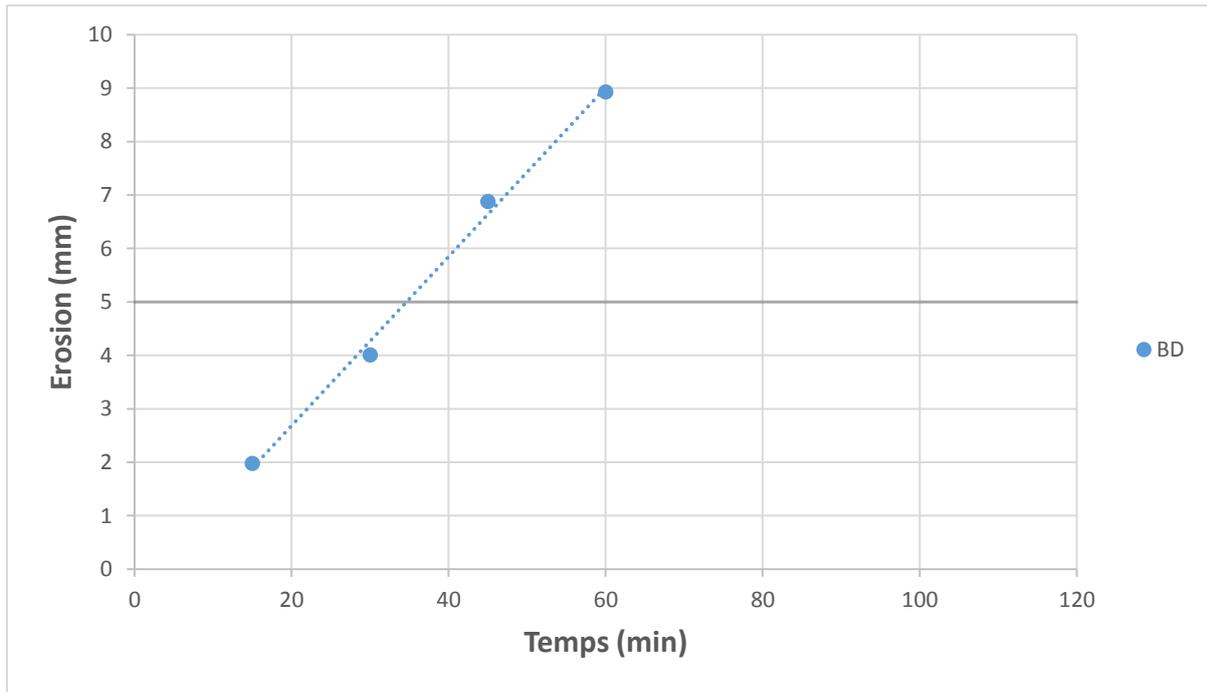


Fig 4.9 Courbe Érosion Sol naturel

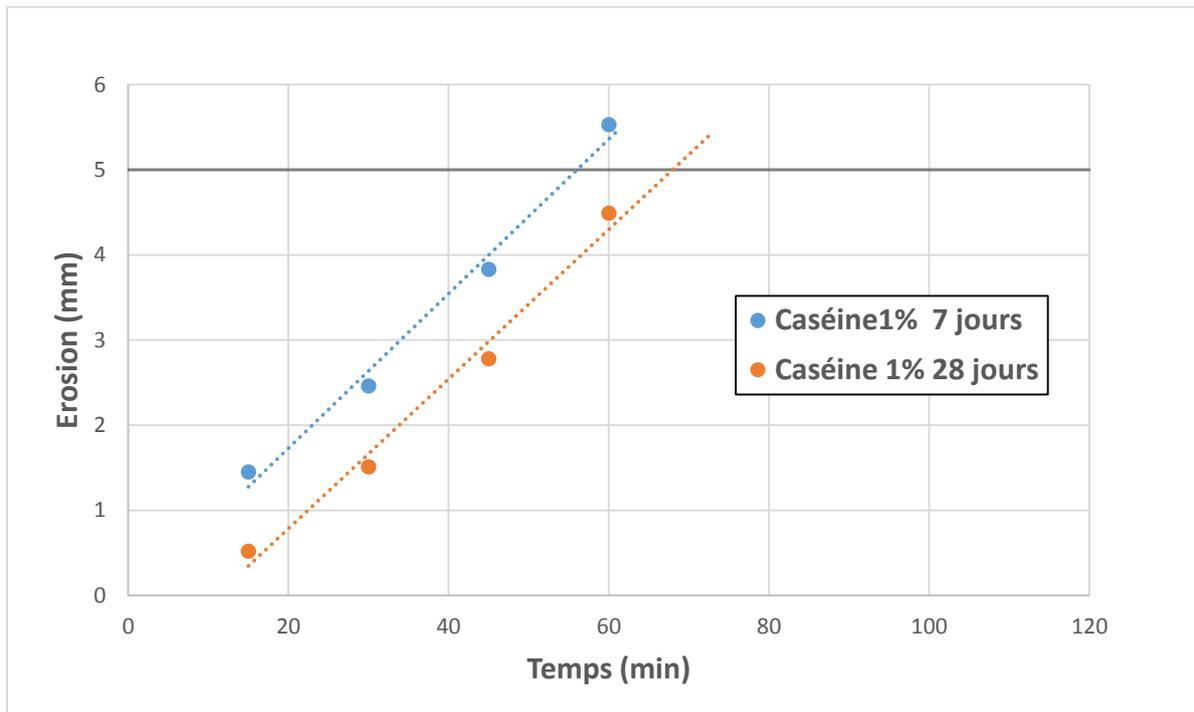


Fig 4.10 Courbe érosion Sol + 1 % de Caséine

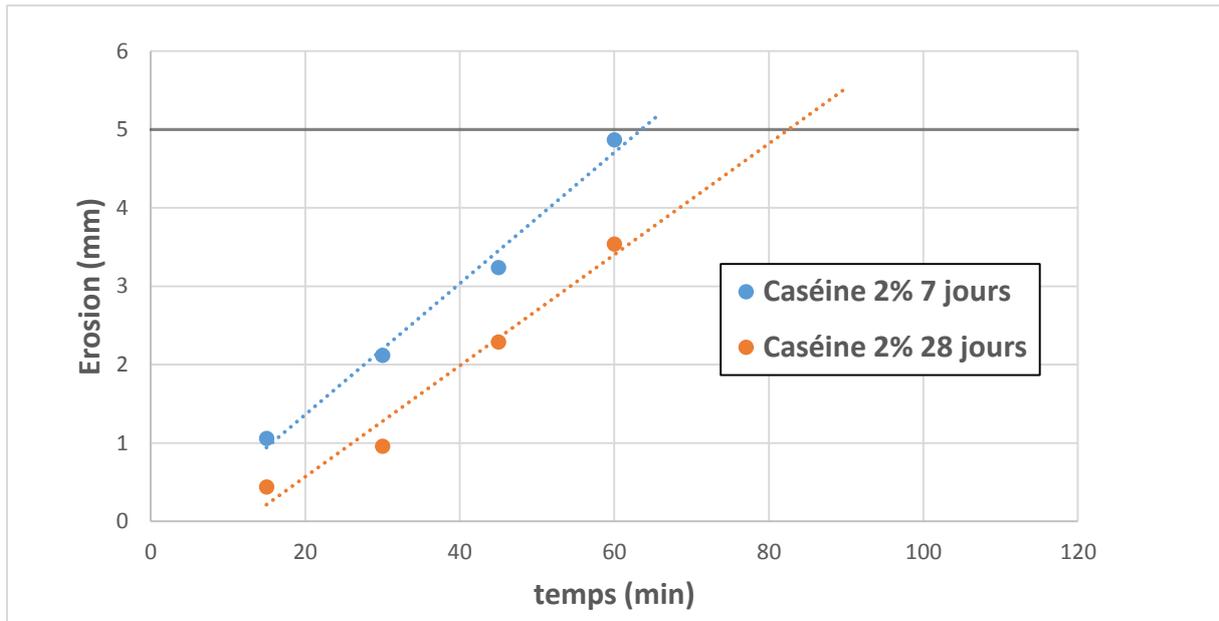


Fig 4.11 Courbe érosion Sol + 2 % de Caséine

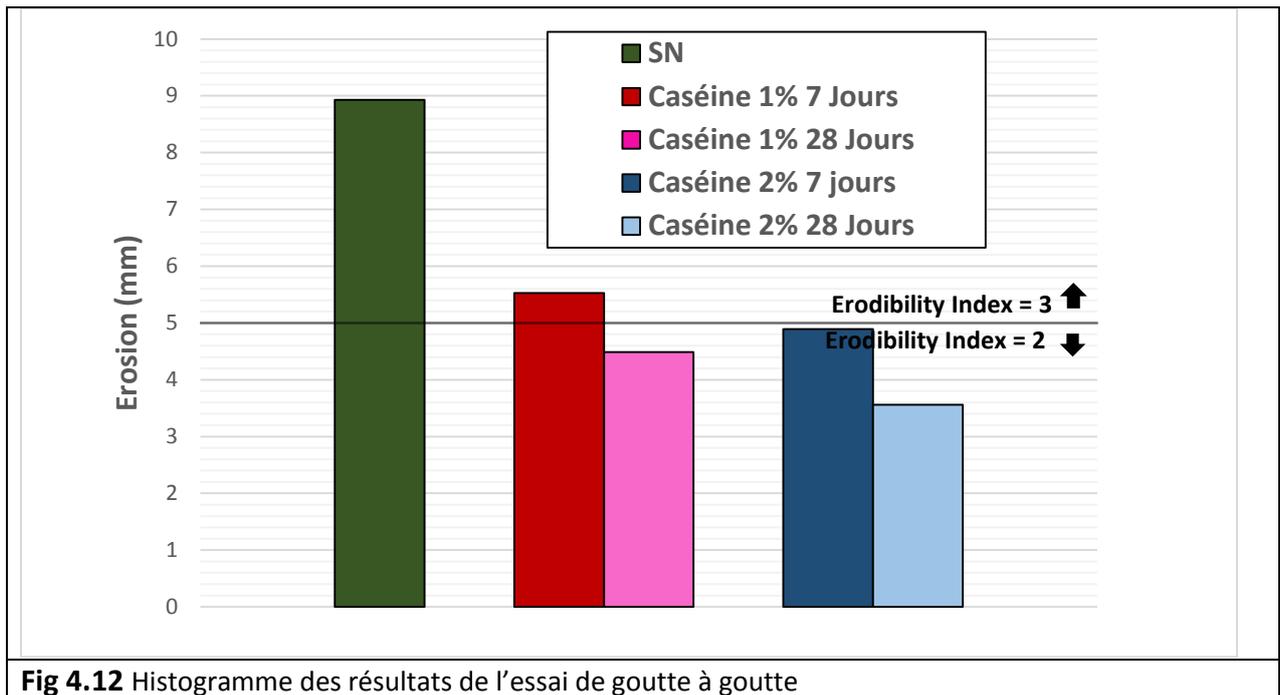


Fig 4.12 Histogramme des résultats de l'essai de goutte à goutte

La figures présente les profondeurs érodées finales à la fin de l'essai pour les échantillons cylindriques pour toutes les combinaisons considérées.

L'essai pour les échantillons cylindriques pour toutes les combinaisons considérées. Dans chaque graphique, pour chaque combinaison, les profondeurs d'érosion mesurées à 7 et 28 jours sont tracées l'une à côté de l'autre. Les résultats montrent que les échantillons non

amendés présentent des profondeurs d'érosion plus élevées. Sur la base des recommandations de la norme, l'indice d'érodabilité pour les échantillons non amendés et les échantillons traité avec 1% de caséine pour 7 jours de temps de cure est de 3, ce qui indique que les échantillons non amendés sont sujets à une plus grande érosion. Pour les autres échantillons stabilisés aux bio polymère, les profondeurs d'érosion finales sont bien inférieures à 5 mm, ce qui indique que l'indice d'érodabilité pour ces échantillons est de 2. Ils ont montré une résistance à l'érosion acceptable.

IV.3.3 Essai dip test (immersion selon La norme DIN 18945)

Le test d'immersion décrit dans la norme DIN 18945, évalue la résistance des matériaux en terre à la détérioration lorsqu'ils sont suspendus dans l'eau plutôt que l'absorption de l'environnement immédiat.

Résistance des matériaux en terre à la détérioration lorsqu'ils sont en suspension dans l'eau plutôt qu'à l'absorption à partir de l'environnement immédiat. Cet essai simule l'inondation ou l'immersion soudaine d'un matériau en terre dans l'eau et constitue manifestement un essai très rigoureux pour un matériau non stabilisé. Comme pour les autres tests, les tests d'immersion ont été réalisés sur des briques non amendées, stabilisées à la caséine, **fig 4.13** montre le dispositif d'essai pour ces tests. Avant le début de l'essai, la masse des briques testées a été enregistrée. La brique a été montée dans une pince et abaissée de 10 cm dans l'eau pendant 10 minutes. Après ce laps de temps, la brique a été retirée du bain d'eau et laissée à sécher à 40 °C pendant 24 heures. Elle a ensuite été placée dans des conditions atmosphériques (50 ± 5 % d'humidité relative et 23 ± 2 °C) pour refroidir et égaliser les conditions avant que sa masse finale ne soit mesurée. La perte de masse a ensuite été calculée par les différences entre les masses initiales et finales mesurées par une balance de laboratoire. Les résultats présentés ici sont les valeurs moyennes de trois échantillons répétés.



Fig 4.13 dispositif d'essai d'immersion

IV.3.3.1 Résultats

tableau 4.4 Résultats d'essais immersion

	Sol naturel	Caséine 1%	Caséine 2%
Masse Avant (g)	1324,68	1330,35	1321,5
Masse Après (g)	1156,2	1262,5	1287,1
Masse perdu (g)	168,48	67,85	34,4
Masse perdu %	12,7	5,1	2,6

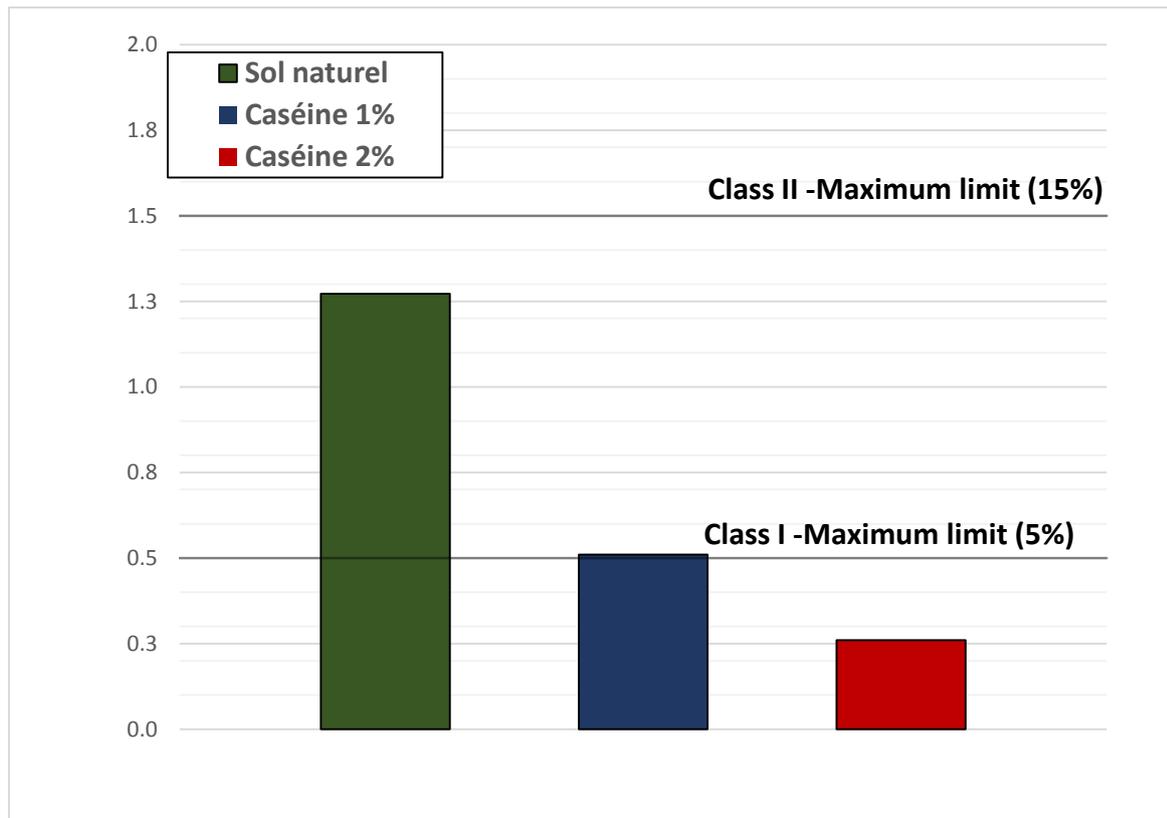


Fig 4.14 Histogramme des résultats de l'essai d'immersion

La **figure 4.14** montre la perte de masse pour toutes les briques testées. On peut observer que, comme on pouvait s'y attendre, la perte de masse des briques non modifiées est significativement plus élevée (plus de 10 % dans certains cas) que celle des briques stabilisées. Cependant, dans le cas des briques stabilisées avec la caséine, la perte de masse observée était inférieure à 5 % et, avec ces faibles pertes de masse, les briques stabilisées aux bio-polymère peuvent être considérées comme adaptées à une utilisation dans les murs extérieurs conformément à la norme DIN 18945.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des essais réalisés au laboratoire sur le sol de gisement de Kaolin de Djebel Debagh afin d'évaluer l'efficacité de l'ajout du produit de traitement (la caséine) sur la résistance à la compression simple et la durabilité du sol traité. Les résultats ont clairement montré que l'ajout de produits de traitement au sol a amélioré la durabilité du sol à l'érosion d'eau et augmentant la résistance à la compression simple.

CONCLUSION GENERAL

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est de caractériser un sol à base de kaolin local à savoir kaolin de Djebel Debagh afin d'élaborer une brique en terre crue (BTC).

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire décrivent l'ensemble des processus qui interviennent dans la préparation et la fabrication de la BTC à partir du kaolin.

Suit à ce travail, nous pourrions conclure que :

- ❖ Le kaolin choisi est convenable à la confection des briques en terre crue.
- ❖ L'utilisation d'un bio-liant (caséine) a nettement amélioré la résistance à la compression et la durabilité des échantillons de terre crue.
- ❖ Pour la continuité de ce sujet il serait recommandé de mener une future recherche sur le mortier de terre crue comme alternative au mortier de béton

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] (Paulus J, 2015). Construction en terre crue: dispositions qualitatives, constructives et architecturales – Application à un cas pratique : Ouagadougou. Mémoire de Master. Université de Liège. 2015.
- [2] (C. Delbecq 2011).
- [3] Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment, 2000 [3]
- [4], Traité de construction en terre. Éditions Parenthèses H. Guillaud et H. Houben (1995)
- [5]. L'amélioration du confort thermique de l'habitat traditionnel par l'adaptation d'un matériau de haute performance et le traitement de l'espace patio. Cas d'étude secteur sauvegardé de la ville de Laghouat (Taleb Boulerbah, 2019)[5].
- [6] Les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé, BTC) (Hakkoum Soumia, 2015)
- [7] Jiménez Delgado et al., The selection of soils for unstabilised earth building
- [8] Grim, 1968. Caillère et al, 1982. Le Sol: Constitution, structure. Phénomènes aux interfaces
- [9] [Van-Damme et Houben, 2017].
- [10] Ilhan Chang, Jooyoung Im, Moon-Kyung Chung c, Gye-Chun Cho. Bovine casein as a new soil strengthening binder from dairy wastes. Article. Construction and Building Materials. 2018
- [11] Aurélie Vissac, Ann Bourgès, David Gandreau, Romain Anger, Laetitia Fontaine. Argiles & Bio polymères - Les Stabilisants Naturels Pour La Construction En Terre. CRA terre éditions. 2018
- [14] (Doat et al., 1979 : p. 178)

Netographie

- [12] <https://tpe-colles.jimdofree.com/la-fabrication-d-une-colle/>
- [13] <https://www.hl-process.com/fr/caseines-et-caseinates/>

Normes

- [AFNOR 1993] AFNOR. NF P 94-051; Sols: reconnaissance et essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau. AFNOR, 1993
- [AFNOR 1995] AFNOR. XP P 94-041. Sols: reconnaissance et essais – Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide. AFNOR, 1995.
- [AFNOR 1992] AFNOR. NF P 94-057. Sols: reconnaissance et essais – Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation. AFNOR, 1992.
- [AFNOR 1999] AFNOR. NF P 94-093. Sols: reconnaissance et essais – Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié. AFNOR, 1999.
- [ASTM D-423] American Society for Testing and Materials, ASTM. Standard Specification for Mortar for Unit Masonry.
- [Norme-NZS-4298, 1998] Drip Test
- [norme DIN 18945] dip test