

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة سعيدة - د. مولاي الطاهر
Université desaïda - dr moulay tahar
Faculté de Technologie



Département de Génie civil et hydraulique

PROJET DE FIN DE CYCLE

Présenté pour l'obtention du diplôme de master en génie civil

Spécialité : Géotechnique

Thème:

Étude des propriétés mécaniques et hydriques d'une brique de terre comprimée à base de matériaux locaux

Présenté par :

M. Nehal Laredj.

Mlle : Amer Nacera

Soutenu le 26/06/ 2024, devant le jury composé de :

M BELOUADI. Larbi

Maitre de conférences « A »

Président

M .SEKKEL. Abelkrim

Maitre de conférences « A »

Examineur

M. DERFOUF FethAllah Mounir

Maitre de conférences « A »

Encadrant

Année universitaire : 2023 / 2024

REMERCIEMENT

بسم الله الرحمن الرحيم والصلاة على النبي الكريم سيدي وحيبي وقرّة عيني محمد صلى الله عليه وسلم وقل ربي زدني علما يا من
بفضله وقدرته وعونه وتوفيقه استطعنا تحرير هذه المذكرة فلك الحمد و لك الشكر.

Convaincus de l'importance de reconnaître et de remercier ceux qui nous ont rendu service, nous adressons nos sincères remerciements, notre appréciation et notre gratitude à notre professeur, enseignant et superviseur, Monsieur DERFOUF Feth-Ellah Mounir, qui nous a apporté une mine de connaissances et de savoirs et nous a soutenus par ses orientations et ses conseils, et nous avons eu l'honneur de superviser ce travail. Il était l'incarnation de l'humilité scientifique et ses empreintes sont clairement visibles dans ce travail. En fait, notre professeur, les mots ne peuvent pas vous rendre justice, et nous ne pouvons que prier Allah de vous garder en bonne santé pour que vous restiez un phare pour les étudiants.

Nous tenons également à remercier les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions de discussion, M. Sekkal Abdelkrim et M. Belouadi Larbi.

Nous tenons également à remercier tous les éminents professeurs qui nous ont enseigné tout au long de notre parcours universitaire.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements et notre gratitude à tous ceux qui nous ont fourni l'atmosphère appropriée pour mener à bien ce travail, en particulier le professeur de mathématiques, Mme Ghalem, et l'ingénieur de laboratoire, M. Bakrou Zaggai, qui nous ont fourni le temps et l'atmosphère nécessaires pour mener à bien les différentes expériences.

Un grand merci pour le gérant d la société BMSD (briqueterie de Ben Adouane) M. Arbaoui et tous le staff technique pour leur pour leur précieuse contribution à la fourniture des matériaux nécessaires à ce projet, ainsi que pour leur accueil chaleureux lors de nos visites

A tout le personnel du Laboratoire des Travaux Publics et à l'ingénieur de laboratoire de la société National Abrasives, M. Allam. Mohamed.

Table des matières

REMERCIEMENTS	i
TABLE DES MATIERES	ii
LISTE DES FIGURES	iv
LISTE DES TABLEAUX	vi
ملخص	vii
RESUME	vii
ABSTRACT	vii
Notations	viii
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I. GENERALITES SUR LA CONSTRUCTION EN TERRE.	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Le matériau terre	3
I.3 Construction en terre	3
I.3.1 La construction enterrée dans le monde	3
I.3.2 Construction en terre dans l'Algérie	4
I.4 Normes et recommandations liées à la construction en terre	6
I.5 Les différentes techniques de construction en terre.....	7
I.5.1 Terre excavée.....	8
I.5.2 Mottes de terre	9
I.5.3 Blocs découpés	10
I.5.4 Terre façonnée	10
I.5.5 Terre coulée	11
I.5.6 Terre comprimée (pisé)	12
I.5.7 Terre empilée.....	13
I.5.8 Adobes	14
I.5.9 Terre de garnissage ou torchis	15
I.5.10 Briques de terre comprimée	16
I.6 Fuseau granulométrique et de plasticité.....	18
I.7 La stabilisation de la terre	20
I.7.1 Densification par compression	21
I.7.2 Stabilisation à la chaux	21
I.7.3 Stabilisation au ciment	22
I.7.4 Ajout de fibres	23

I.7.5	Stabilisation au bitume	24
I.8	Les avantages de la terre crue	25
I.8.1	Avantages écologiques.....	25
I.8.2	Avantages économiques.....	25
I.8.3	Avantages thermiques	27
I.9	Les inconvénients de la terre crue (non stabilisée).....	27
I.10	Conclusion	29
Chapitre II. MATERIAUX ET METHODES.....		Error! Bookmark not defined.
II.1	Introduction.....	30
II.2	Matériaux étudiés	30
II.3	Identification des matériaux et mélanges étudié	33
II.3.1	Identification de l'argile et du mélange argile-brique.....	33
II.3.2	Identification de la chaux	41
II.4	Fabrication et mise en œuvre des éprouvettes.....	43
II.4.1	Matériel spécifique	43
II.4.2	Principe de confection des éprouvettes.....	43
II.5	Programme expérimental et essais réalisés	46
II.5.1	Essai d'absorption d'eau	46
II.5.2	Essai d'immersion	47
II.5.3	Mesure du module de Young dynamique	47
II.5.4	Essai d'écrasement.....	49
II.6	Conclusion	50
Chapitre III. ETUDE EXPERIMENTALE ET RESULTATS		56
III.1	Introduction.....	51
III.2	Influence des ajouts sur les paramètres physiques des mélanges	51
III.2.1	Pourcentage minimale de chaux	51
III.2.2	Effet sur les limites d'Atterberg	52
III.2.3	Effet des ajouts sur les paramètres de compactage.....	55
III.3	Comportement hydrique	58
III.3.1	Variations volumiques:	58
III.3.2	Essai d'absorption d'eau :	61
III.3.3	Essai d'immersion	64
III.4	Comportement mécanique	64
III.4.1	Résistance à la compression sèche :	64
III.4.2	Résistance à la compression humide :	67
III.4.3	Comparaison entre la résistance à la compression sèche et humide.....	70
III.4.4	Module de Young dynamique (Ed) :	71
III.5	Interprétation de l'effet de la brique concassée.....	75

III.6 Conclusion	75
CONCLUSION GENERALE	86
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	89

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : GENERALITE SUR LA CONSTRUCTION EN TERRE.

Figure I.1: (a)Arche de Ctésiphon ; (b) Pyramide d'El-Lahoun ; (c) Ziggourat d'Etemenanki; (d) Cité Chan-Chan. (Source : http://www.antikforever.com).	3
Figure I.2: Architecture de terre dans le monde (Source : http://craterre.org/)	4
Figure I.3: Le muret de Mansourah à Tlemcen(http://dta-tlemcen.dz).....	6
Figure I.4: Logements collectifs R+1 à Sidi Bel Abbès, (Guettala ,2003).	6
Figure I.5: Roue des différentes techniques de construction en terre (Houben et Guillaud, 1989).	8
Figure I.6: Habitat troglodytique : (a) habitations en poche, Chine, (b) habitation de Matmata, Tunisie (c) maison à Guadix, Andalousie. (Sources : Loubes, 1989 ; https://www.pinterest.com ; www.gite01.fr).....	9
Figure I.7: Maisons en mottes de terre (Paulus, 2015; http://commons.wikimedia.org).	9
Figure I.8: Blocs de terre et construction en Bloc de terre en Burkina Faso (Paulus, 2015)	10
Figure I.9: Terre façonnée (Sources : https://autrecarnetdejimidi.wordpress.com ; http://learning-from-vernacular.epfl.ch ; http://fr.slideshare.net).....	11
Figure I.10: La terre coulée, un béton de terre (Sources : Horsch & De Paoli, 2014 ; http://www.construction21.org/)	11
Figure I.11: Technique de Pisé: (a)coffrage et compactage du mur en pisé ; (b) Mur en pisé de Mansourah (Tlemcen) ; (c) Nk'Mip DesertInterpretive Centre, Canada (Source : /www.futura-sciences.com ; http://www.tlemcen-dz.com ; http://www.archdaily.com).....	13
Figure I.12: Construction en terre empilée : (a):Maison à Sa'dah, (b):Yémen ; (c): Bourrine de Vendée ; Mosquée de Bobo Dioulasso (Sources : fr.db-city.com ; www.saint-jean-de-monts.com ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Mosquée_de_Dioulasso-bâ).....	14
Figure I.13: Constructions en adobe : (a): Shibam, Yémen ; (b): Ghadamès, Libye ;(c): Lima, Pérou (Sources : socks-studio.com ; WHEAP, 2012).....	15
Figure I.14: Constructions en torchis :(a) Safranbolu, Turquie ; (b): Diamantina, Brésil ; (c): Strasbourg, France (Sources : WHEAP, 2012 : pp. 150 & 164 ; adispne.fr).....	16
Figure I.15: Constructions en BTC à Mayotte : Préfecture ; Logements sociaux, Ecole (Source : craterre.org)	17
Figure I.16: Exemple de presse de confection des briques de terre. (www.block-machine.net).....	18
Figure I.17: Fuseau granulométrique. (XP P13-901)	19
Figure I.18: Fuseau de plasticité. (XP P13-901)	19
Figure I.19: Mécanismes de stabilisation (Guillaud & Houben, 1995)	21
Figure I.20: Types de fibres (www.iso.org).....	24
Figure I.21: Cycle de vie du matériau terre. (https://www.cycle-terre.eu/)	25
Figure I.22: La consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment en Algérie. (APRUE, 2017).	26
Figure I.23: Conductivité thermique de divers matériaux de construction. (Moevus et al, 2016)	27
Figure I.24: Un exemple de Ksar dans le Sahara algérien (Timimoune) (Zerariet al, 2019).....	28
Figure I.25: Brique après le test d'absorption d'eau par capillarité. (a) : Echantillon en contact avec l'eau ; (b) Un délitement de l'échantillon (Filament, 2017)	28

Chapitre II: MATERIAUX ET METHODES

Figure II.1: matériaux étudiés. -a : matériau crue. -b : brique rouge concassée. -c : la chaux hydratée.	31
Figure II.2: Broyeur à machoires.	31
Figure II.3: Localisation de la briqueterie BMSD (Google Earth 2024).	33
Figure II.4: Courbes granulométriques des mélanges étudiés.	34
Figure II.5: Essai de limite de liquidité.	35
Figure II.6: Plasticité des mélanges étudiés.	36
Figure II.7: Essai de bleu méthylène.	38
Figure II.8: Schéma d'un Calcimètre de DIETRICH-FRÜHLING (NF P 94-048).	39
Figure II.9: PH mètre de mesure.	40
Figure II.10: Courbes de compactage de Proctor modifié des mélanges étudiés.	41
Figure II.11: Moule de confection des éprouvettes.	43
Figure II.12: compactage statique des éprouvettes et Presse hydraulique.	44

Figure II.13: Etapes de confection des éprouvettes et du programme expérimental.....	45
Figure II.14: l'essai d'absorption d'eau par capillarité.....	46
Figure II.15: Essai d'immersion.....	47
Figure II.16: Appareil GrindoSonic MK7 et schéma du principe des mesures	48
Figure II.17: Principe de la méthode d'excitation par impulsion.....	49
Figure II.18: Banc d'écrasement des éprouvettes.	50

Chapitre III: ETUDE EXPERIMENTALE ET RESULTATS

Figure III. 1: variation du PH du mélange de l'argile de Ben Adouane et la chaux (Ar + Ch (%))......	52
Figure III. 2: variation de la limite d'Atterberg du l'argile de Ben Adouane et la chaux (Ar + Ch (%))......	53
Figure III. 3: variation de la limite d'Atterberg du l'argile avec 10% de la brique rouge concassée et la chaux (Ar +Br (10%) + Ch (%))	53
Figure III. 4: variation de la limite d'Atterberg du l'argile avec 20% de la brique rouge concassée et la chaux (Ar +Br (20%) + Ch (%))	54
Figure III. 5: Modification des limites d'Atterberg d'un sol après traitement à la chaux (Fediex 2009)......	55
Figure III. 6: courbes de compactage de l'argile de Ben Adouane et la chaux (Ar +Ch(%))......	56
Figure III. 7: courbes de compactage du l'argile avec 10% de la brique rouge concassée et la chaux (Ar +Br (10%) + Ch (%))......	57
Figure III. 8: courbes de compactage du l'argile avec 20% de la brique rouge concassée et la chaux (Ar +Br (20%) + Ch (%))......	57
Figure III. 9: variation du volume de la brique confectionnée avec le mélange argile et la chaux (Ar+Ch(%))......	59
Figure III. 10: variation du volume de la brique confectionnée avec le mélange argileavec 10% de la brique rouge concassée et la chaux (Ar + Br (10%) +Ch(%)).	59
Figure III. 11: variation du volume de la brique confectionnée avec le mélange argile avec 20% de la brique rouge concassée et la chaux (Ar + Br (20%) +Ch(%)).	60
Figure III. 12: variation du coefficient Cb des éprouvettes après confection (immédiate).	61
Figure III. 13: variation du coefficient Cb des éprouvettes à l'âge de 3 jours de cure.	61
Figure III. 14: variation du coefficient Cb des éprouvettes des à l'âge de 7 jours de cure.....	62
Figure III. 15: variation du coefficient Cb des éprouvettes à l'âge de 14 jours de cure.	62
Figure III. 16: variation du coefficient Cb des éprouvettes à l'âge de 28 jours de cure.	62
Figure III. 17: essai d'immersion : a) mélanges avec la chaux b) argile crue.	64
Figure III. 18: variation de Rc sèche des éprouvettes après confection (immédiate)......	65
Figure III. 19: variation de Rc sèche des éprouvettes à l'âge de 3 jours de cure.	65
Figure III. 20: variation de Rc sèche des éprouvettes à l'âge de 7 jours de cure.	65
Figure III. 21: variation de Rc sèche des éprouvettes à l'âge de 14jours de cure.	66
Figure III. 22: variation de RC sèche des éprouvettes à l'âge de 28 jours de cure.	66
Figure III. 23: variation de la Rc humide des éprouvettes après confection (immédiate).	68
Figure III. 24: variation de la Rc humide des éprouvettes à l'âge de 3 jours de cure.	68
Figure III. 25: variation de la Rc humide des éprouvettes à l'âge de 7jours de cure.	68
Figure III. 26: variation de la Rc humide des éprouvettes à l'âge de 14 jours de cure.	69
Figure III. 27: variation de la Rc humide des éprouvettes à l'âge de 28 jours de cure	69
Figure III. 28: variation de Ed des éprouvettes après confection (immédiate).	71
Figure III. 29: variation de Ed des éprouvettes à l'âge de 3 jours de cure.	71
Figure III. 30: variation de Ed des éprouvettes à l'âge de 7 jours de cure.	72
Figure III. 31: variation de Ed des éprouvettes à l'âge de 14 jours de cure.....	72
Figure III. 32: variation de Ed des éprouvettes à l'âge de 28 jours de cure.....	72

LISTE DES TABLAUX

Chapitre I : GENERALITE SUR LA CONSTRUCTION EN TERRE.

Tableau I.1: Construction en terre dans l'Algérie : (CRENIB, 1992).....	5
Tableau I.2: Normes et recommandations destinées la fabrication de BTC (Delgado, 2007).....	7
Tableau I.3: Pourcentage du tamisât de chaque classe du sol selon fuseau granulométrique de la norme (XP P13-901).....	18
Tableau I.4: Quantité d'énergie nécessaire à la production d'un mètre cube de certains matériaux. (Revue « maison écologique », N° 11 : octobre - novembre 2002, Cité par Hacène, 2012).....	26

Chapitre II: MATERIAUX ET METHODES

Tableau II.1: les mélanges étudiés et leur codage.....	32
Tableau II.2: Les résultats de l'analyse granulométrique.....	34
Tableau II.3: Les résultats de l'essai des limites d'Atterberg.	36
Tableau II.4: Activité des mélanges étudiés.	37
Tableau II.5: les résultats de l'essai Proctor modifié des mélanges étudiés.	41
Tableau II.6: Caractéristiques chimiques (www.bmsdcompanies.com).	42
Tableau II.7: Caractéristiques physiques(www.bmsdcompanies.com).....	42

الملخص

نظرًا لتوافر المواد المحلية في منطقتنا، وبهدف تقليل تكاليف البناء مع تحسين الجودة في الوقت نفسه، قمنا بدراسة الخواص الميكانيكية والمائية لهذه المواد لإنتاج لبنات ترابية مضغوطة. تم إجراء العديد من التجارب لإنشاء خلطات من الطين والطوب الأحمر المسحوق (10% و20%) والجير المائي بنسب متفاوتة (0%، 4%، 6%، 8%، 10%). قمنا بتقييم قوة الانضغاط الجافة والرطبة، ومعامل يونغ الديناميكي، وتغيرات الحجم ومعامل امتصاص الماء للخلطات. أظهرت النتائج أن إضافة الجير يحسن بشكل كبير من قوة وثبات الكتل، في حين أن إضافة الطوب المسحوق، على الرغم من أنه يقلل قليلاً من القوة الأولية، إلا أنه يحسن قليلاً من ليونة الكتل واستجابتها المائية.

الكلمات المفتاحية: المواد المحلية- الطين - الطوب الأحمر المسحوق، الجير المائي، لبنات التراب المضغوط- الخواص الميكانيكية - الخواص المائية

Résumé

En raison de la disponibilité de matériaux locaux dans notre région et dans le but de réduire les coûts de construction tout en améliorant la qualité, nous avons étudié les propriétés mécaniques et hydriques de ces matériaux pour la réalisation de blocs de terre comprimée. Diverses expériences ont été menées pour créer des mélanges d'argile, de brique rouge concassée (10% et 20%) et de chaux hydratée à des proportions variables (0%, 4%, 6%, 8%, 10%). Nous avons évalué la résistance à la compression sèche et humide, le module de Young dynamique, ainsi que les variations volumiques et le coefficient d'absorption d'eau des mélanges. Les résultats montrent que l'ajout de chaux améliore significativement la résistance et la stabilité des blocs, tandis que l'ajout de brique concassée, bien que réduisant légèrement la résistance initiale, elle améliore légèrement la ductilité et la réponse hydrique des blocs.

Mots clés : matériaux locaux - argile – brique rouge concassée, chaux hydraulique, blocs de terre comprimée - propriétés mécaniques - propriétés hydriques.

Abstract

Due to the availability of local materials in our region and with the aim of reducing construction costs while improving quality, we studied the mechanical and hydric properties of these materials for the production of compressed earth blocks. Various experiments were conducted to create mixtures of clay, crushed red brick (10% and 20%), and hydrated lime in variable proportions (0%, 4%, 6%, 8%, 10%). We evaluated the dry and wet compressive strength, dynamic Young's modulus, volumetric changes, and water absorption coefficient of the mixtures. The results show that the addition of lime significantly improves the strength and stability of the blocks, while the addition of crushed brick, although slightly reducing the initial strength, enhances the ductility and hydric response of the blocks.

Keywords: local materials - clay - crushed red brick - hydrated lime - compressed earth blocks - mechanical properties – hydric properties.

Notations

CRATerre	:	Centre international de la construction en terre
AFNOR	:	Association Française de Normalisation
BTC	:	Brique de terre comprimée
BTS	:	Brique de terre stabilisée
UNESCO	:	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture
D_{50}	:	Diamètre des grains correspondant à 50% de passant
D_{60}	:	Diamètre des grains correspondant à 60% de passant
W_L	:	Limite de liquidité
W_P	:	Limite de plasticité
I_P	:	Indice de plasticité
A_C	:	Activité du sol
V.B.S	:	Valeur de bleu de méthylène
S_r	:	Degré de saturation
ρ_d	:	Masse volumique du sol sec
W	:	Teneur en eau
W_{OPM}	:	Teneur en eau optimale
OPM	:	Optimum Proctor modifié
R_c	:	Résistance à la compression
E	:	Module d'élasticité

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie cimentière, responsable de 5% des émissions mondiales de CO₂, voit ce chiffre grimper jusqu'à 10% d'ici 2050. Ces émissions proviennent principalement des pays émergents, avec le continent asiatique en tête. Malgré les nombreux efforts déployés depuis 1990 pour réduire ces émissions, une réforme technologique est jugée inévitable pour atteindre des objectifs satisfaisants. Dans ce contexte, revaloriser des matériaux de construction traditionnels comme la terre pourrait être une voie prometteuse pour répondre aux défis actuels. Moderniser, voire industrialiser la production de ce matériau, offre une solution intéressante pour conjuguer développement durable et efficacité économique.

En Algérie, les argiles constituent des gisements énormes répartis sur une grande partie du territoire national. En revanche, les ressources en granulats sont rares dans la majorité des régions, ce qui nous pousse à rechercher des solutions permettant de valoriser ces matériaux et de les utiliser dans divers domaines de construction, notamment pour la fabrication de briques de terre. Notre étude propose une conception de briques de terre basée sur les matériaux locaux de la région de Saida, en particulier l'argile de Ben-Adouane..

La méthode expérimentale de formulation de ces briques repose sur l'optimisation des proportions des composants du matériau pour obtenir des briques aux caractéristiques convenables en termes de formulation de durabilité et de résistance mécanique. L'ajout de brique rouge concassée, issue des déchets de construction, permet non seulement de valoriser ces déchets mais aussi de contribuer à une économie circulaire. La chaux, choisie pour ses effets bénéfiques supérieurs à ceux du ciment(quant aux mélanges avec l'argile), stabilise efficacement les mélanges et améliore leurs propriétés mécaniques et hydriques. L'utilisation de matériaux locaux comme la terre permettrait de réduire l'impact environnemental tout en répondant aux besoins de construction.

Outre cette introduction générale, ce mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique, offrant un aperçu général des différentes techniques de construction en terre.

Le deuxième chapitre est dédié à la définition des matériaux utilisés pour la fabrication des briques, notamment l'argile, la chaux hydratée et la brique rouge concassée. Il comprend également les essais d'identification de ces matériaux, abordant leurs caractéristiques

physiques et décrivant les différentes techniques expérimentales utilisés dans la caractérisation physiques, hydriques et mécaniques des mélanges,

Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux des essais physiques, hydriques et mécaniques réalisés sur les différents mélanges étudiés, tels que l'argile avec différents pourcentages de chaux (Ar + Ch (%)), l'argile avec 10% de brique rouge concassée et chaux (Ar + Br (10%) + Ch (%)), et l'argile avec 20% de brique rouge concassée et chaux (Ar + Br (20%) + Ch (%)).

-Enfin ce mémoire se clôture par une conclusion générale synthétisant l'essentiel des résultats obtenus et proposant des perspectives pour l'avenir de la recherche sur la valorisation des matériaux locaux dans la construction.

**GENERALITES SUR LA CONSTRUCTION
EN TERRE.**

I.1 Introduction

La terre est le matériau de construction le plus ancien de l'histoire de l'être humain. Elle est connue depuis 9000 ans (Minke, 2006). Elle a été utilisée durant toutes les civilisations anciennes : Perses, Assyriennes, Égyptiennes, Babyloniennes (Doat et al, 1979).

L'idée de comprimer la terre en blocs pour construire est récente. Elle représente une évolution du bloc de terre moulé. D'ailleurs, les premières machines à comprimer la terre auraient été imaginées au XVIII^e siècle (Rigas si, 1995).

L'utilisation des sols situés sa proximité des sites de réalisation pour des projets de construction est une alternative permettant à la fois de diminuer les coûts de transport de ces projets set d'économiser les ressources naturelles.

Lematériauterreà l'avantagedepouvoirêtrerecycléouentoutesécuritélibéréedansl'environnement encasdedémolitiondesconstructionsce qui diminue les déchets solides qui constituent la plus grande problématique des sites d'enfouissement.

I.2 Le matériau terre

La terre, utilisée depuis plus de onze millénaires, est sans aucun doute 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 (**Figure I.1(a)**), certaines pyramides en Égypte (pyramide d'El-Lahoun (**Figure I.1(b)**) par exemple), la ziggourat d'Etemenanki à Babylone (**Figure I.1(c)**), la cité précolombienne de Chanchan au Pérou (**Figure I.1(d)**) et encore bien d'autres, Doat et al, 1979).



Figure I.1: (a)Arche de Ctésiphon ; (b) Pyramide d'El-Lahoun ; (c) Ziggourat d'Etemenanki; (d) CitéChan-Chan. (Source : <http://www.antikforever.com>).

I.3 Construction en terre

I.3.1 La construction enterre dans le monde

Les constructions en terre crue sont majoritairement présentes dans presque toute l'Afrique, le Moyen-Orient et l'Amérique latine (**Figure I.2**). On les retrouve également en Chine et en

Chapitre I : Généralités sur la construction en terre.

Inde dans les habitats vernaculaires. En Europe par contre, cette façon de construire a pratiquement disparu, mais les bâtiments en terre crue restent tout de même présents dans le paysage, comme un témoignage du passé. On les retrouve au Danemark, en Suède, en Allemagne, dans les Pays de l'Est, mais également en Espagne, en France, en Grande-Bretagne et en Belgique (Doat et al, 1979). L'Europe compte tout de même plusieurs millions de constructions en terre, mais il s'agit surtout de bâtiments anciens. Ceux-ci sont toujours habités mais nécessitent un entretien annuel relativement cher (Anger, 2011). Les sites archéologiques en terre crue 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 » (Anger & Fontaine, 2009).



Figure I.2: Architecture de terre dans le monde (Source : <http://craterre.org/>)

I.3.2 Construction en terre dans l'Algérie

Parmi les monuments historiques existant en Algérie on trouve ceux de Timgad. Existant depuis l'époque romaine datant de 100 apr. J.-C., il est situé dans la wilaya de Batna en Algérie. Ce monument est construit en pierre et en mortier de terre. Des fouilles dans la maison de la Tigresse à Lambèse ont révélé l'utilisation de techniques constructives basées principalement sur la terre crue. La mosquée de Mansourah à Tlemcen (**Figure I.3**), est aussi l'un des monuments historiques les plus célèbres en Afrique du Nord. Il a été édifié en 1303 avec la technique du pisé « Est une technique de construction qui consiste à battre couche par couche la terre contenue entre des planches ou des plaques qui forment le mur qu'on veut édifier », à l'exception du minaret. On trouve aussi le site de Honaïne qui représente également des monuments en pisé, bien qu'ils soient désormais en ruine.

Chapitre I : Généralités sur la construction en terre.

Dans le sud de l'Algérie, la ville ksour de Timimoune représente un patrimoine architectural et archéologique bâti en terre crue (thob), symbolisant la civilisation algérienne des époques passées. Malheureusement, ce patrimoine a souffert de dégradations dues aux pluies battantes et aux variations de température. Par la suite, la construction en terre s'est répandue dans le sud de l'Algérie avec le lancement de la production de briques silice-calcaires (composées de sable et de calcaire).

Après l'indépendance, plusieurs programmes de construction en terre ont été initiés (**Tableau I.1**). En 1973, 30 maisons en briques de terre stabilisée «(BTS) :» ont été construites dans le village de Sidi Brahim à Sidi Bel Abbès. En 1981, 100 logements ont été édifiés dans le village de Felliache à Biskra et 40 logements à Chéraga, près d'Alger, en blocs de terre comprimée (Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment, CNERIB, 1992). Dans les années 1990, le groupe d'entreprise "Hasnaoui" a construit d'autres logements en BTS à Sidi Bel Abbès(**Figure I.4**). Ces projets, initiés par le gouvernement algérien pour réduire l'exode rural, ont été considérablement freinés par un manque de connaissances spécifiques et l'absence de normes pour ce type de construction.

Tableau I.1: Construction en terre dans l'Algérie : (CNERIB, 1992).

1969	Réalisation de 136 logements en pisé au village agricole de Bouhlilet à Batna
1971	Une équipe franco-belge réalise à Zéralda un groupe expérimental d'habitations rurales.
1973	30 des 300 logements du village Ben Brahim à Sidi-Bel-Abbès sont réalisés en pisé.
1976	100 logements du village agricole Felliache de Biskra sont réalisés en thob.
1980	120 logements du village agricole de Madher à Boussaâda sont réalisés en BTS.
1981	40 logements sont réalisés à Chéraga près d'Alger en blocs de terre comprimée.
1984	Un prototype bioclimatique fut réalisé à Tamanrasset et un prototype fut réalisé au CNERIB en blocs de terre comprimée.
1986	10 logements sont réalisés à Adrar et 10 autres logements à Reggan en blocs de terre comprimée
1994	44 logements sont réalisés par l'ETR de Tamanrasset en B.T.C.
1998	Un prototype en pisé fut réalisé au CNERIB.
2006	Un projet intitulé « réalisation d'un logement rurale avec efficacité énergétique » est lancée au CNERIB et financé par l'union européenne.



Figure I.3:Le muret de Mansourah à Tlemcen(<http://dta-tlemcen.dz>)



Figure I.4:Logements collectifs R+1 à Sidi Bel Abbès, (Guettala ,2003).

I.4 Normes et recommandations liées à la construction en terre

Étant donnée la disponibilité et la diversité mondiale de la terre crue, choisir ce matériau représente un défi majeur. Plusieurs recommandations et normes ont été émises pour aborder divers aspects de la sélection de la terre comme matériau de construction, ainsi que ses propriétés hydromécaniques et hygrothermiques. Le **Tableau I.2** offre des exemples de telles normes et recommandations.

Tableau I.2: Normes et recommandations destinées la fabrication de BTC (Delgado, 2007)

Normes et recommandations	Références
XP P 13-901 (2001)	AFNOR. XP P13-901, Compressed earth blocks for walls and partitions: definitions – Spécifications – Test methods – Delivery acceptance conditions. Saint-Denis La Plaine Cedex : AFNOR, 2001
MOPT (1992)	MOPT. Bases Para el Diseno y Construccion con. Madrid, Spain : Centro de Publicaciones, Secretaria General Te'cnica, Ministerio de ObrasPublicas y Transportes, 1992.
NZS 4297 (1998)	SNZ. New Zealand Standard 4297:1998. Engineering design of earth buildings. Wellington: Standards New Zealand, 1998.
Houben et Guillaud	Houben H, Guillaud H. Earth construction: a comprehensive Guide. London: Intermediate Technology Publications; 1994.
Lehmbau-Regeln (1999)	LehmbauRegeln.Begriffe;Baustoffe;Bauteile.Braunschweig/Wiesbaden, Germany: Friedr. Vieweg&SohnVerlagsgesellscahaftmbH, 1999.
Smith and Austin (1996)	Smith EW, Austin GS. Adobe, pressed-earth and rammed earth industries in New Mexico, Bulletin 159. Socorro, NM: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources; 1996.
OIA (1970)	Office of Internatinal Affairs (Wolfskill LS, Dunlop WA, Callaway BM) Handbook for building homes of earth. Department of housing and urban development, Office of International Affairs (OIA), Washington, DC 20410, 1970.
CRA terre-Rigassi, 1995	Essential granularity, plasticity and compactibility. Field and laboratory identification soil tests are explained

I.5 Les différentes techniques de construction en terre

A travers le patrimoine mondial des traditions de la construction en terre crue, on dénombre de très nombreuses techniques de construction avec une infinité de variantes adaptées à la qualité de la terre et au degré d'élaboration du savoir-faire. Il existe douze techniques d'utilisation de terre pour la construction présentée sur le diagramme établi par Houben et Guillaud, 1989 (**Figure I.5**),

Chapitre I : Généralités sur la construction en terre.

une grande citerne est généralement construite sous l'habitation, servant de réserve d'eau durant la saison sèche (Doucet, 2005).

Parmi les exemples on trouve ceux du bassin moyen du Huanghe en Chine (**Figure I.6a**), la ville de Matmata en Tunisie (**Figure I.6b**), en Espagne et plus précisément en Andalousie (**Figure I.6c**), etc.



Figure I.6: Habitat troglodytique : (a) habitations en poche, Chine, (b) habitation de Matmata, Tunisie (c) maison à Guadix, Andalousie. (Sources : Loubes, 1989 ; <https://www.pinterest.com>; www.gite01.fr)

I.5.2 Mottes de terre

Elle est également appelée technique du « sod » aux États-Unis, du « terronne » en Amérique Latine ou encore du « turf » en Irlande (Paulus, 2015). Il s'agit de construire avec la terre de surface des sols, c'est-à-dire avec des mottes de gazon (**Figure I.7**).



Figure I.7: Maisons en mottes de terre (Paulus, 2015; <http://commons.wikimedia.org>).

La terre contient donc de nombreuses racines et plantes herbacées. Les racines lui confèrent une résistance due à leur entrelacement. Les avantages de cette technique sont la mise en œuvre rapide et plutôt simple (pas de mélange ni de compactage ni de mortier), le peu d'outils nécessaires (simple bêche ou pioche) (Abessolo et al, 2021). L'inconvénient est qu'il faut ériger des murs de grosse épaisseur si on veut qu'ils soient porteurs (plus de 50cm) mais en même temps, cette épaisseur confère une bonne inertie thermique au bâtiment. Un autre problème est le tassement important des murs au fil du temps. Mais les bâtisseurs se sont vite

Chapitre I : Généralités sur la construction en terre.

adaptés à ce désagrément en construisant les murs légèrement plus grands que la taille espérée au final. Cette technique fut largement utilisée au 19^e siècle par les colons lors de la conquête de l'Amérique du Nord car, faute de pierre ou de bois à disposition pour construire, ils se sont adaptés aux techniques locales des constructions (Paulus, 2015).

I.5.3 Blocs découpés

Cette méthode consiste à découper des blocs de terre (**Figure I.8**), une pratique similaire à l'extraction de la pierre traditionnelle, utilisant des outils tels que des pioches, des burins, des coins et des scies. Les carrières fournissent une terre suffisamment compacte et dure pour être directement taillée en blocs utilisables pour la construction. Ces blocs découpés sont ensuite mis en œuvre comme des blocs conventionnels. Cette technique est connue sous différents noms selon les régions : « tepate » au Mexique, « caliche » aux États-Unis, « mergel » en Hollande, « marl » en Angleterre et « tuf » dans les pays méditerranéens. Aujourd'hui, ces blocs connaissent un regain d'intérêt en raison de leur solidité, de leur dureté, de leur facilité d'extraction et de mise en œuvre, ainsi que de leur durabilité. Par exemple, le programme Conescal au Mexique a permis la construction de nombreuses écoles en utilisant des blocs découpés (Paulus, 2015).



Figure I.8: Blocs de terre et construction en Bloc de terre en Burkina Faso (Paulus, 2015)

I.5.4 Terre façonnée

La technique de la terre façonnée offre une liberté créative en utilisant de la terre malléable sans recours à des moules. Bien que permettant une variété architecturale vaste et économique, son contrôle de séchage et de résistance mécanique est complexe. Les méthodes principales incluent le colombin (**Figure I.9(a)**), les boules façonnées (**Figure I.9(b)**) et les tresses façonnées (**Figure I.9(c)**).

Chapitre I : Généralités sur la construction en terre.

La première technique implique le façonnage direct à la main de boudins de terre, parfois mélangée à des déchets organiques, disposés en oblique et lissés pour former des murs fins (5 à 7 cm d'épaisseur) légèrement plus épais à la base.

La méthode des boules façonnées consiste à empiler des boules de terre de gros diamètre, nécessitant un temps de séchage entre chaque couche. Les murs ainsi créés, avec des couches qui se chevauchent, sont peu porteurs.

La technique des tresses façonnées offre une grande variété dans la préparation de la terre. En mélangeant la terre à des produits organiques et en la laissant "pourrir" pour former des gels, on améliore la cohésion des argiles. Des fibres végétales torsadées sont ajoutées pour renforcer la résistance en traction, permettant de créer des parois fines (environ 5 cm d'épaisseur) et pouvant atteindre jusqu'à 6 mètres de hauteur (Guillaud & Houben, 1995).



Figure I.9: Terre façonnée (Sources : <https://autrecarnetdejimidi.wordpress.com> ; <http://learning-from-vernacular.epfl.ch> ; <http://fr.slideshare.net>)

I.5.5 Terre coulée

La technique de la terre coulée (**Figure I.10**), comparable à celle du béton maigre, utilise de la terre sous forme de boue liquide, de préférence sableuse ou graveleuse.



Figure I.10: La terre coulée, un béton de terre (Sources : Horsch & De Paoli, 2014 ; <http://www.construction21.org/>)

Ses nombreux avantages comprennent une préparation facile du matériau, une mise en œuvre simple et une polyvalence d'applications, mais elle présente un retrait significatif lors du séchage. Des solutions telles que la compartimentation des constructions pour réduire le retrait ou le rebouchage des fissures après le séchage, lorsque celles-ci ne compromettent pas la structure, peuvent être envisagées.

I.5.6 Terre comprimée (pisé)

La technique de la terre comprimée, communément appelée technique du pisé, est également connue sous les termes de « béton d'argile » ou « béton de terre ». Elle a vu le jour à Carthage, en Tunisie, se répandant ensuite dans le bassin méditerranéen et au Maghreb avant d'atteindre l'Europe au VII^e siècle. Cette méthode implique la construction de murs massifs en compactant de la terre humide et pulvérulente dans des coffrages à l'aide d'un PISOIR (**Figure I.11(a)**). Cet instrument équipé d'un manche solide et d'une grosse masse en bois ou en métal. Aujourd'hui, des fouloirs pneumatiques permettent d'atteindre jusqu'à 700 impacts par minute (Anger & Fontaine, 2009).

Cependant, les angles droits représentent les points faibles de la technique du pisé : s'ils ne sont pas correctement comprimés, ils peuvent s'effriter en gros morceaux une fois le coffrage retiré. Pour remédier à ce problème, il est courant de placer des cales dans les coins du coffrage afin d'obtenir des angles à 45°, qui sont beaucoup plus résistants. Le patrimoine mondial de l'UNESCO compte de nombreuses constructions en pisé, parmi lesquelles certaines parties de la grande muraille de Chine, l'Alhambra de Grenade, Mansourah de Tlemcen (**Figure I.11(b)**) etc.

Avec l'évolution de l'industrie du béton, les techniques du pisé ont subi des modifications significatives (**Figure I.11(c)**). L'intégration du fouloir pneumatique, hérité de l'industrie de la fonderie, a permis d'augmenter le rendement de production et la résistance des murs. Les clés en bois ont été remplacées par des tiges filetées ou des fers à béton, réduisant considérablement la taille des trous dans le pisé. Les systèmes de coffrage ont également évolué avec l'introduction des « coffrages coulissants », permettant une construction plus rapide, ainsi que des coffrages courbes offrant une plus grande diversité dans les formes des bâtiments. Toutes ces modernisations ont permis d'obtenir des murs plus réguliers et plus stables en moins de temps.

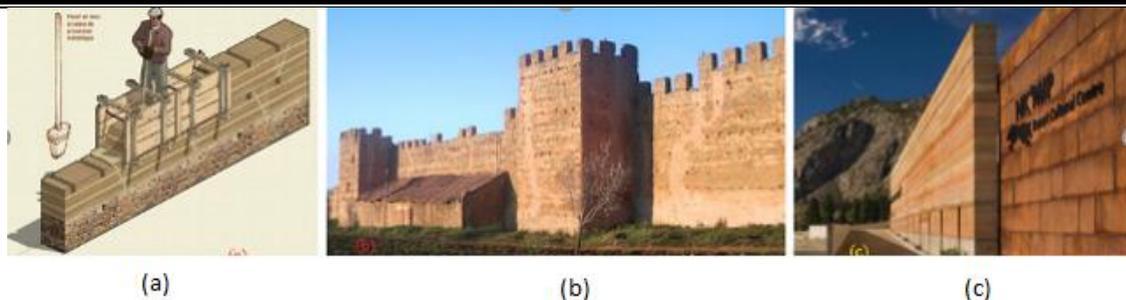


Figure I.11: Technique de Pisé: (a) coffrage et compactage du mur en pisé ; (b) Mur en pisé de Mansourah (Tlemcen) ; (c) Nk'Mip Desert Interpretive Centre, Canada (Source : www.futura-sciences.com ; <http://www.tlemcen-dz.com>; <http://www.archdaily.com>)

I.5.7 Terre empilée

La technique de la terre empilée, également connue sous les noms de bauge ou cob, est une méthode de construction ancienne remontant à plusieurs millénaires avant J.-C. Elle implique l'empilement de paquets de terre plastique pour former des murs monolithiques épais, ressemblant aux murs en pisé. La qualité de la terre utilisée est essentielle, avec une préférence pour une texture sableuse ou argileuse, souvent enrichie de fibres végétales pour prévenir les fissures (Anger & Fontaine, 2009). Traditionnellement, le processus de construction implique le mélange de la terre avec de l'eau et des fibres, la formation de boules de terre à la main, leur empilement énergétique pour former un mur monolithique, le compactage des faces du mur pour fermer les fissures, et l'élimination des irrégularités à l'aide d'outils tranchants. Cette technique prend du temps car la terre doit être mise en couches et séchée entre chaque couche pour éviter l'affaissement.

Pour pallier cet inconvénient, des recherches ont été menées pour préfabriquer de gros blocs de terre en atelier. Une autre évolution est la technique de la terre projetée, similaire au béton projeté, mise au point en 1996 aux États-Unis, où de la terre sèche est pulvérisée sur un coffrage vertical en bois, puis humidifiée pour devenir plastique. Cette méthode produit des murs monolithiques similaires à ceux de la bauge. Cependant, la fissuration lors du séchage constitue un problème majeur, limitant l'usage de cette technique en Europe de nos jours (Anger & Fontaine, 2009 ; Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995).

Le patrimoine architectural en bauge est fortement développé dans les pays d'Arabie Saoudite comme au Yémen (**Figure I.12(a)**) mais également en Afrique, par exemple chez les Lobis au Burkina Faso ou encore au Bénin, au Ghana et à Madagascar. On retrouve aussi la bauge en Europe dans le patrimoine rural comme en Angleterre ou en Italie mais aussi dans les

bourrines en Vendée (**Figure I.12(b)**) et les longères en Bretagne. Actuellement, de nombreuses mosquées sont construites en bauge en Afrique de l'Ouest comme au Mali ou au Burkina Faso (**Figure I.12(c)**).



Figure I.12: Construction en terre empilée : (a):Maison à Sa'dah, (b):Yémen ; (c): Bourrine de Vendée ; Mosquée de Bobo Dioulasso (Sources : fr.db-city.com ; www.saint-jean-de-monts.com ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Mosquée_de_Dioulasso-bâ)

I.5.8 Adobes

Les adobes, également connus sous le nom de banco en Afrique, sont des briques de terre crue façonnées à la main ou moulées à l'état plastique, puis séchées à l'air libre (Anger & Fontaine, 2009). La terre utilisée pour leur fabrication est de granulométrie fine, exempte de cailloux et de graviers pour faciliter le travail manuel et les dimensions réduites des moules, tout en évitant une trop grande teneur en argile pour prévenir les fissurations lors du séchage. Pour renforcer les briques et minimiser les fissures, on peut ajouter du sable ou des fibres végétales.

Pour façonner des briques prismatiques, la terre est moulée à l'état plastique et tassée à la main pour éliminer les poches d'air, puis démoulée. Après quelques jours de séchage au soleil, les briques peuvent être manipulées sans se déformer et sont ensuite disposées sur des paneresses pour un séchage uniforme. Une fois sèches, elles sont stockées puis utilisées dans la construction, souvent maçonnées avec un mortier de terre très adhésif. Cette méthode est la plus rapide dans la construction en terre, comparable à celle des matériaux industriels en termes de vitesse d'exécution.

La fabrication des adobes nécessite également très peu d'outillage : seul un moule en bois (ou en métal) est indispensable pour construire des briques rectangulaires. Il s'agit donc d'une méthode très économique répondant parfaitement aux besoins des pays en développement.

Le patrimoine architectural en adobe est présent sur tous les continents, aussi bien dans l'architecture vernaculaire que dans les bâtiments publics ou les édifices monumentaux. On

recense une vingtaine de centres historiques bâtis en adobes comme Shibam au Yémen (surnommé le Manhattan du désert) (**Figure I.13(a)**), Ghadamès en Libye (**Figure I.13(b)**) ou encore Lima au Pérou (**Figure I.13(c)**) (Anger & Fontaine, 2009 ; Guillaud & Houben, 1995).



Figure I.13: Constructions en adobe : (a): Shibam, Yémen ; (b): Ghadamès, Libye ;(c): Lima, Pérou (Sources : socks-studio.com ; WHEAP, 2012)

I.5.9 Terre de garnissage ou torchis

La terre de garnissage, plus communément appelée technique du torchis, remonte à des millénaires, ayant émergé au Proche-Orient au X^e millénaire avant notre ère avant de se répandre pendant l'époque néolithique le long du Danube, puis dans toute l'Europe continentale boisée au VI^e millénaire. Cette méthode consiste à appliquer de la terre à l'état plastique sur une structure en lattis de bois, fixée entre des poteaux, appelés colombes. La terre utilisée est de préférence fine, argileuse et collante, avec peu de sable, ce qui la rend sujette aux fissures lors du séchage. Pour améliorer ses propriétés, on y ajoute généralement des fibres végétales, comme de la paille, pour renforcer l'isolation thermique et réduire les fissures. Après avoir mélangé la terre et la paille avec de l'eau pour obtenir une consistance plastique, ce mélange est appliqué sur le lattis jusqu'à le remplir complètement, puis laissé sécher. Les murs sont souvent enduits avec de la terre stabilisée ou non (Paulus, 2015).

Bien que cette technique ne soit pas toujours appréciée pour sa durabilité, elle peut être extrêmement robuste lorsqu'elle est correctement mise en œuvre, protégée des intempéries, des remontées capillaires, et des nuisibles tels que les termites. Elle est également économique. Des évolutions contemporaines, telles que l'augmentation de l'épaisseur du mur en faveur d'une teneur en paille plus importante, ont permis d'améliorer la durabilité et l'efficacité de la technique. Des variantes modernes, comme l'utilisation de panneaux préfabriqués remplis de terre sur chantier, ont également été développées pour réduire les coûts et les délais de construction.

Chapitre I : Généralités sur la construction en terre.

En ce qui concerne le patrimoine architectural en torchis, on peut citer les constructions en torchis dans les régions boisées d'Amérique du Sud, d'Afrique et d'Asie, avec comme exemples la ville turque de Safranbolu (**Figure I.14(a)**) ou la ville brésilienne de Diamantina (**Figure I.14(b)**). En Europe on trouve l'exemple de certaine construction de la ville de Strasbourg (**Figure I.14(c)**), Troyes, et encore bien d'autres. Une partie du château de Versailles est également construite en torchis (Guillaud & Houben, 1995 ; Anger & Fontaine, 2009).



Figure I.14: Constructions en torchis : (a) Safranbolu, Turquie ; (b) Diamantina, Brésil ; (c) Strasbourg, France (Sources : WHEAP, 2012 : pp. 150 & 164 ; adispne.fr)

I.5.10 Briques de terre comprimée

Les briques de terre comprimée (BTC) sont produites dans des presses qui compriment de la terre humide et pulvérulente. Cette technique, relativement récente, a connu des débuts manuels avec des moules et un pilonnage manuel, avant de voir émerger les premières presses au XVIIIe siècle, notamment la Cinva-Ram en 1952 par l'ingénieur colombien Raul Ramirez. Les BTC ont connu une popularité croissante dans les années 1980 et 1990 pour la construction d'habitats économiques en Afrique, en Amérique du Sud et dans le sous-continent indien, contribuant à une revalorisation de la construction en terre comme matériau moderne (Paulus, 2015). Malgré les progrès dans la conception des presses et la stabilisation des briques, l'industrialisation de la technique a montré ses limites en raison de coûts élevés liés à la production et au transport des matières premières. Ainsi, la production in situ avec des presses manuelles semble plus rentable et adaptée à la plupart des chantiers.

Bien que les constructions en BTC ne figurent pas encore sur la liste du patrimoine mondial architectural de l'UNESCO en raison de la jeunesse de la technique, des projets immobiliers significatifs, comme les 15 000 logements et bâtiments publics de Mayotte construits en 1980

(Figure I.15), ont déjà été réalisés avec cette méthode. La suite de ce travail abordera en détail le développement de la technique de construction en BTC (Anger & Fontaine, 2009).



Figure I.15: Constructions en BTC à Mayotte : Préfecture ; Logements sociaux, Ecole
(Source : craterre.org)

La presse utilisée dans la fabrication de brique a connu d'importantes innovations après la deuxième guerre mondiale qui avait induit la destruction d'un très grand nombre de logements et d'usines. En 1956, un ingénieur colombien du nom de Raul Ramirez, invente une presse manuelle d'une conception extrêmement simple, qui permet une grande facilité de mise en œuvre (CRAterre- Rigassi, 1995). Cet appareil manuel s'appelle CINVA-RAM qui permet de fabriquer une brique de terre, a remplacé le moule d'adobe.

Les briques de terre comprimées sont souvent pressées puis extrudés. Ce mode s'appelle le compactage statique. Le compactage de la terre crue se fait à l'aide des trois catégories de presses classées selon (Mesbahet al, 1999) comme suite:

- **Mécaniques:** Ces presses permettent de compresser des briques de terre crue par le déplacement d'un piston sur une course imposée. Cependant, la plupart de ces presses ont des contraintes appliquées qui ne sont pas connues, ce qui influe sur l'homogénéité des briques confectionnées.
- **Manuelles:** En général, les contraintes théoriques appliquées lors d'un compactage par des presses manuelles sont de l'ordre de 2 MPa (Mesbahet al, 1999). Elles sont disponibles en abondance dans les pays en développement car elles ne coûtent pas cher et sont faciles à transporter.
- **Hydrauliques:** Elles sont beaucoup plus utilisées dans la fabrication de la brique parce qu'elles donnent des blocs qui ont une meilleure compacité. Il existe des presses dont les contraintes appliquées peuvent aller jusqu'à 100 MPa comme dans le cas de (Bruno et al, 2015).

La figure I.16 : représente des exemples des presses utilisées pour la confection des briques de terre



Figure I.16: Exemple de presse de confection des briques de terre. (www.block-machine.net)

I.6 Fuseau granulométrique et de plasticité

Dans la norme (XP P13-901), deux critères de sélection, basés sur la granulométrie et la plasticité du matériau terre, sont présentés. Concernant le critère de granulométrie, la norme propose un fuseau granulométrique de bornes : supérieure et inférieure (**Figure I.17**). Les mêmes valeurs limites des différents composants, exprimées en pourcentage de tamisât cumulés, sont données dans le **tableau I.3**.

Tableau I.3: Pourcentage du tamisât de chaque classe du sol selon fuseau granulométrique de la norme (XP P13-901).

Composants du sol	Borne supérieure	Borne inférieure
Gravier (20mm à 2mm)	100%	55%
Gros sable (2 à 0.2mm)	100% à 85%	55% à 30%
Sable fin (0.2mm à 20 μ m)	85% à 55%	30% à 15%
Limons (20 μ m à 2 μ m)	55% à 30%	15% à 12%
Argiles (inf à 2 μ m)	/	/

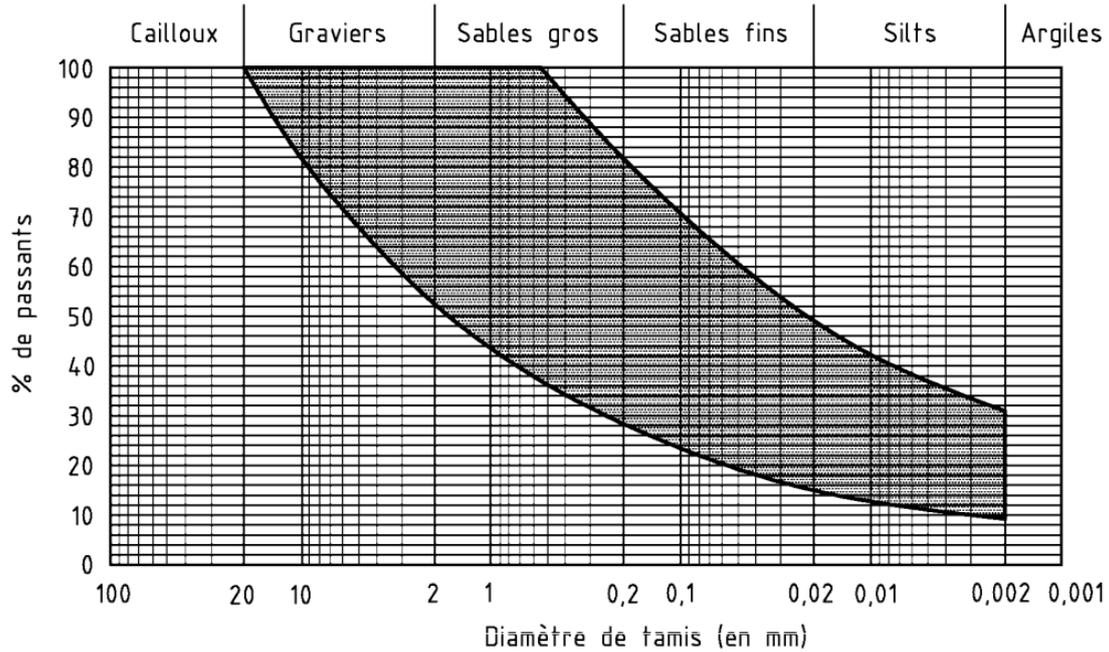


Figure I.17: Fuseau granulométrique. (XP P13-901)

Le critère de plasticité est aussi présenté sous forme d'un diagramme tracé dans le plan de l'indice de plasticité I_p en fonction de la limite de liquidité du matériau W_L (Figure I.18). Le diagramme est inclus entre les valeurs de limites de liquidité 21% et 50% et d'indice de plasticité entre 2% et 29%.

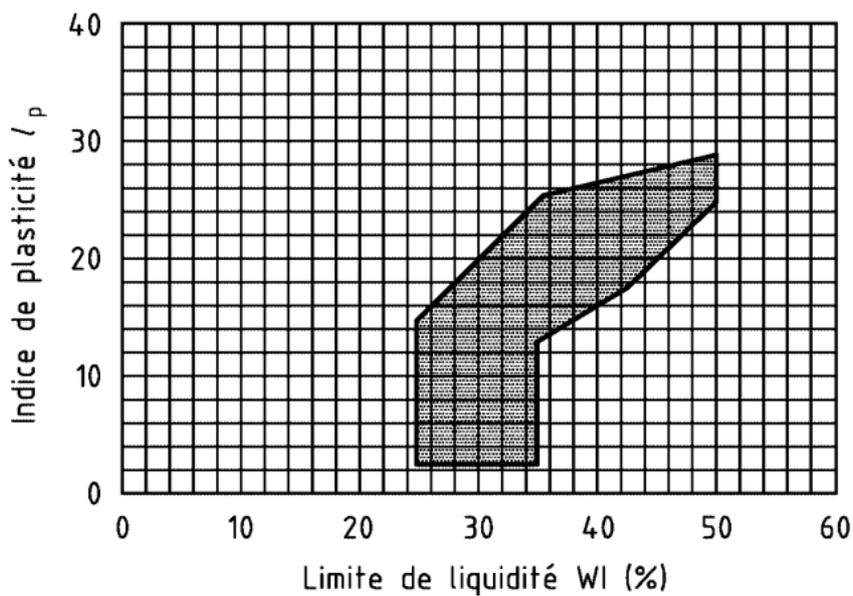


Figure I.18: Fuseau de plasticité. (XP P13-901)

I.7 La stabilisation de la terre

Pour améliorer les propriétés de la terre, l'ajout d'un stabilisant est souvent nécessaire. Cependant, le choix du stabilisant approprié dépend de la composition spécifique de la terre utilisée. Plusieurs options sont disponibles, avec plus de cent produits pouvant être utilisés comme stabilisant, soit intégrés dans la masse de la terre soit dans son enduit. Bien que la stabilisation soit étudiée depuis les années 1920, il n'existe pas de solution universelle qui convienne à tous les besoins (Guillaud &Houben, 1995). Les méthodes les plus courantes incluent la compression pour densifier, l'ajout de fibres, l'incorporation de ciment, de chaux ou même de bitume dans la terre. Cependant, la stabilisation doit être entreprise de manière réfléchie, car elle peut être coûteuse et complexe, nécessitant des études préalables. La terre possède déjà de nombreuses propriétés intéressantes à l'état naturel, donc l'ajout de stabilisants n'est pas toujours nécessaire et doit être justifié par des besoins spécifiques. Il existe trois approches pour un projet : utiliser la terre disponible sur place en adaptant le projet, importer de la terre pour répondre aux exigences du projet, ou modifier la terre sur place pour qu'elle corresponde au projet envisagé. De plus, chaque stabilisant peut agir selon différents processus physiques et chimiques. Six mécanismes de stabilisation sont couramment utilisés dans la construction en terre, comme illustré dans la (**Figure I.19**) et répertoriés dans le tableau suivant Il est important de préciser que chaque stabilisant n'agit pas obligatoirement selon un procédé exclusif mais il peut aussi cumuler plusieurs procédés : physique et chimique (Guillaud &Houben, 1995).

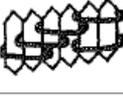
MOYENS DE STABILISATION DES TERRES REMANIÉES									
STABILISANT		NATURE	PROCÉDÉ	MOYENS	PRINCIPE	SYMBOLE			
SANS APPORT DE STABILISANT		MÉCANIQUE		DENSIFIER	CRÉER UN MILIEU DENSE QUI BLOQUE LES PORES ET LES CANAUX CAPILLAIRES				
		PHYSIQUE		ARMER	CRÉER UNE ARMATURE OMNI-DIRECTIONNELLE QUI RÉDUIT LE MOUVEMENT				
AVEC APPORT DE STABILISANT		STABILISANTS INERTES	MINÉRAUX	PHYSIQUE	ENCHAINER	CRÉER UN SQUELETTE INERTE QUI S'OPPOSE A TOUT MOUVEMENT			
			FIBRES		LIAISONNER	FORMER DES LIAISONS CHIMIQUES STABLES ENTRE LES CRISTAUX D'ARGILE			
		STABILISANTS PHYSICO-CHIMIQUE		LIANTS	CHIMIQUE	IMPERMÉABILISER	ENTOURER LES GRAINS DE TERRE D'UN FILM IMPERMÉABLE ET BOUCHER LES PORES ET CANAUX		
						HYDRO-PHOBANTS	HYDRO-FUGER	ÉLIMINER AU MAXIMUM L'ABSORPTION ET ADSORPTION D'EAU	

Figure I.19: Mécanismes de stabilisation (Guillaud & Houben, 1995)

I.7.1 Densification par compression

La densification par compression agit sur la porosité de la terre en répartissant de manière uniforme les pores et en modifiant leur taille pour rendre le matériau plus compact et résistant à la compression. Quatre méthodes de compression ont été développées : la compression statique, la compression dynamique par vibration, la compression dynamique par impact et la compression par pétrissage. Chaque méthode a sa propre teneur en eau optimale et masse volumique sèche optimale, nécessitant divers paramètres pour obtenir la meilleure compacité possible. L'énergie de compactage doit être adaptée au type de terre pour éviter le laminage des blocs, tandis que la courbe granulométrique de la terre utilisée joue un rôle crucial : une granularité serrée entrave la compacité, tandis qu'une granularité étalée favorise un compactage maximal. Un compactage correct réduit la perméabilité, la compressibilité, l'absorption d'eau et le gonflement hydrique, tout en augmentant les résistances mécaniques à court et à long terme (Guillaud & Houben, 1995).

I.7.2 Stabilisation à la chaux

La stabilisation à la chaux est une technique fondamentale dans le domaine de la construction, ayant émergé aux États-Unis dans les années 1920 pour les chaussées (Guillaud & Houben,

1995), mais désormais largement adoptée, en particulier dans les procédés de moulage par compression. Elle implique l'ajout de chaux à la terre dans des proportions similaires à la stabilisation au ciment, mais avec une quantité optimale spécifique pour chaque type de terre. Différents types de chaux sont utilisés, principalement les chaux aériennes, bien que la chaux vive soit plus efficace mais nécessite des conditions de stockage et de transport particulières. La stabilisation à la chaux repose sur cinq mécanismes : absorption d'eau, échange cationique, floculation, carbonatation et réaction pouzzolanique, qui modifient les propriétés de la terre stabilisée. Contrairement à la stabilisation au ciment, la présence de matières organiques est moins problématique, mais les sulfates sont néfastes à l'état humide.

Cette technique permet d'augmenter la masse volumique sèche et la résistance à la compression de la terre, tout en réduisant les variations dimensionnelles. Lorsque le dosage est optimal, on peut obtenir des résistances allant de 2 à 5 MPa voire même de 20 à 40 MPa dans le cas de procédés industriels. La résistance à la traction varie selon la qualité et la quantité des argiles qui réagiront avec la chaux (Guillaud &Houben, 1995). Les variations dimensionnelles sont également influencées par l'ajout de chaux à la terre : un ajout de 1 à 2% de chaux peut faire diminuer un retrait de 10% à 1% et supprimer tout gonflement (Guillaud &Houben, 1995).

La mise en œuvre de la stabilisation à la chaux comprend cinq étapes essentielles : pulvérisation, malaxage, temps de retenue, compression et cure de séchage, chaque étape contribuant à renforcer les caractéristiques mécaniques du matériau stabilisé

I.7.3 Stabilisation au ciment

La stabilisation au ciment est une technique devenue incontournable dans le domaine de la construction, ayant débuté dans les travaux routiers vers 1915 et évoluant depuis pour être largement utilisée tant dans les travaux publics que dans le bâtiment (Guillaud &Houben, 1995). Elle repose sur l'ajout de ciment à la terre, provoquant une série de réactions complexes qui modifient ses propriétés. La stabilisation au ciment renforce considérablement la résistance mécanique de la terre, augmentant sa résistance à la compression tant à l'état sec qu'humide, ainsi que sa résistance à la traction. Elle permet également de réduire les variations dimensionnelles de la terre, minimisant à la fois son retrait au séchage et son gonflement à l'humidification. En outre, cette technique améliore la résistance à l'érosion de la terre, la rendant plus durable dans diverses conditions environnementales (Paulus, 2015).

Pour obtenir des résultats optimaux, un dosage en ciment de 6 à 12% est généralement recommandé, avec une teneur en matières organiques inférieure à 2% et en sulfates inférieure à 2 ou 3% (Guillaud & Houben, 1995). Les ciments de type Portland, tels que le CEM I, sont les plus couramment utilisés, bien que d'autres types de ciments puissent également être appropriés selon les besoins.

La mise en œuvre de la stabilisation au ciment comprend plusieurs étapes essentielles, notamment la pulvérisation, le malaxage, le moulage ou la mise en forme, et le séchage du matériau avec une période de cure minimale recommandée de 14 jours, idéalement 28 jours, dans des conditions contrôlées pour assurer un développement optimal de la résistance.

I.7.4 Ajout de fibres

La stabilisation par l'ajout de fibres est une pratique courante dans diverses techniques de construction, offrant une alternative robuste et polyvalente. Les fibres, qu'elles soient d'origine naturelle ou chimique (synthétiques) (**Figure I.20**), jouent un rôle très important dans le renforcement des matériaux en terre. Les fibres naturelles, telles que la paille, le chanvre ou le jute, sont souvent utilisées pour leur disponibilité et leur compatibilité avec les méthodes de construction traditionnelles. En ajoutant ces fibres à la terre, elles agissent en renforçant la structure, en réduisant les fissures de retrait et en accélérant le processus de séchage. D'autre part, les fibres synthétiques, comme le polypropylène, le Kevlar ou les fibres de verre etc., offrent une résistance supérieure et une durabilité accrue, adaptées aux applications exigeantes. En associant ces fibres à la terre, on obtient des matériaux composites capables de résister à diverses contraintes mécaniques tout en conservant leur flexibilité.

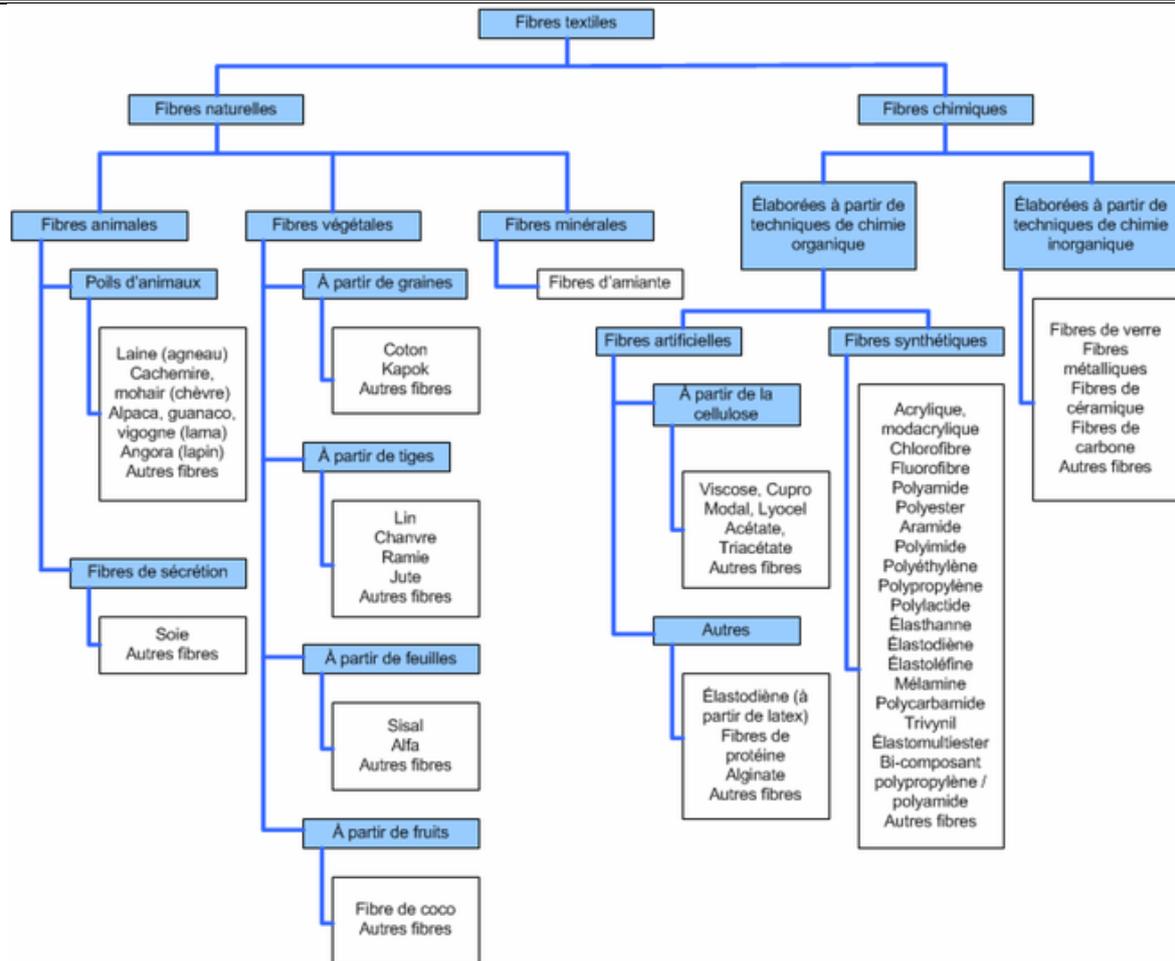


Figure I.20: Types de fibres (www.iso.org)

I.7.5 Stabilisation au bitume

La stabilisation au bitume est une méthode ancienne dans le domaine de la construction, ayant des origines anciennes et redéveloppée dans les années 1940 aux États-Unis. Le bitume utilisé dans ce processus est composé d'au moins 40% d'hydrocarbures lourds et de filler. Pour son application, il peut être mélangé à des solvants volatils tels que le gasoil, le kérosène ou le naphta, ou bien dispersé dans de l'eau en émulsion anionique ou cationique. Une fois mélangé à la terre, le bitume s'évapore avec l'eau ou le solvant, laissant derrière lui des films solides très fins qui adhèrent aux particules de terre, les enrobant (Guillaud & Houben, 1995).

Cette méthode présente plusieurs avantages, notamment la diminution de la densité de la terre, l'augmentation de sa résistance à la compression et la réduction de son absorption d'eau et des gonflements. Cependant, il convient de prendre des précautions lors de son utilisation, en particulier en ce qui concerne la granularité de la terre, la présence de matières organiques et de sels minéraux (Paulus, 2015). La mise en œuvre de cette méthode se fait en plusieurs

étapes, comprenant le malaxage, le temps de retenue, le compactage et la cure de séchage, dont la durée influencera la résistance à la compression finale du matériau.

I.8 Les avantages de la terre crue

Le matériau local à base de terre crue stabilisée ou non présente beaucoup d'avantages. Les principaux intérêts sont axés sur les aspects écologiques, économiques, mécaniques et hygrothermiques.

I.8.1 Avantages écologiques

Vu que les situations actuelles dans lesquelles le changement climatique s'aggrave de plus en plus, une maison à vocation écologique est devenue incontournable pour offrir des bienfaits environnementaux. Ainsi, l'utilisation du matériau terre comme matériau de construction s'avère d'un intérêt environnemental très important.

Concernant le cycle de vie, la terre pourra prendre le même chemin dans son parcours à savoir : en premier, l'opération d'extraction et d'utilisation jusqu'à la démolition (**Figure I.21**), enfin, la réutilisation en matière de recyclage. Le processus de fabrication des matériaux de construction à la base de la terre crue permet aussi de limiter les émissions de CO₂ en éliminant la phase de calcination à de grandes températures ayant un impact négatif sur l'environnement.

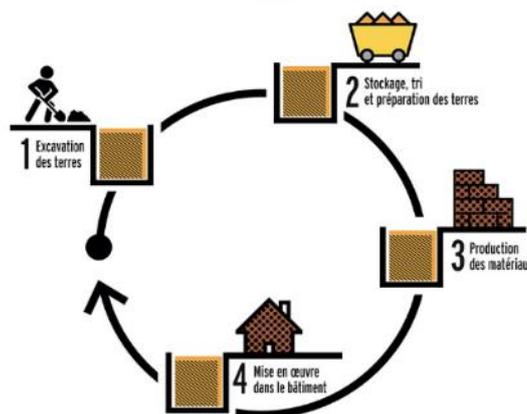


Figure I.21: Cycle de vie du matériau terre. (<https://www.cycle-terre.eu/>)

I.8.2 Avantages économiques

En Algérie, la consommation d'énergie finale des bâtiments représente plus de 41% de la totalité d'énergie (APRUE, 2017). Le bilan énergétique national (année 2017) du ministère de l'énergie montre que l'électricité représente un tiers de la consommation totale (**Figure I.22**).

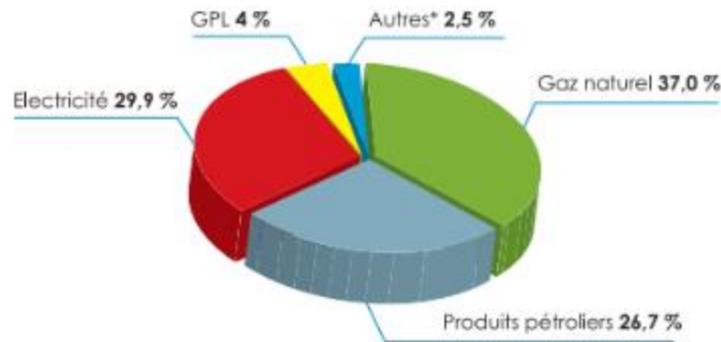


Figure I.22: La consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment en Algérie. (APRUE, 2017).

D'un point de vue énergétique, le tableau (**Tableau I.4**) liste l'énergie requise pour produire un mètre cube de matériaux de construction parmi les plus employés. Les valeurs des énergies consommées lors de la fabrication de matériaux de construction comme l'acier et la brique cuite sont alarmantes. Par contre, les matériaux en terre crue telle que la brique compactée et le pisé nécessitent une quantité ne dépassant pas 120 kWh/m³.

Tableau I.4: Quantité d'énergie nécessaire à la production d'un mètre cube de certains matériaux. (Revue « maison écologique », N° 11 : octobre - novembre 2002, Cité par Hacène, 2012)

Matériaux de construction plus utilisés	kWh/m ³
Acier	57000
Panneau fibre bois dur	3800
Béton ordinaire	500
Plaque de carton plâtre	850
Brique de terre cuite	700
Laine de verre	250
bois d'œuvre	180
Brique de terre comprimée	100-120
Terre crue et la paille	25-30

I.8.3 Avantages thermiques

L'isolation thermique est une propriété permettant d'améliorer le confort thermique constructif. Un bâti en terre doit se conformer aux règlements thermiques : DTR-C.3.2/4(Algérie), RT 2012 (France) etc...

Sur la (**Figure I.23**), on représente la conductivité thermique des matériaux de construction les plus utilisés dans le domaine de l'habitat. Les valeurs de conductivité thermique des différents matériaux de construction en terre (adobe, torchis, mortier de terre, pisé, BTC) donnent une visualisation globale sur ses aptitudes d'isolation thermique. La conductivité thermique (λ) du pisé et de la bauge ont la même fourchette de valeurs et qui varie entre 0.5 W. m-1. K-1 à environ 2 W. m-1. K-1. Les plus faibles valeurs de λ dans les matériaux de construction en terre sont celles du mélange terre avec la paille (entre 0.1 et 0.5 W. m-1. K-1). On note que selon la norme française RT 2012, un matériau est considéré comme isolant si sa conductivité thermique est inférieure à 0,065 W m⁻¹ K⁻¹

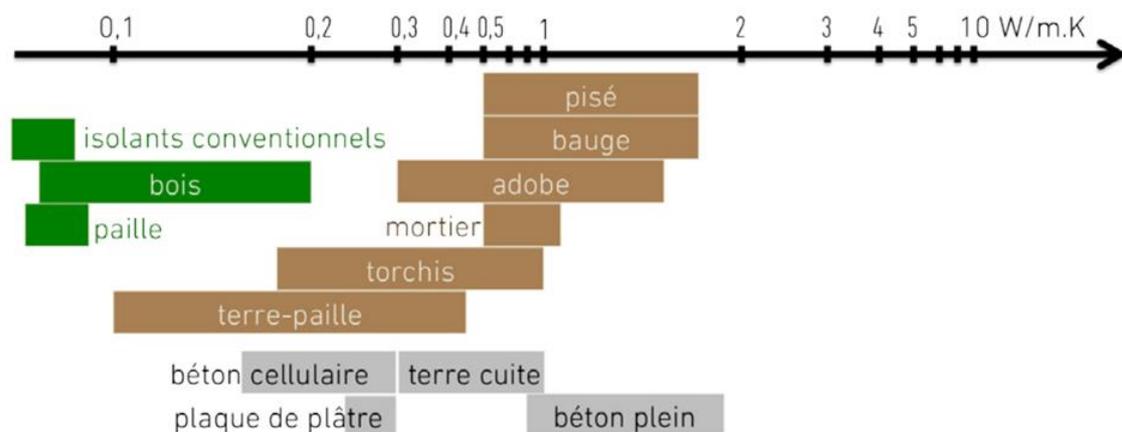


Figure I.23: Conductivité thermique de divers matériaux de construction. (Moevus et al, 2016)

I.9 Les inconvénients de la terre crue (non stabilisée)

La construction en terre, illustrée par les ksour dans le Sahara algérien (**Figure I.24**), est fortement sensible à l'eau, que ce soit à cause de la pluie battante, de la capillarité, etc. Son caractère hydrophile est considéré comme son point faible. Par exemple, le village de Ait Itchir en pisé dans la wilaya de Tizi Ouzou a été affecté par divers désordres, dont 47% sont attribuables à la pluie battante, aux vents et 23% au séisme (Salmi, 2014). Des essais d'absorption par capillarité (**Figure I.25**), réalisés sur des briques comprimées composées d'argile et de calcaire, ont également montré une fragilité face à l'eau, avec un délitement

Chapitre I : Généralités sur la construction en terre.

observé lors du contact avec l'échantillon. Ces exemples soulignent la nécessité d'un traitement approprié par un stabilisant pour renforcer la résistance à l'eau de ces matériaux.



Figure I.24: Un exemple de Ksar dans le Sahara algérien (Timimoune) (Zerariet al, 2019)



Figure I.25: Brique après le test d'absorption d'eau par capillarité. (a) : Echantillon en contact avec l'eau ; (b) Un délitement de l'échantillon (Filament, 2017)

À partir d'une étude sur la durabilité de la brique de terre comprimée, (Ghomari, 1989) a formulé les recommandations suivantes :

Le choix judicieux de la terre (granulométrie, plasticité) ;

❖ Un traitement de surface (enduits, badigeons, hydrofuges) contre les pluies battantes ;*

❖ L'amélioration de la sensibilité à l'eau par un stabilisant physico-chimique (compactage+ traitement).

I.10 Conclusion

Les matériaux de construction issus de la terre crue constituent une alternative très intéressante par rapport aux matériaux tels que le béton, notamment d'un point de vue économique, écologique et confort hygrothermique.

À travers l'histoire, plusieurs techniques de construction en terre ont été développées. Ces techniques très courantes ont été présentées dans ce chapitre à savoir le torchis, le pisé et la brique de terre comprimée (BTC) et d'autres.

Le plus important dans cette fabrication est le choix du matériau et son compactage. C'est pour cela, des recommandations et des normes sont à la disposition des constructeurs pour choisir un matériau capable de répondre aux exigences nécessaires dans la construction des bâtiments. En considérant ces aspects, les constructions en terre peuvent offrir non seulement des solutions durables et respectueuses de l'environnement, mais aussi des habitats confortables et économiquement avantageux.

CHAPITRE II : MATERIAUX ET METHODES

II.1 Introduction

Le but recherché en construction en terre est d'assurer la pérennité de l'ouvrage en obtenant une densification convenable du sol. Les caractéristiques de compactage sont définies au laboratoire à partir des résultats des essais Proctor normal ou modifié. Généralement, pour le domaine de l'habitat, on demande « une résistance minimale garantie » du matériau fabriqué (briques, pisé, etc.), d'une bonne tenue à l'eau, ainsi qu'une bonne durabilité, en plus d'autres qualités notamment phoniques, thermiques et surtout économique. Dans ce chapitre, une étude expérimentale sur l'argile de la briqueterie de Ben-Adouane (crue, stabilisé avec la chaux et/ou avec ajout de brique rouge concassée) est entreprise de faire : une identification des matériaux et mélanges étudiés ; présentation du mode de confection des éprouvettes et de présenter les différents essais de caractérisation mécaniques et hydriques utilisées.

II.2 Matériaux étudiés

Dans le cadre de cette étude, plusieurs matériaux ont été sélectionnés pour caractériser et fabriquer des échantillons de brique de terre compressée.

Tout d'abord, l'argile provenant de la briqueterie de Ben-Adouane a été choisie (**Figure II.1-a**). Cette argile constitue la matière première pour la fabrication de brique creuse rouge. Ce matériau a été, préalablement écrêtée à une granulométrie de 1 mm, constitue la base principale de nos mélanges. Sa provenance locale et sa disponibilité en font un matériau d'intérêt majeur pour une application de construction durable.

Pour valoriser les déchets de briques, nous avons introduit de la brique rouge concassée, également écrêtée à une granulométrie de 1 mm, avec une fraction plus fine comprise entre 63 μm et 1 mm (**Figure II.1-b**). Le concassage était réalisé au laboratoire au moyen d'un concasseur à mâchoires (**Figure II-2**). L'intégration de ces déchets de briques dans nos mélanges vise à étudier leur impact sur les propriétés finales des briques de terre compressée, tout en contribuant à réduire les déchets et à promouvoir une économie circulaire dans le secteur de la construction. Par ailleurs, la chaux hydratée a été sélectionnée comme agent stabilisant dans les mélanges (**Figure II.1-c**).

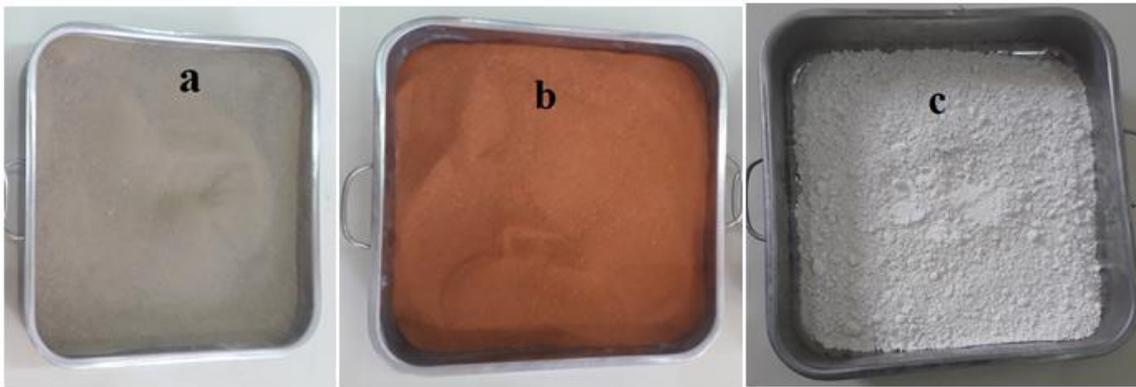


Figure II.1: matériaux étudiés. -a : matériau crue. -b : brique rouge concassée. -c : la chaux hydratée.



Figure II.2: Broyeur à mâchoires laboratoire de l'université de Saida.

Chapitre II : Matériaux et méthodes

En combinant ces différents matériaux dans des proportions variées, nous avons élaboré une série de mélanges destinés à être caractérisés et évalués. Ces mélanges ont été soigneusement codifiés pour faciliter leur identification et leur suivi tout au long de l'étude (**Tableau II.1**).

Tableau II.1:les mélanges étudiés et leur codage.

Numéro de mélange	Nom de mélange	Codage
1	Argile + brique rouge concassée (10% ou 20%)	Ar + Br (%)
2	Argile + la chaux (4%, 6% , 8% et 10%)	Ar +Ch(%)
3	Argile + brique rouge concassée 10% ou 20%) + la chaux (4%, 6% ;8% et 10%)	Ar +Br(%) +Ch(%)

On note que les trois matériaux sélectionnés proviennent de la compagnie BMSD de Saida. Cette compagnie comporte 4 filiales qui activent dans les secteurs du matériau de construction. Elle est spécialisée dans la brique creuse et la tuile romaine. Les briqueteries de Saida (Ben Adouene, **Figure II.3**) et Eulr Sobris (Sidi Aissa) développent une production annuelle avoisinent les 450 000 tonnes. La Sarl BMSD Chaux (anciennement SODEPAC) est implantée sur une carrière de chaux à Hasasna, dans la ville de Saida. Elle est spécialisée dans la production de chaux (vive et hydratée) et de fleur de chaux, et dispose d'une capacité de production annuelle de 100 000 tonnes. la Sarl AGS produit principalement les blocs de marbre, les feuilles de marbre, les grains de marbre et la poudre de marbre (<https://bmsdcompanies.com>).

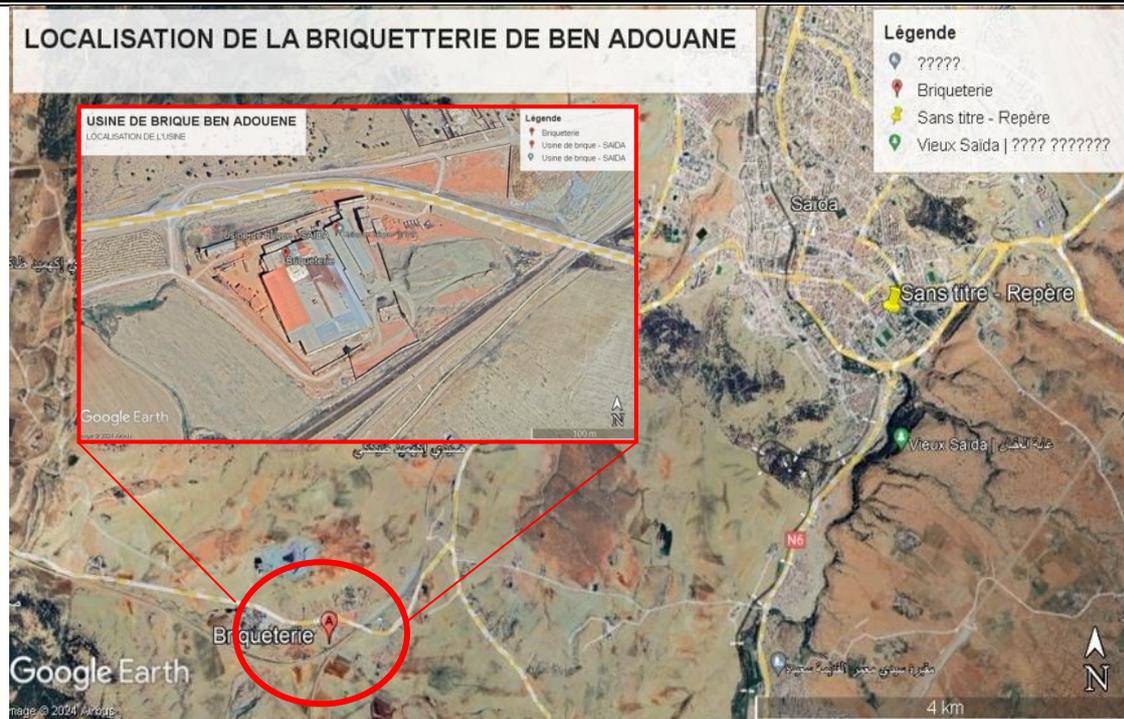


Figure II.3: Localisation de la briquetterie BMSD (Google Earth 2024).

II.3 Identification des matériaux et mélanges étudié

II.3.1 Identification de l'argile et du mélange argile-brique

II.3.1.1 Analyse granulométrique

L'essai de tamisage par voie humide consiste à séparer par lavage les grains agglomérés d'un échantillon d'une masse connue de matériau, puis à les fractionner, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement après séchage le refus cumulé sur chaque tamis, selon la norme (XP P 94-041,). Pour compléter la courbe granulométrique du sol, il faut réaliser l'essai de Sédimentation selon la norme (NF P 94-057).

Les courbes granulométriques de l'argile brute (Ar) ainsi que des mélanges d'argile et de brique concassée à des pourcentages de 10 et 20% (Ar + Br (10 et 20%)) sont présentées dans la **figure II.4**. Cette figure inclut également le fuseau granulométrique Craterre défini par la norme XP P13-901 pour les briques de terre compressée. Ce fuseau représente les limites minimale et maximale des granulométries idéales pour les matériaux de construction.

Il est observé que les mélanges étudiés présentent une proportion de fines très élevée, dépassant les 90% (**Tableau II.2**). Cette observation est valable pour tous les mélanges examinés.

En ce qui concerne la conformité au fuseau Craterre défini par la norme XP P13-901, nos matériaux ne se situent pas à l'intérieur des limites prescrites. Cette non-conformité est principalement due à la présence significative de limons et d'argiles dans nos échantillons. Dans cette optique, il est envisageable d'explorer la piste de la stabilisation chimique, notamment par l'ajout de chaux, afin d'optimiser les caractéristiques granulométriques de nos mélanges et de les rendre compatibles avec les spécifications de la norme. Les résultats de l'analyse granulométrique sont résumés dans le **tableau II.2**

Tableau II.2: Les résultats de l'analyse granulométrique

Analyse granulométrique			
Caractéristiques	valeur		
	Ar	Ar + Br (10%)	Ar + Br (20%)
Sable (%) 63µm-2mm	10,07	10,9	10,9
Limon (%) 2µm – 63µm	52,94	53,11	53,11
Argile (%) <2µm	35,99	35,99	35,99
D 60 (µm)	56	56	56
D 50 (µm)	4		
Nature du sol	Sol Fin		

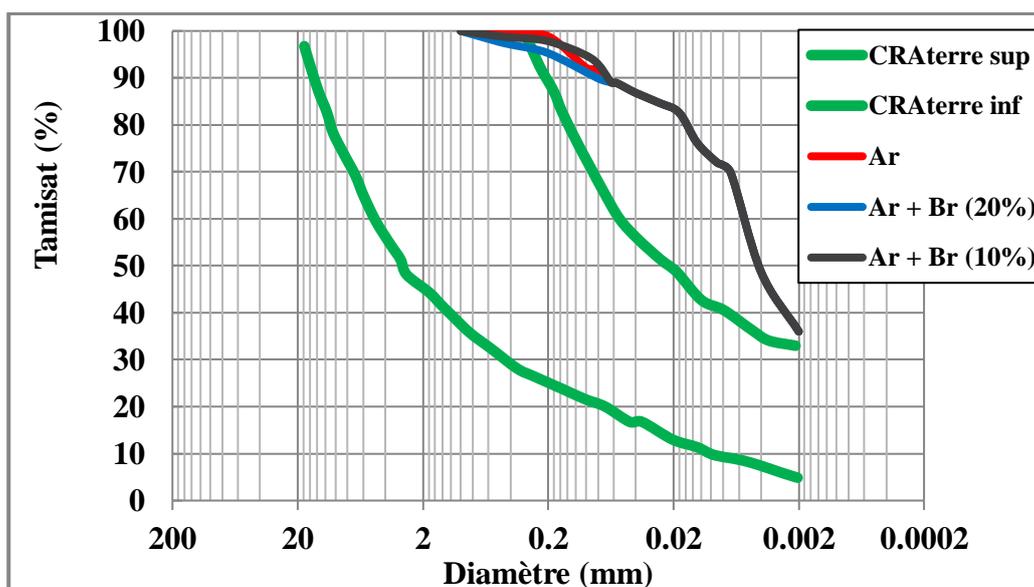


Figure II.4: Courbes granulométriques des mélanges étudiés.

II.3.1.2 Limites d'Atterberg

Limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) sont des teneurs en eau pondérale correspondant à des états particuliers d'un sol selon la norme (NF P 94-051). L'essai est réalisé sur la fraction inférieure à 0.4mm (**figure II.5**).

Les résultats de l'essai des limites d'Atterberg sont présentés dans le **tableau II.3** et la **figure II.5**. En observant les variations de la limite de liquidité (W_L), de la plasticité (W_P), et de l'indice de plasticité (I_P) en fonction du pourcentage de brique rouge concassée ajoutée aux matériaux crus, on constate une diminution progressive de ces paramètres.



Figure II.5: Essai de limite de liquiditélaboratoire de l'université de Saida.

Selon la classification LPC modifiée, les matériaux étudiés peuvent être rangés parmi les argiles peu plastiques (A_p). Cette observation est renforcée par les valeurs de W_L , W_P , et I_P , qui correspondent à cette catégorie.

En examinant la **figure II.6**, où nous avons ajouté le fuseau de plasticité conformément à la norme XP P13-901, nous remarquons que l'ensemble des mélanges étudiés se situe à l'intérieur de la zone recommandée pour la fabrication de briques de terre compressée. Cette conformité suggère que les variations introduites dans les mélanges n'affectent pas de manière significative la plasticité des matériaux, les maintenant dans des limites appropriées pour la fabrication de briques.

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

Limite d'Atterberg			
Caractéristiques	Argile crue	Argile crue +10% de brique	Argile crue +20% de brique
W_L (%)	46,48	39,77	38,24
W_P (%)	22,04	20,23	19,81
I_P (%)	24,44	19,54	18,42
Nature du sol	Sol Fin : Argile peu plastique Ap		

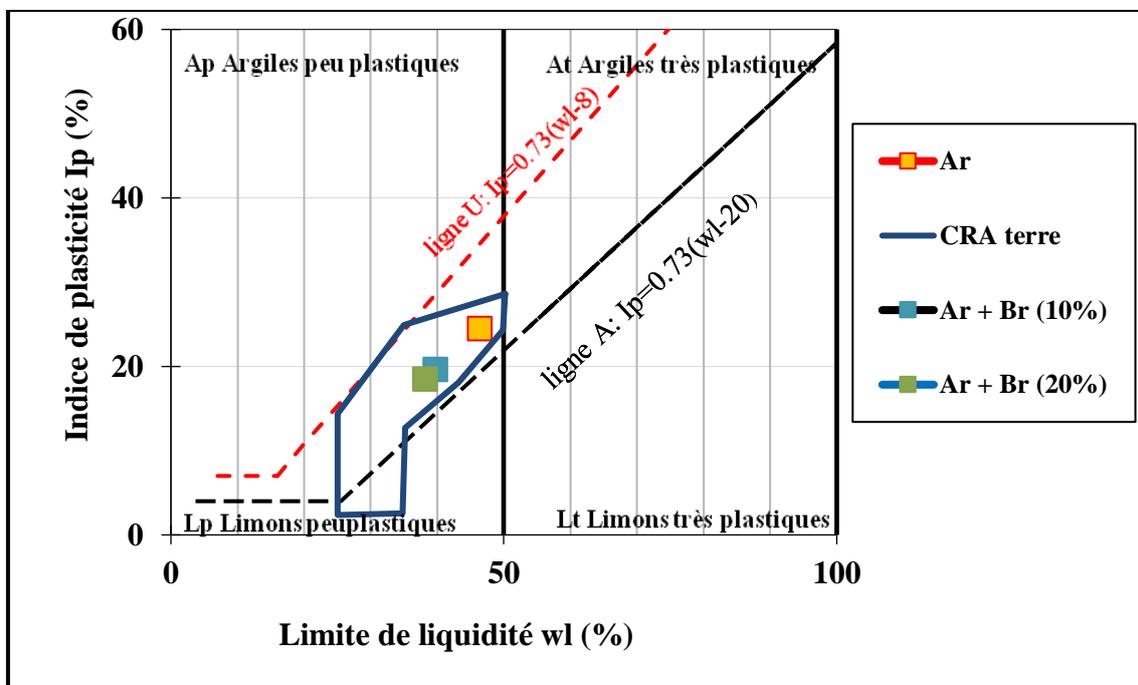


Figure II.6: Plasticité des mélanges étudiés.

II.3.1.3 Activité du sol

Les résultats de l'activité du sol, exprimés par le coefficient d'activité (A_c), sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tableau II.4). Ce coefficient est calculé comme le rapport entre l'indice de plasticité (I_p) et le pourcentage de grains inférieurs à $2\mu m$ dans le matériau. Selon la définition établie, un A_c inférieur à 0,75 indique une inactivité du sol, entre 0,75 et 1,25 indique une activité moyenne, et entre 1,25 et 2 indique une sol active, tandis qu'un A_c supérieur à 2 indique une activité très forte.

En analysant les résultats, on constate que pour tous les mélanges, le coefficient d'activité (A_c) se situe en dessous de 0,75, indiquant une inactivité du sol. Cette caractéristique est avantageuse car elle simplifie le processus de fabrication et réduit les coûts associés à l'utilisation de stabilisants.

Tableau II.4: Activité des mélanges étudiés.

Activité du sol			
Caractéristique	valeurs		
	Argile crue	Argile crue+10% de brique	Argile crue+20% de brique
A_c	0,679	0,543	0,512

II.3.1.4 Essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène vise à évaluer la capacité d'adsorption du matériau en suspension dans l'eau en mesurant la quantité de bleu de méthylène qu'il peut absorber. La valeur du bleu de méthylène est directement corrélée à la surface spécifique des particules constituant le sol. L'essai consiste à ajouter successivement des quantités croissantes de bleu de méthylène, en surveillant l'adsorption après chaque ajout (norme NF P 94-068, **figure II.7**).

Cet essai a été réalisé uniquement pour l'argile de Ben-Adouene à l'état cru. La valeur obtenue est $VBS = 7.3$. Cette valeur permet de classer notre sol parmi les sols argileux. En estimant la surface spécifique (**Equation II.1**) nous obtenons une valeur de $153.3 \text{ m}^2/\text{g}$. Cette valeur permet de classer notre argile parmi les argiles illitiques (illite)

$$SST = 21 * VBS \quad (\text{II.1})$$



Figure II.7: Essai de bleu méthylène laboratoire de l'université de Saida.

II.3.1.5 Teneur en carbonate (CaCO_3)

L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone (CO_2) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphérique connues) par un échantillon préparé pour l'essai selon la norme (NF P 94-048). L'appareillage utilisé est le calcimètre de DIETRICH-FRÜHLING. Le pourcentage de CaCO_3 est donné par l'équation II.2

$$\text{CaCO}_3(\%) = \frac{\text{Volume du CO}_2 \text{ dégagé par 0,5 g de sol}}{\text{Volume du CO}_2 \text{ dégagé par 0,5 g de CaCO}_3 \text{ pur}} \quad (\text{II.2})$$

Le résultat a montré que l'argile de Ben-Adouane présente une faible portion de CaCO_3 et qui s'élève à 5%.

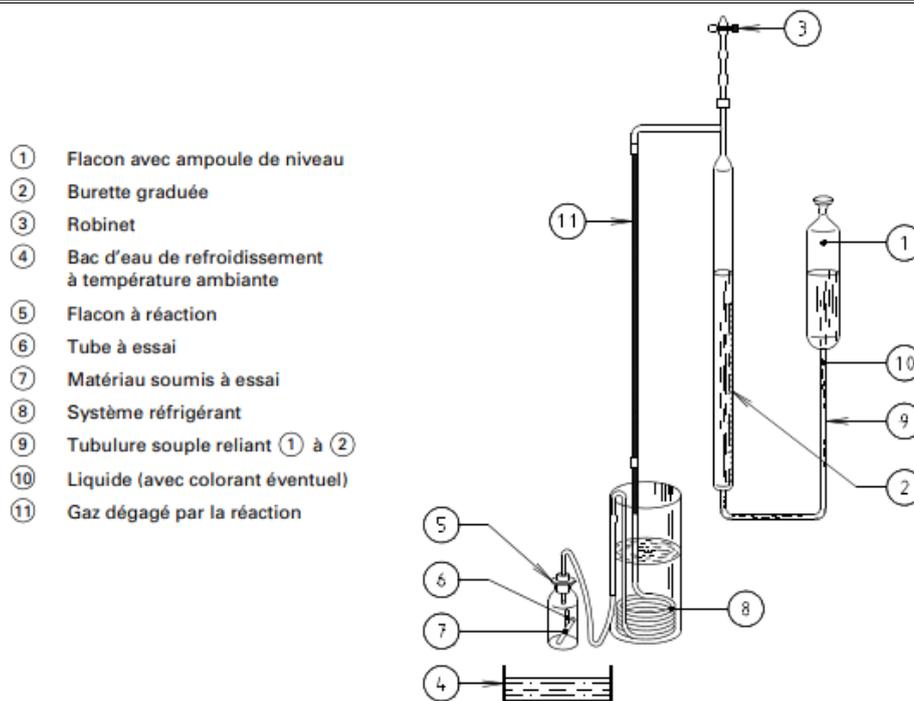


Figure II.8: Schéma d'un Calcimètre de DIETRICH-FRÜHLING (NF P 94-048).

II.3.1.6 Mesure de PH

Le pH du sol est un paramètre important dans la caractérisation des matériaux utilisés pour la fabrication des briques de terre comprimée. Il mesure l'acidité ou la basicité du sol sur une échelle de 0 à 14, où un pH de 7 est considéré comme neutre. Un pH inférieur à 7 indique un sol acide, tandis qu'un pH supérieur à 7 indique un sol basique. La valeur du pH influence directement la stabilité chimique des matériaux et peut avoir un impact significatif sur leurs propriétés physiques et mécaniques.

Le pH du sol est mesuré selon la norme ASTM D6276, ce qui permet de définir le pourcentage de chaux minimal nécessaire pour la stabilisation du sol. L'essai consiste à placer une quantité de sol sec de 25g dans une solution d'eau déminéralisée de 100ml. Après malaxage et homogénéisation de la solution, la mesure du pH est entreprise au moyen d'un pH-mètre préalablement calibré (**Figure II.9**). Le sol de Ben-Adouene présente un pH de 7.91.

Cela signifie que le sol est légèrement alcalin. Ce pH est relativement proche de la neutralité, ce qui peut être bénéfique pour la fabrication des briques de terre comprimée, car un pH neutre ou légèrement basique est généralement favorable à la plupart des processus de stabilisation et de compression des sols.



Figure II.9: PH mètre de mesure laboratoire de l'université de Saïda.

II.3.1.7 Essais de compactage Proctor modifié

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir de l'Essai Proctor modifié (densité élevée). Ce processus implique l'humidification d'un matériau à plusieurs teneurs en eau, suivi de son compactage à chaque niveau d'humidité selon des procédures et une énergie standardisée. Pour chaque valeur de teneur en eau testée, la masse volumique sèche du matériau est mesurée, et une courbe est tracée pour représenter les variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau (voir **Figure II.10**). Ces essais sont conformes à la norme (NF P 94-093). Les résultats de ces essais sont résumés dans le **tableau II.5** :

L'augmentation de la teneur en eau optimale avec l'ajout de brique rouge concassée peut être expliquée par une réduction de la plasticité du matériau. Les résultats des limites d'Atterberg indiquent une diminution de la plasticité avec l'ajout de brique rouge concassée, ce qui peut nécessiter une quantité plus importante d'eau pour atteindre une compacité optimale lors du compactage. Cette augmentation de la teneur en eau optimale de compactage avec le pourcentage de brique concassée ajoutée et suivi d'une diminution de la masse volumique sèche maximale.

Tableau II.5: les résultats de l'essai Proctor modifié des mélanges étudiés.

Essai Proctor modifié			
Caractéristiques	Argile crue	Argile crue+10% de brique	Argile crue+20% de brique
Masse volumique sèche (g/cm ³)	2.04	1.94	1.88
Teneur en eau (%)	11.5	12	12.8

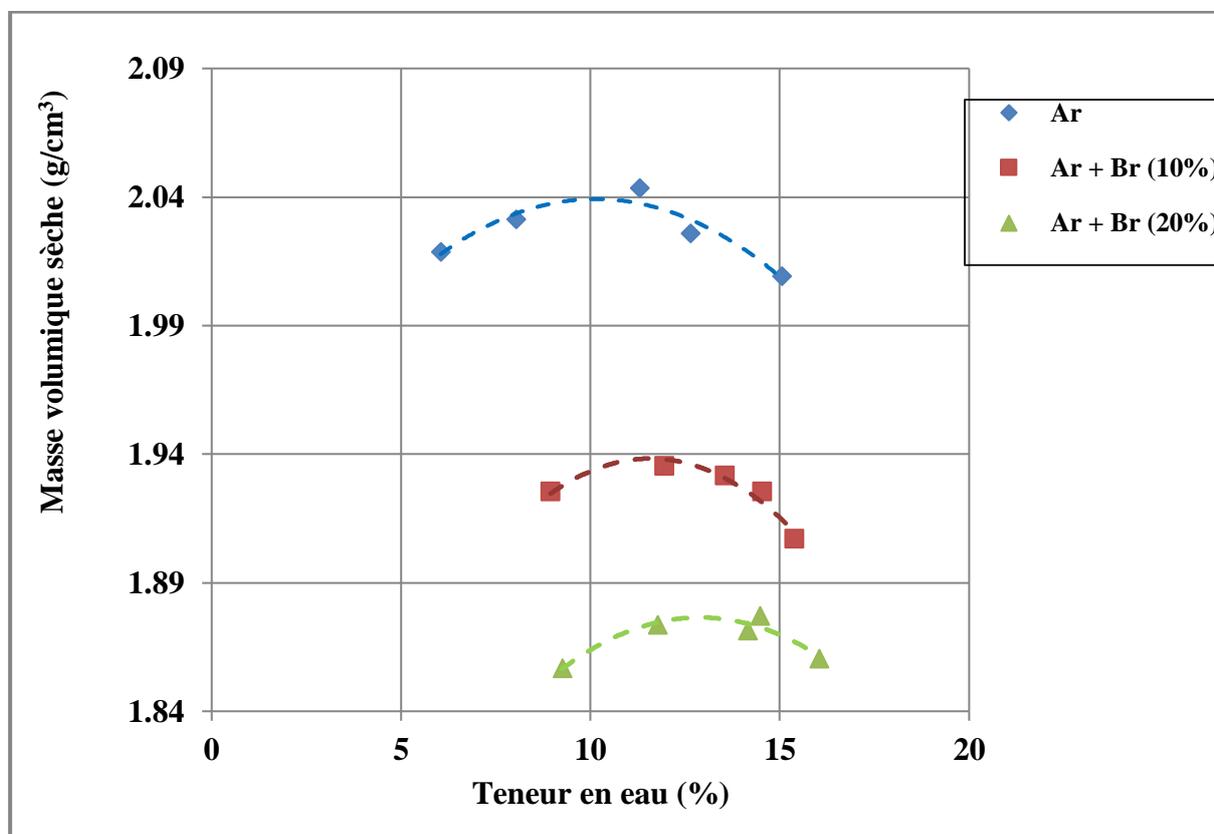


Figure II.10: Courbes de compactage de Proctor modifié des mélanges étudiés.

II.3.2 Identification de la chaux

Les caractéristiques chimiques et physiques de la chaux hydratée utilisé sont résumées dans le **tableau II.6** et **tableau II.7**. L'ensemble de ces données sont issue de l'usine de fabrication (BMSD chaux). Sur le plan chimique, la chaux hydratée présente une composition chimique typique avec une teneur en CaO variant entre 67,4% et 73,25%, confirmant sa pureté. Les

Chapitre II : Matériaux et méthodes

niveaux très faibles de MgO, Fe₂O₃, Al₂O₃, SiO₂, SO₃, Na₂O et K₂O garantissent une faible contamination et une haute qualité du produit. En particulier, la teneur en Ca(OH)₂ dépasse 80%, ce qui confirme sa qualité de chaux hydratée. Du point de vue physique, la chaux hydratée présente une densité inférieure à 500 g/l, et des pourcentages de refus aux tamis de 630μ et 90μ, respectivement de 0% et 10%, ce qui facilite sa manipulation et son incorporation dans les mélanges.

Tableau II.6: Caractéristiques chimiques (www.bmsdcompanies.com).

Paramètres	Valeur (%)
CaO	67,4 à 73,25
MgO	< 0,4
FE ₂ O ₃	< 2
AL ₂ O ₃	< 1
SiO ₂	< 2,2
So3	< 1
Na ₂ O+K ₂ O	< 0,4
CO ₂	< 5
CaCO ₃	< 10
Ca (OH) ₂	> 80
Insoluble dans HCL	< 0,35

Tableau II.7 : Caractéristiques physiques(www.bmsdcompanies.com)

Caractéristiques physiques	
Paramètres	Valeur spécifique
Densité	< 500 g/l
Constance volumique	Bonne
Poids spécifique	2,26 g/cm ³
H ₂ O d'hydratation	19,46 à 23,29
Refus 630μ	0%
Refus 90μ	10,00%

II.4 Fabrication et mise en œuvre des éprouvettes

II.4.1 Matériel spécifique

Pour la Confection des éprouvettes nécessaires au programme d'essai nous avons utilisé un moule prismatique selon le modèle de (Ghomari, 1989). Ce moule est réalisé en acier trempé, et il est composé de 8 éléments formant après montage un volume de $(100*50* 50)$ mm³. Lemoule est muni d'un piston pour assurer la transmission de la contrainte de compactage de la presse au mélange (**Figure II.11**).



Figure II.11: Moule de confection de l'éprouvettes laboratoire de l'université de Saïda.

II.4.2 Principe de confection des éprouvettes

Pour le compactage statique ; une presse à béton a été utilisée (**Figure II.12**).L'ensemble des éprouvettes ont été confectionnées à l'optimum Proctor modifié du sol cru et ceci pour avoir une meilleure densité sèche des éprouvettes. Avant le lancement de chaque essai, une période de cure de 3 jours était adoptée dans un bain thermostaté à 60C°. Pour les échantillons stabilisés, une quantité de chaux variant entre 4% et 10%(à raison d'un pas de 2%) est ajoutée au matériau sec. Pour la préparation à la teneur en eau désirée, la quantité d'eau distillée est ajoutée au matériau sec broyé, par le moyen d'un arrosoir. Au fur et au mesure de l'ajout d'eau, on malaxe le matériau, à fin d'obtenir un mélange homogène. Cette opération permet de réduire de façon considérable la formation de mottes. Après, le mélange est conservé dans des sacs étanches, et laisser pendant au moins 24h dans un endroit hermétiquement isolé, afin d'homogénéiser la teneur en eau. Avant chaque essai, une vérification de la teneur en eau est obligatoire

Afin de calculer la quantité de matériau placée à l'intérieur du moule, nous utilisons la relation(II.3) :

$$P_h = v \times \rho_d \times (1 + w). \quad (\text{II.3})$$

P_h : Le poids humide à insérer dans le moule de compactage

v : Le volume de moule ($v = 250\text{cm}^3$)

ρ_d : La masse volumique sèche optimale ($\rho_d = 2.04 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$).

w : La teneur en eau optimale théorique ($w = 11.5\%$).

Pour la fabrication des éprouvettes en utilisant différent étapes sont résumé dans l'organigramme de la **figure II.13**.



Figure II.12: compactage statique des éprouvettes et Presse hydraulique laboratoire de l'université de Saida.

Pour l'ensemble des essais projetés, un total de 225 éprouvettes a été réalisée et dont le test est réalisé soit : Immédiatement après compactage, à 3 jour, 7 jour, 14 jour et 28 jour.

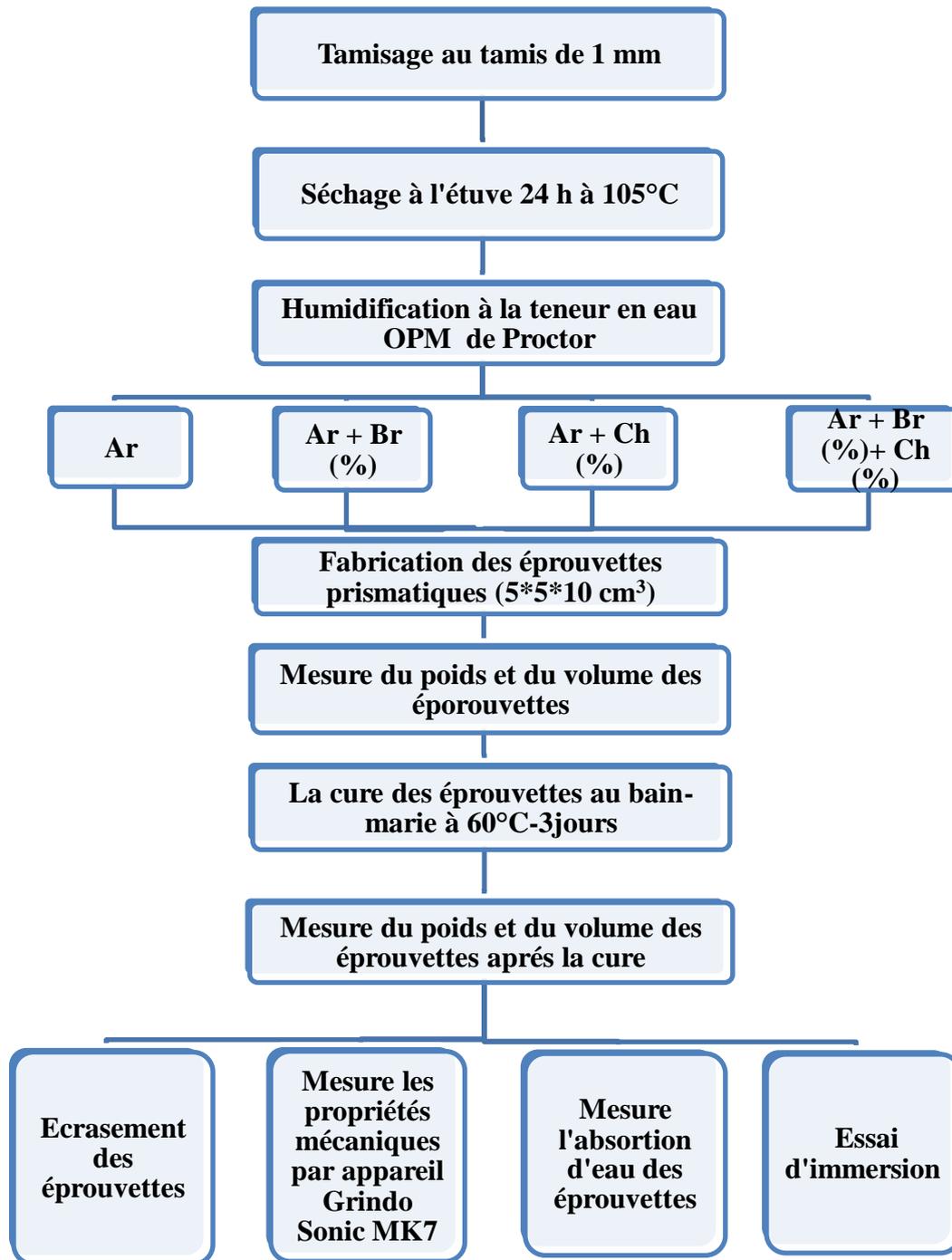


Figure II.13: Etapes de confection des éprouvettes et du programme expérimental.

II.5 Programme expérimental et essais réalisés

Le programme expérimental comporte un ensemble d'essais mécaniques et hydriques pour les caractérisations de briques étudiés.

II.5.1 Essai d'absorption d'eau

L'essai permet de déterminer Le coefficient C_b d'absorption d'eau par capillarité des blocs en terre en fonction du temps (au bout de 10min) selon la norme XP P 13-901(**Figure II.14**). L'essai est basé sur le principe d'absorption capillaire entre la brique de terre immergé à 5mm dans un bac d'eau. Pour éviter la perturbation des éprouvettes pendant le pesage, nous avons procédé à l'accrochage des éprouvettes au moyen d'une nacelle directement sur la balance de mesure. La nacelle est munie d'un papier filtre à la base pour et reste immergée à une profondeur de 5mm durant la durée de l'essai (**Figure II.14**).

Le coefficient C_b d'absorption d'eau de chaque bloc est conventionnellement exprimé par la formule(**II.4**) :

$$C_b = \frac{100M}{S\sqrt{t}} = \frac{100(P1-P0)}{S\sqrt{10}} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

M : est la masse d'eau, en grammes, absorbée par le bloc durant l'essai.

S : est la surface de la face immergée, en centimètres carrés.

t : est la durée d'immersion du bloc égale à 10 minutes.

P0 : poids initiale en gramme.

P1 : poids finale en gramme.



Figure II.14: l'essai d'absorption d'eau laboratoire de l'université de Saida.

II.5.2 Essai d'immersion

L'essai consiste à soumettre des échantillons à une immersion totale dans un bac d'eau. Le banc d'essai est présenté sur la **Figure II.15**.



Figure II.15: Essai d'immersion laboratoire de l'université de Saida.

II.5.3 Mesure du module de Young dynamique

Le module de Young dynamique ou module d'élasticité dynamique est la constante qui relie la contrainte et le début de déformation d'un matériau.

Pour mesure cette constante, nous avons utilisé l'appareil Grindo Sonic MK7 (**Figure II.16**).

Le Grindo Sonic est un dispositif permettant de mesurer les propriétés élastiques des matériaux selon une méthode dynamique par une simple excitation (par petit marteau). Sa rapidité et sa simplicité d'utilisation permettent des mesures non destructives pouvant être répétées à volonté sur un même échantillon afin d'observer les variations dans le temps. L'appareil utilise la technique des impulsions d'excitation pour déterminer dynamiquement le module d'élasticité des matériaux.



Figure II.16: Appareil Grindo Sonic MK7 et schéma du principe des mesures laboratoire de l'université de Saida.

Il repose sur l'analyse dynamique des modules (module d'Young) dans le temps ainsi que sur la détection des défauts diffus présents dans les éprouvettes. Elle implique de soumettre une éprouvette à des vibrations, de mesurer sa fréquence de résonance, puis de calculer le module d'élasticité dynamique de l'éprouvette à partir des résultats obtenus (**Figure II.17**).

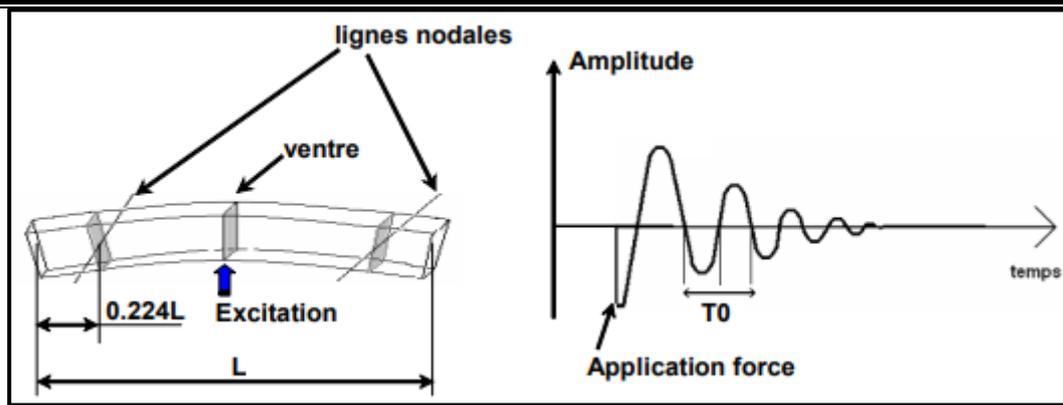


Figure II.17: Principe de la méthode d'excitation par impulsion.

II.5.4 Essai d'écrasement

L'essai de compression simple, également connu sous le nom d'essai de compression uni axiale, est une méthode largement utilisée pour évaluer les propriétés mécaniques des matériaux, notamment leur résistance à la compression. Cet essai est couramment réalisé sur des échantillons de sols, de bétons, de roches et d'autres matériaux de construction. Dans notre étude, nous avons utilisé une presse à béton pour la réalisation de ces essais. La brique de terre, ayant atteint l'âge requis pour l'essai d'écrasement, est disposée sur le plateau avec sa base de 5cm * 5cm, puis est compressée jusqu'à rupture. La force maximale enregistrée correspond à la résistance à la compression à l'état sec (**Figure II.18**). Après l'essai d'absorption et une fois l'éprouvette saturée, cette dernière est également soumise à une compression pour déterminer sa résistance à la compression à l'état humide.



Figure II.18: Banc d'écrasement des éprouvettes.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné trois types de mélanges : l'argile crue de Ben-Adouane, écrêtée à 1 mm, ainsi que son mélange avec 10 % et 20 % de brique rouge concassée, dont le diamètre des particules varie entre 1 mm et 63 μm . En tant que stabilisant, nous avons opté pour l'ajout de chaux à différents pourcentages, entre 4 % et 10 %. Nous avons décrit en détail l'ensemble des essais d'identification, les résultats desquels ont montré que l'argile de Ben-Adouane et les mélanges sélectionnés sont classés parmi les argiles peu plastiques. La méthode de conception des éprouvettes (5 * 5 * 10 cm^3) a été soigneusement exposée, de même que le programme expérimental comprenant des essais mécaniques et hydriques. Les résultats de ces essais seront présentés dans le chapitre suivant.

**CHAPITRE III : ETUDE
EXPERIMENTALE ET RESULTATS**

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats de l'étude expérimentale réalisée. Il s'agit des résultats des essais physiques, hydriques et mécaniques obtenus sur les trois mélanges étudiés : argile + chaux (Ar+Ch(%)), argile + 10% de brique rouge concassée + chaux (Ar + Br (10%) + Ch (%)), et argile + 20% de brique rouge concassée + chaux (Ar + Br (20%) + Ch (%)). Le pourcentage de chaux varie entre 0% et 10%. Les mélanges sont réalisés par addition et non par substitution.

Les essais physiques incluent l'identification macroscopique de l'effet de l'ajout de brique concassée et de chaux sur les paramètres physiques de l'argile de Ben-Adouane, notamment les limites d'Atterberg et les caractéristiques de compactage selon l'essai Proctor modifié. Les essais hydriques se concentrent sur le suivi des variations volumiques des briques au cours des différentes périodes de cure (immédiatement après confection, à 3, 7, 14, et 28 jours), les essais d'immersion ou de durabilité à l'eau, ainsi que les essais d'absorption capillaire.

Les essais mécaniques incluent des tests de compression simple à l'état sec et à l'état humide (après saturation post-cure), ainsi que des essais de mesure des caractéristiques élastiques, en particulier le module de Young. Le chapitre se conclura par une synthèse des résultats obtenus, mettant en lumière les principaux enseignements de cette étude expérimentale.

III.2 Influence des ajouts sur les paramètres physiques des mélanges

III.2.1 Pourcentage minimale de chaux

Pour optimiser le dosage en chaux, nous avons réalisé des essais pour déterminer le point de saturation en chaux, conformément à la norme ASTM D6276 (similaire à l'essai de mesure du pH du sol, voir paragraphe II.3.1.6). Cet essai permet de déterminer la quantité optimale de chaux nécessaire pour stabiliser les mélanges d'argile. Les pourcentages de chaux choisis pour ces essais sont 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, et 10%. Le protocole consiste à mélanger 25 g d'argile avec 100 ml d'eau déminéralisée, en malaxant bien pour assurer une répartition homogène. Un test supplémentaire a été effectué sur une quantité de chaux seule pour déterminer le seuil maximal à atteindre lors de la saturation.

Les résultats montrent un seuil basique de $pH=12,65$ pour la chaux seule (**Figure III. 1**). L'ajout de 2% de chaux affecte considérablement le pH du sol, passant de 7,91 à 12,54. Une légère augmentation du pourcentage de chaux à 4% permet de s'approcher du palier maximal. Au-delà de 8%, le palier est atteint, indiquant une saturation optimale de l'argile par la chaux.

Ainsi, dans notre étude, nous avons considéré les points de 4%, 6%, 8%, et 10% pour les pourcentages de stabilisation, en excluant 2% de la liste de choix.

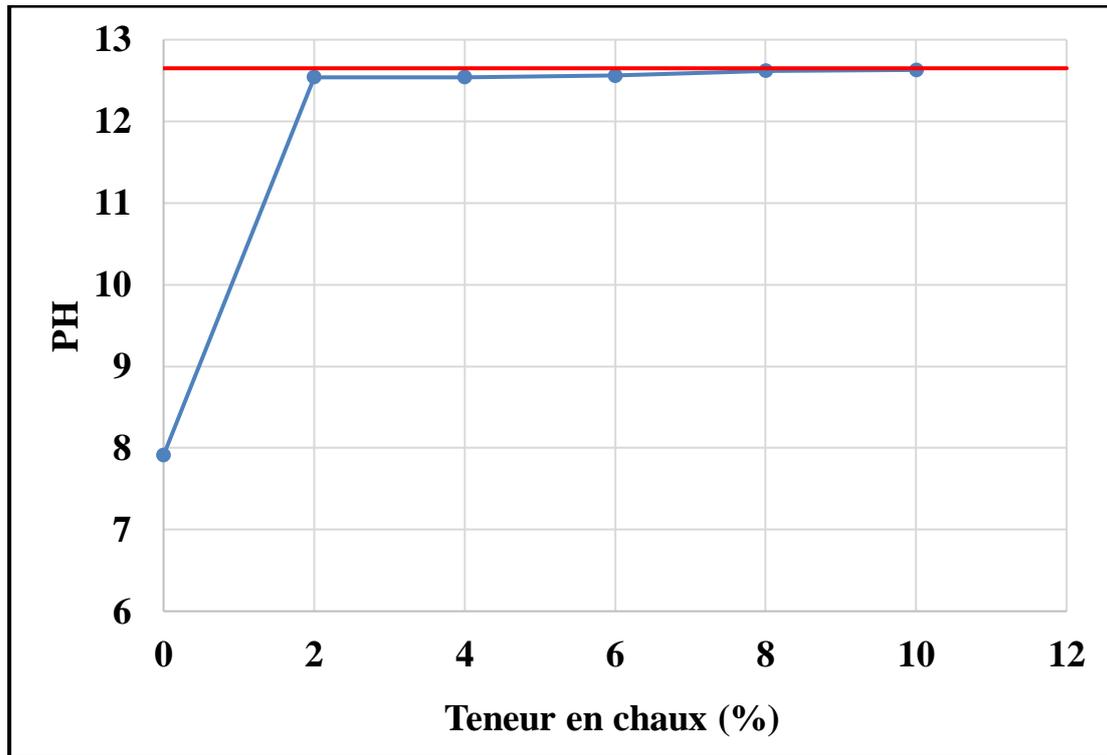


Figure III. 1: variation du PH du mélange de l'argile de Ben Adouane et la chaux (Ar + Ch (%)).

III.2.2 Effet sur les limites d'Atterberg

Pour les différents mélanges étudiés, nous avons mesuré les variations des limites d'Atterberg pour chaque cas. Les figures (Figure III. 2, Figure III. 3 et Figure III. 4) présentent la variation de la limite de liquidité, de la limite de plasticité et de l'indice de plasticité en fonction du pourcentage de chaux ajouté.

Pour le mélange d'argile avec différents pourcentages de chaux, on constate les points suivants:

- Limite de liquidité (WL) : Une augmentation progressive est observée avec l'ajout de chaux, passant de 46,48% à 48,99% à 10% de chaux, soit une augmentation de 5,40%.
- Limite de plasticité (WP) : La valeur de WP augmente également avec l'ajout de chaux, allant de 22,04% à 29,33% à 10% de chaux, soit une augmentation de 33,10%.
- Indice de plasticité (IP) : L'indice de plasticité diminue progressivement avec l'ajout de chaux, passant de 24,44% à 19,66%, soit une diminution de 19,54%.

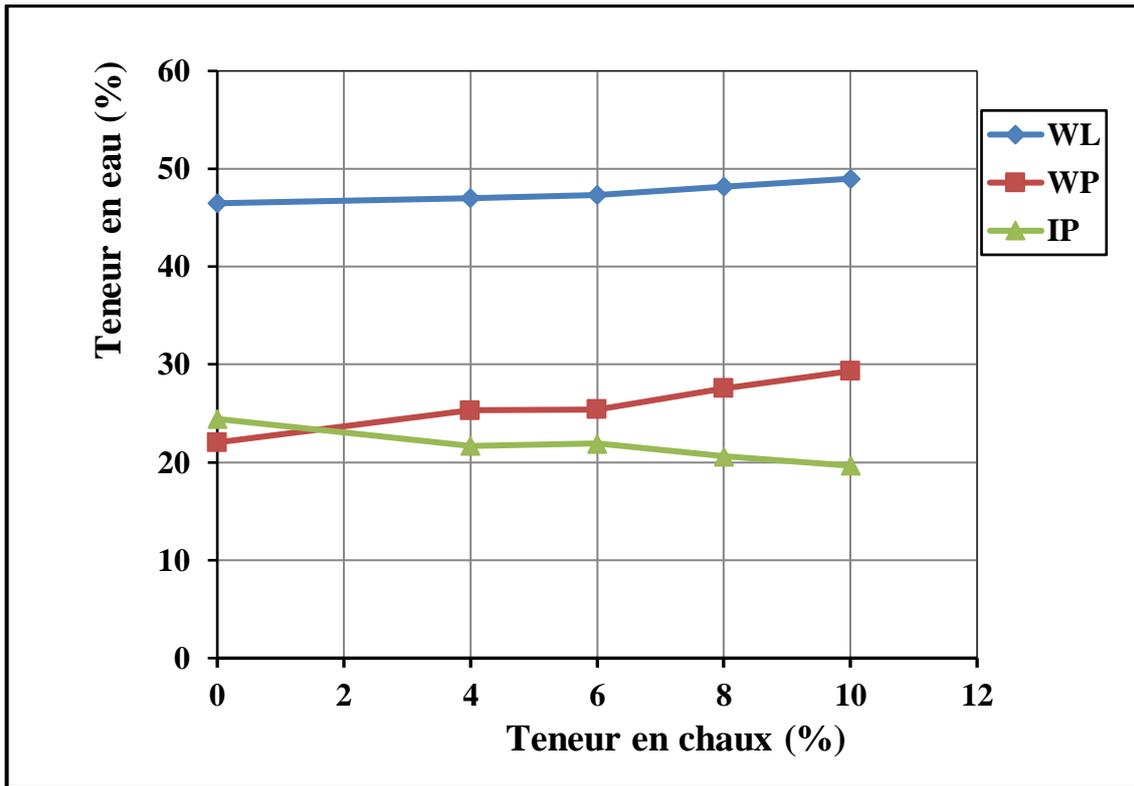


Figure III. 2: variation de la limite d'Atterberg du l'argile de Ben Adouane et la chaux (Ar + Ch (%)).

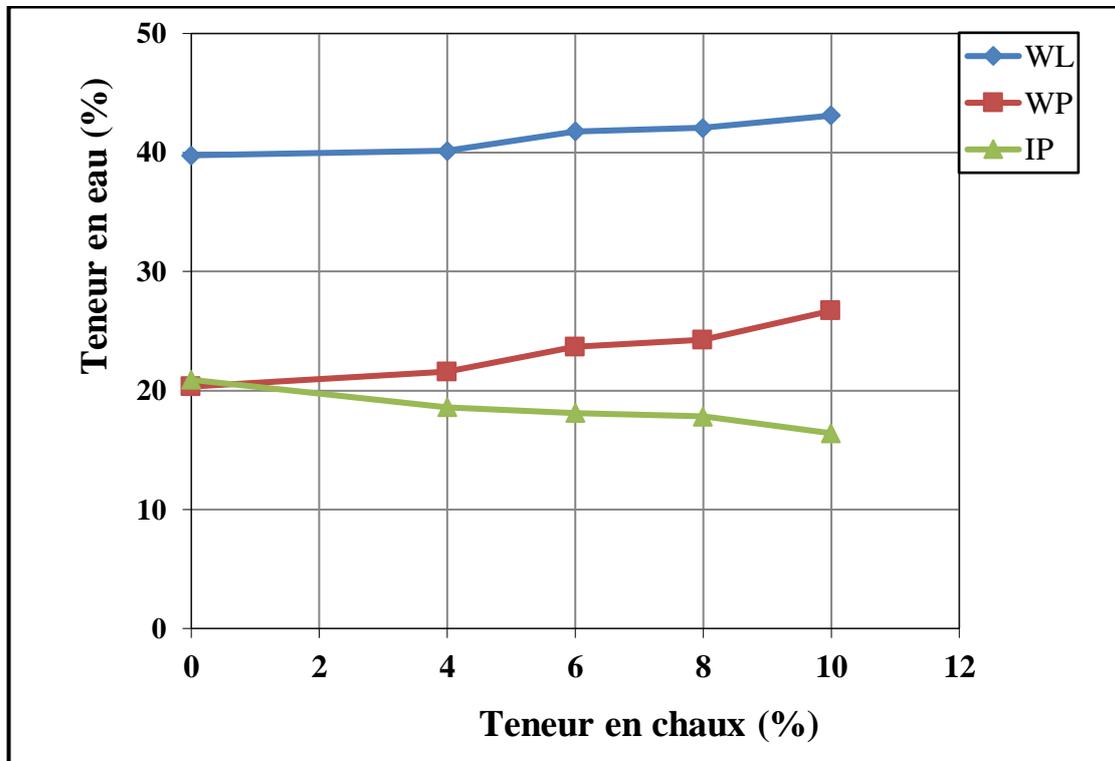


Figure III. 3: variation de la limite d'Atterberg du l'argile avec 10% de la brique rouge concassée et la chaux (Ar +Br (10%) + Ch (%)) .

Pour le mélange d'argile avec 10% de brique rouge concassée et différents pourcentages de chaux :

- Limite de liquidité (WL) : Une augmentation progressive est observée, passant de 39,765% à 43,105% à 10% de chaux, soit une augmentation de 8,40%.
- Limite de plasticité (WP) : La valeur de WP augmente également, passant de 20,33% à 26,7%, soit une augmentation de 31,38%.
- Indice de plasticité (IP) : L'indice de plasticité diminue progressivement, passant de 20,9% à 16,405%, soit une diminution de 21,48%.

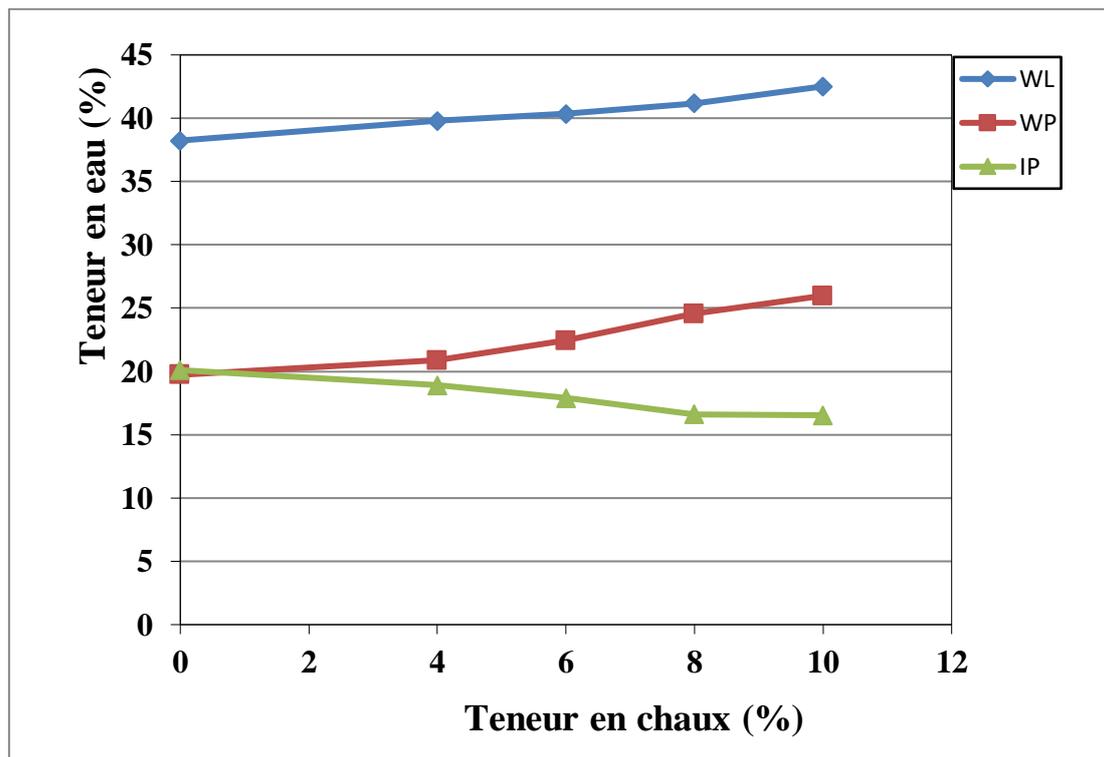


Figure III. 4: variation de la limite d'Atterberg du l'argile avec 20% de la brique rouge concassée et la chaux (Ar +Br (20%) + Ch (%)).

En ce qui concerne le mélange d'argile avec 20% de brique rouge concassée et différents pourcentages de chaux :

- Limite de liquidité (WL) : Une augmentation progressive est observée, passant de 38,235% à 42,515% à 10% de chaux, soit une augmentation de 11,19%.
- Limite de plasticité (WP) : La valeur de WP augmente également, passant de 19,73% à 25,98%, soit une augmentation de 31,67%.
- Indice de plasticité (IP) : L'indice de plasticité diminue progressivement, passant de 20,1% à 16,54%, soit une diminution de 17,71%.

D'une manière générale, l'ajout de chaux a des effets significatifs sur les limites d'Atterberg des mélanges qui se traduit par une augmentation de la limite de liquidité et une réduction de la plasticité des mélanges. Ces résultats sont en accord avec d'autres de la littérature (Fediex, 2009). Le processus est schématisé sur la **figure III. 5** : la partie supérieure du schéma présente le comportement du sol sans l'ajout de chaux, la partie inférieure reprend les effets d'un traitement sur l'évolution des limites d'Atterberg.

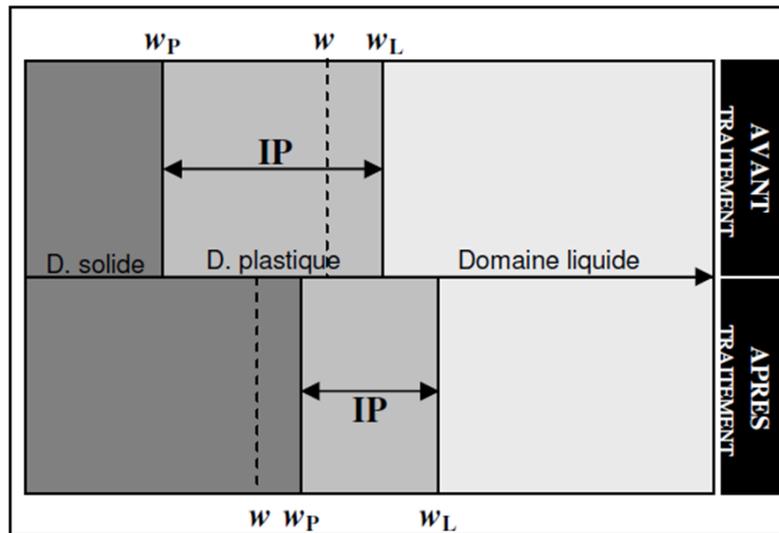


Figure III. 5 : Modification des limites d'Atterberg d'un sol après traitement à la chaux(Fediex 2009).

En comparant les résultats des mélanges avec 0%, 10%, et 20% de brique rouge concassée, nous observons que l'ajout de brique rouge concassée semble modérer l'augmentation des valeurs de WL et WP due à l'ajout de chaux, tout en réduisant davantage la plasticité du matériau.

III.2.3 Effet des ajouts sur les paramètres de compactage

Pour les différents mélanges étudiés, nous avons également mesuré les variations des paramètres de compactage, notamment le poids volumique sec et la teneur en eau optimale. Les figures ci-après (**Figure III. 6**, **Figure III. 7** et **Figure III. 8**) illustrent comment ces paramètres évoluent en fonction des différents pourcentages de chaux ajoutés. L'objectif est de comprendre l'impact des ajouts de chaux et de brique rouge concassée sur la densité et l'aptitude au compactage des mélanges d'argile

Pour le mélange d'argile avec différents pourcentages de chaux, une diminution progressive est observée avec l'ajout de chaux, passant de 2.04 g/cm^3 à 1.95 g/cm^3 à 10% de chaux, soit une diminution de 4,41%. Aussi, pour la teneur en eau optimale de compactage, une

augmentation progressive est observée avec l'ajout de chaux, passant de 11.5% à 14.3% à 10% de chaux, soit une augmentation de 24,35%.

Pour le mélange d'argile avec différents pourcentages de chaux, une diminution progressive est observée avec l'ajout de chaux, passant de 2.04 g/cm³ à 1.95 g/cm³ à 10% de chaux, soit une diminution de 4,41%. Aussi, pour la teneur en eau optimale de compactage, une augmentation progressive est observée avec l'ajout de chaux, passant de 11.5% à 14.3% à 10% de chaux, soit une augmentation de 24,35%.

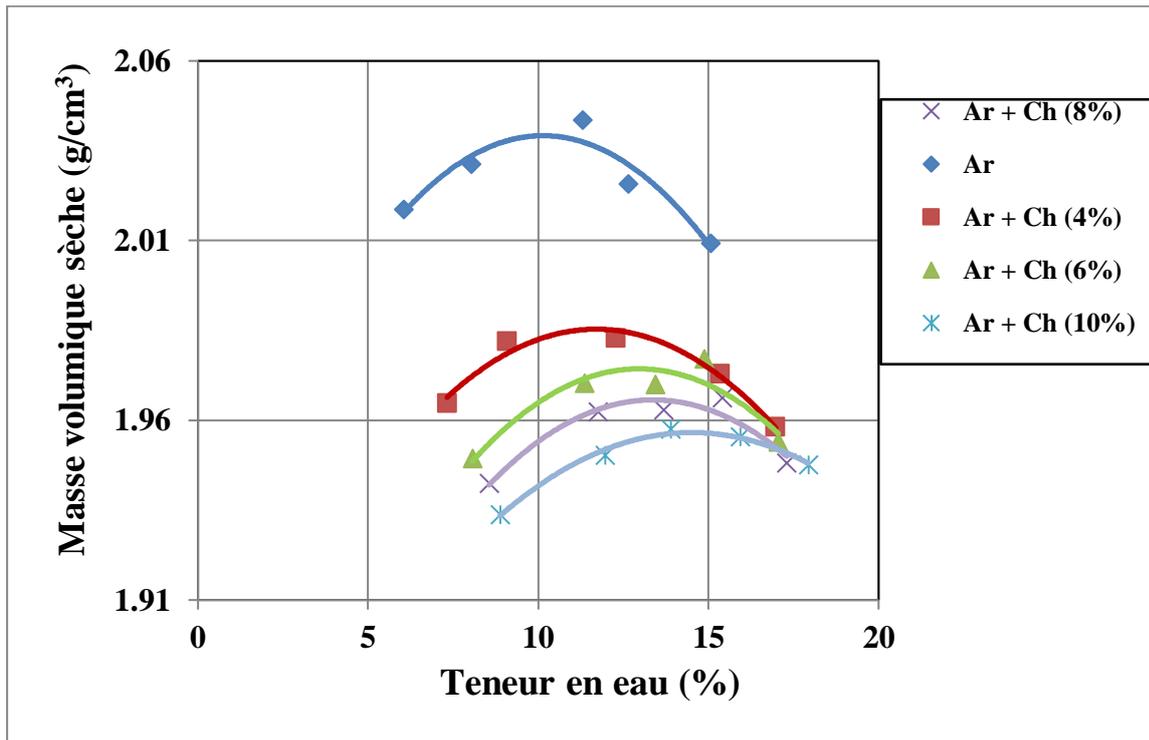


Figure III. 6: courbes de compactage de l'argile de Ben Adouane et la chaux (Ar +Ch(%)).

Pour le mélange d'argile avec 10% de brique rouge concassée et différents pourcentages de chaux, l'ajout de 10% de brique rouge concassée modère l'effet de la chaux sur la masse volumique sèche, mais l'augmentation de la teneur en eau optimale reste significative. Cette remarque est aussi valable pour le mélange d'argile avec 20% de brique rouge concassée et différents pourcentages de chaux. Une diminution respective en masse volumique sèche et teneur en eau de 1.86% et 9.38% pour un pourcentage de chaux passant de 0% à 10%.

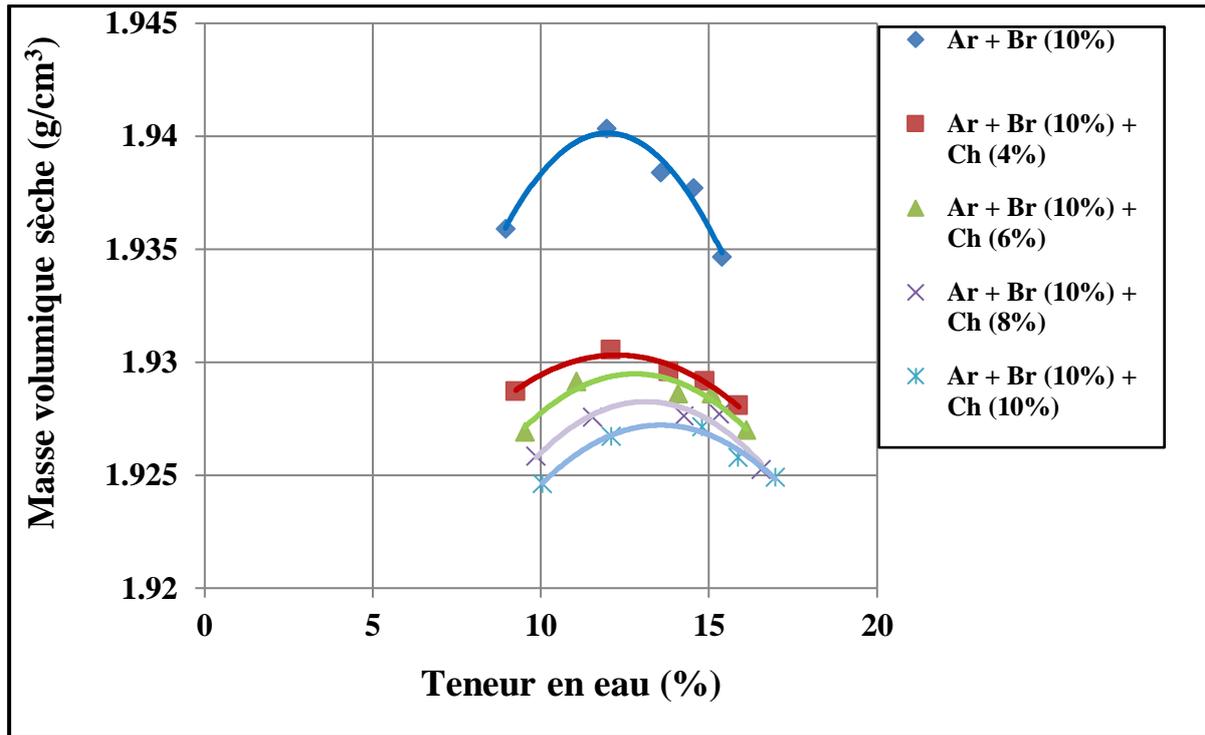


Figure III. 7: courbes de compactage du l'argile avec 10% de la brique rouge concassée et la chaux (Ar +Br (10%) + Ch (%)).

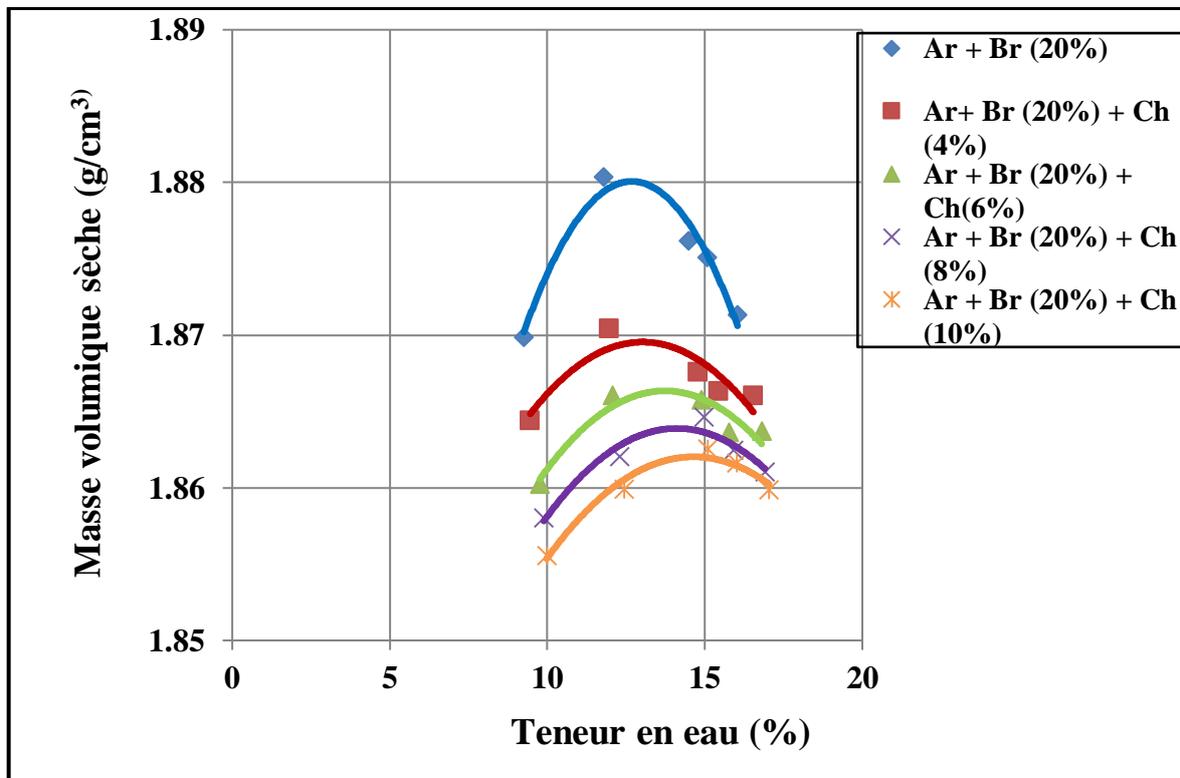


Figure III. 8: courbes de compactage du l'argile avec 20% de la brique rouge concassée et la chaux (Ar +Br (20%) + Ch (%)).

Ces résultats montrent que l'ajout de chaux diminue la densité apparente maximale et augmente la teneur en eau optimale. La chaux modifie la structure du sol, augmentant sa porosité et sa capacité à retenir l'eau, ce qui réduit la densité maximale atteignable par compactage. Selon le modèle de Cabane, 2004, ceci est due au phénomène de floculation des argiles. Ce réarrangement des particules du sol fait place à un ensemble d'agrégats ou grumeaux. Le compactage permet l'agglomération des grumeaux, liés avec la chaux, laissant entre eux une porosité, diminuant ainsi la densité sèche et nécessitant une quantité supplémentaire d'eau pour atteindre l'optimum.

En ce qui concerne l'ajout de brique concassée, il semble que cette dernière modère les effets de la chaux sur la masse volumique sèche et la teneur en eau optimale. L'augmentation du pourcentage de brique concassée, réduit d'avantage la valeur de la densité sèche maximale et augmente la teneur en eau optimale.

Remarque

Pour la confection des briques de terre nous avons choisi d'opter pour les caractéristiques de compactage à l'optimum Proctor modifié de l'argile seule. Ces caractéristiques se résument à une densité sèche maximale de 2.04 et une teneur en eau optimale de 11.5%. Ce choix est justifié par les points suivants :

- L'argile seule présente des caractéristiques de compactage en terme de densité sèche la plus élevée, ce qui permet d'offrir une meilleure résistance pour l'ensemble des mélanges et une porosité plus faible.
- La teneur en eau optimale reste proche des autres valeurs des autres mélanges.

III.3 Comportement hydrique

III.3.1 Variations volumiques:

L'étude des variations volumiques des briques confectionnées avec des mélanges d'argile avec différents pourcentages de chaux et de brique rouge concassée a permis de dégager plusieurs tendances quant à l'effet du temps de cure, du pourcentage de chaux, et du pourcentage de brique concassée. Les résultats obtenus sont donnés sur les figures : (**Figure III. 9, Figure III. 10 et Figure III. 11**)

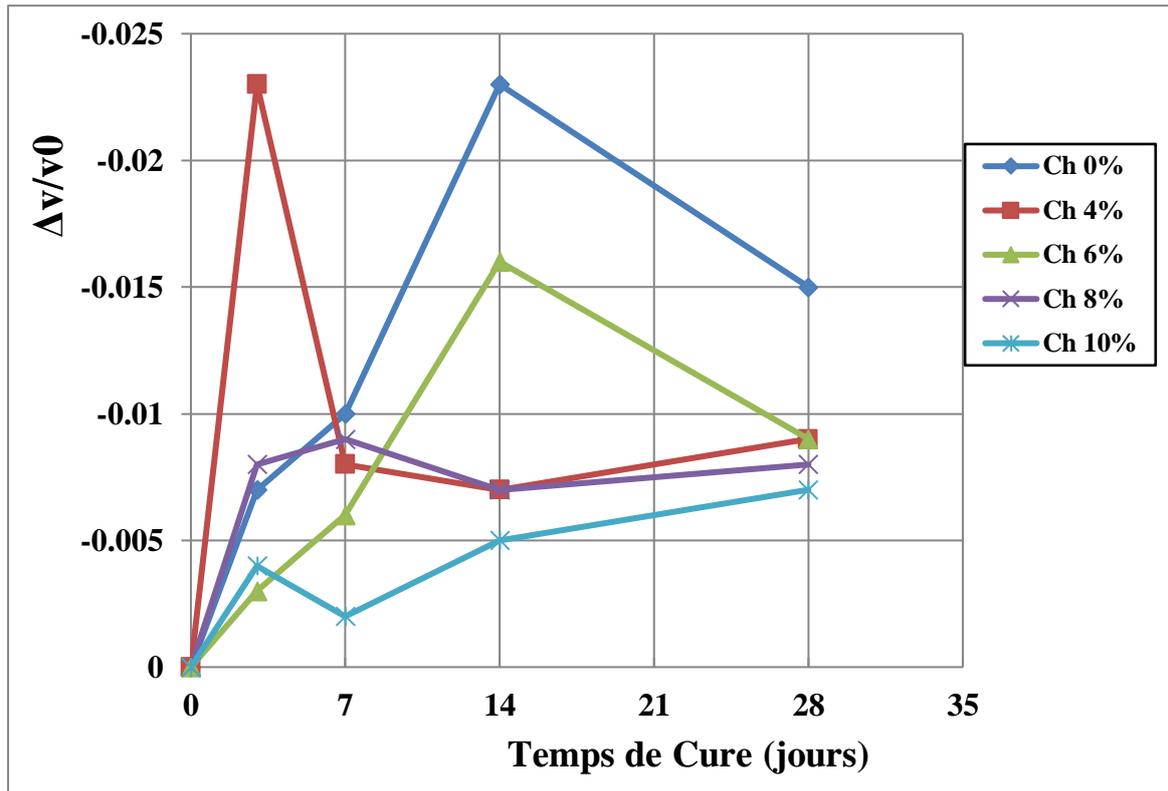


Figure III. 9: variation du volume de la brique confectionnée avec le mélange argile et la chaux (Ar+Ch(%)).

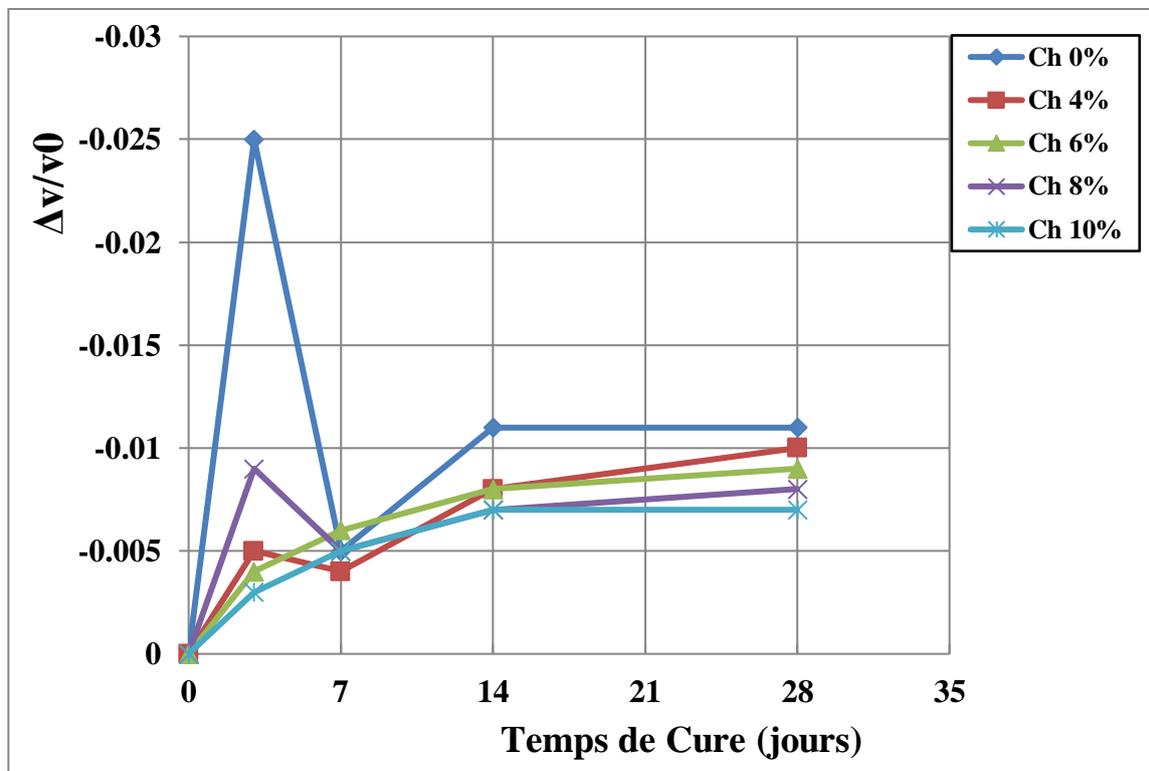


Figure III. 10: variation du volume de la brique confectionnée avec le mélange argile avec 10% de la brique rouge concassée et la chaux (Ar + Br (10%) +Ch(%)).

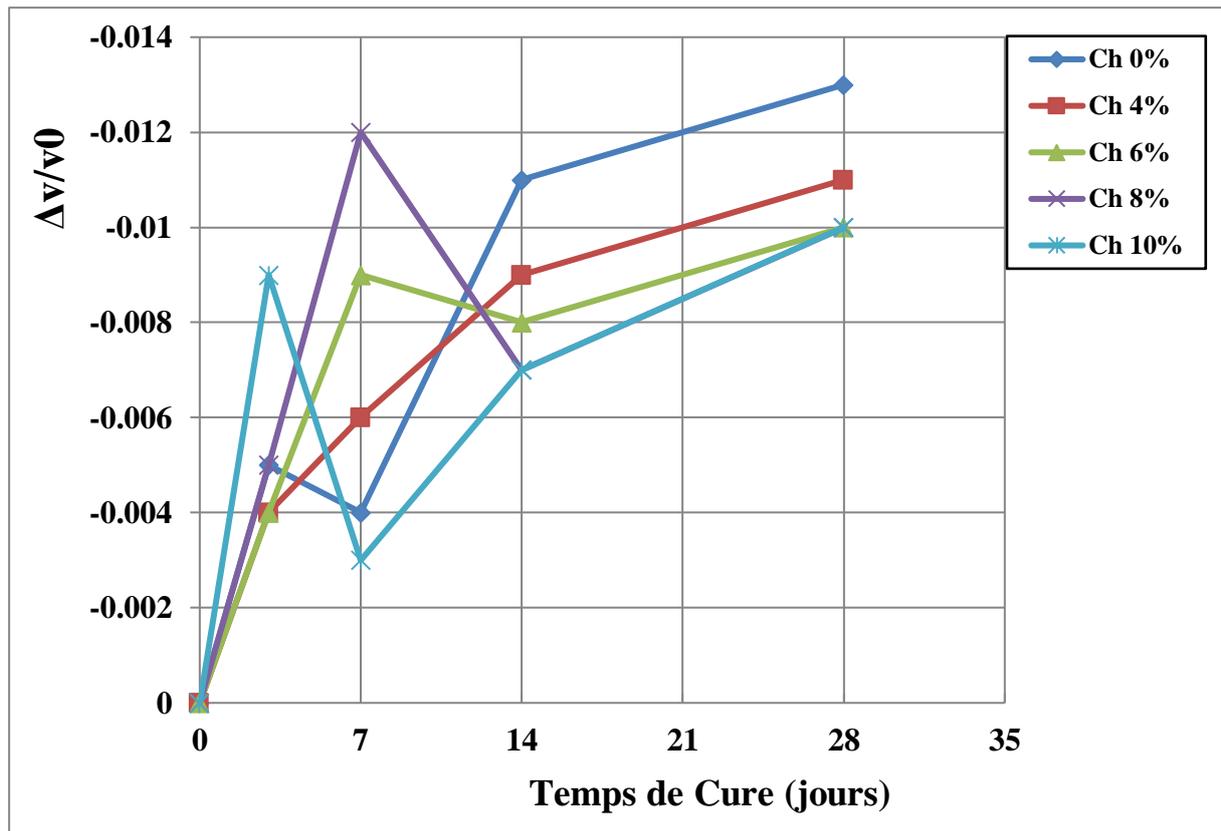


Figure III. 2: variation du volume de la brique confectionnée avec le mélange argile avec 20% de la brique rouge concassée et la chaux (Ar + Br (20%) +Ch(%)).

En considérant les tendances générales et en excluant certaines fluctuations causées par des erreurs de mesure ou des variations de conditions de température et d'humidité au laboratoire, on peut résumer les observations comme suit :

- Les résultats montrent que le retrait volumique est plus prononcé dans les premiers jours après la fabrication des briques, suivi d'une stabilisation progressive. Pour le mélange d'argile avec différents pourcentages de chaux, le retrait initial au cours des 3 premiers jours est maximal, suivi d'une tendance à la stabilisation du retrait. Ce phénomène est similaire pour les mélanges contenant 10% et 20% de brique rouge concassée.
- Le retrait initial est maximal sans chaux et minimal avec des pourcentages plus élevés de chaux. La stabilisation des déformations est généralement marquée après 14 jours de cure.
- L'ajout de brique rouge concassée, pour un même pourcentage de chaux, tend à réduire le retrait initial des échantillons et à stabiliser leur volume plus rapidement. Cet effet est particulièrement notable dans les premiers jours de cure. Les mélanges avec 10% de brique concassée montrent généralement une meilleure stabilité dimensionnelle comparée à ceux avec 0% ou 20% de brique concassée.

III.3.2 Essai d'absorption d'eau :

Les résultats d'absorption d'eau sont donnés par les figures (Figure III. 3, Figure III. 13, Figure III. 14, Figure III. 15 et Figure III. 16). Pour chaque mélange, nous analysons les résultats d'absorption d'eau caractérisés par le coefficient d'absorption d'eau « Cb » à différents temps de cure (immédiat, 3 jours, 7 jours, 14 jours, et 28 jours).

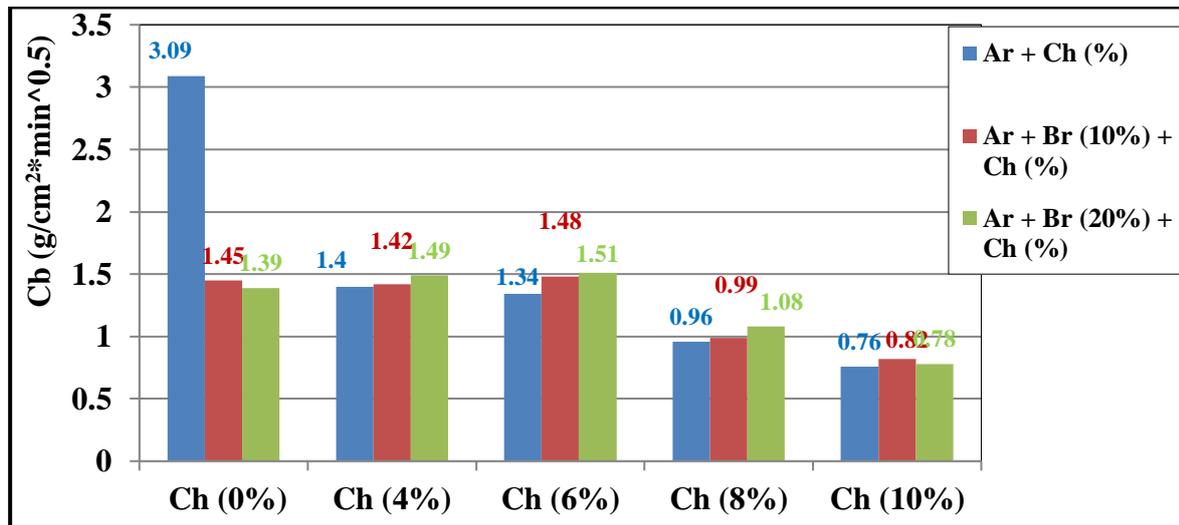


Figure III. 4: variation du coefficient Cb des éprouvettes après confection (immédiate).

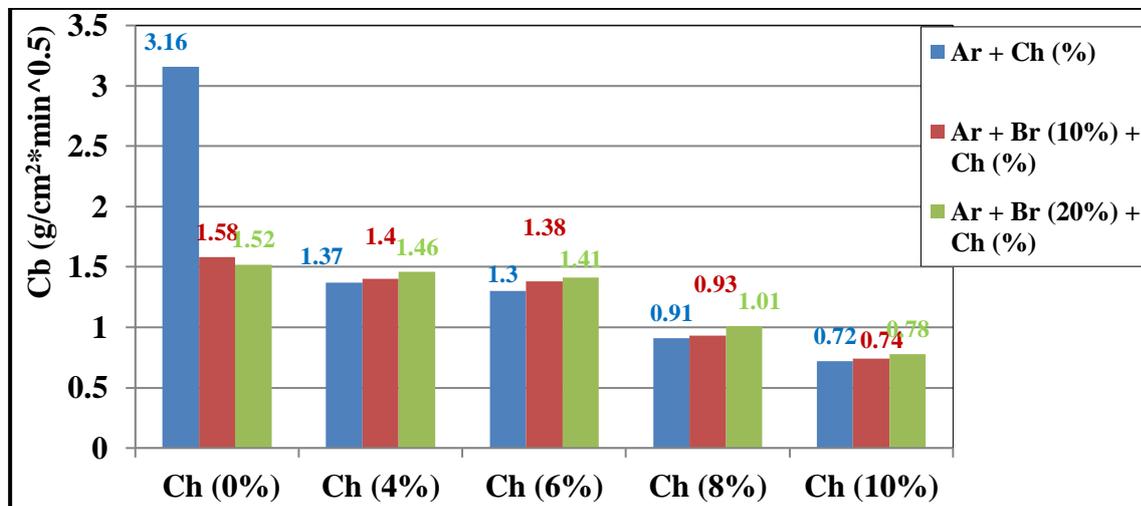


Figure III. 5: variation du coefficient Cb des éprouvettes à l'âge de 3 jours de cure.

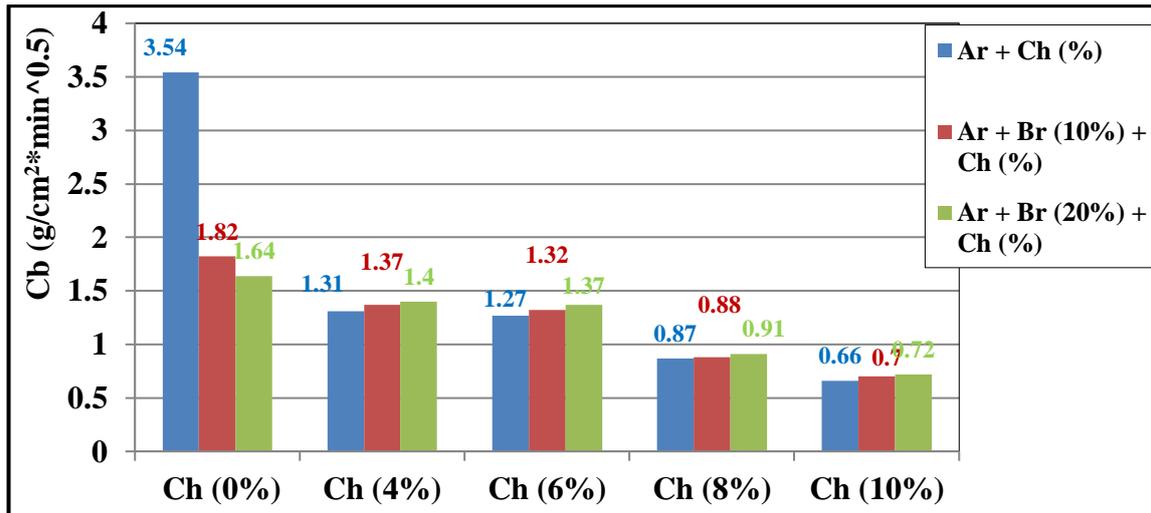


Figure III. 6: variation du coefficient Cb des éprouvettes des à l'âge de 7 jours de cure.

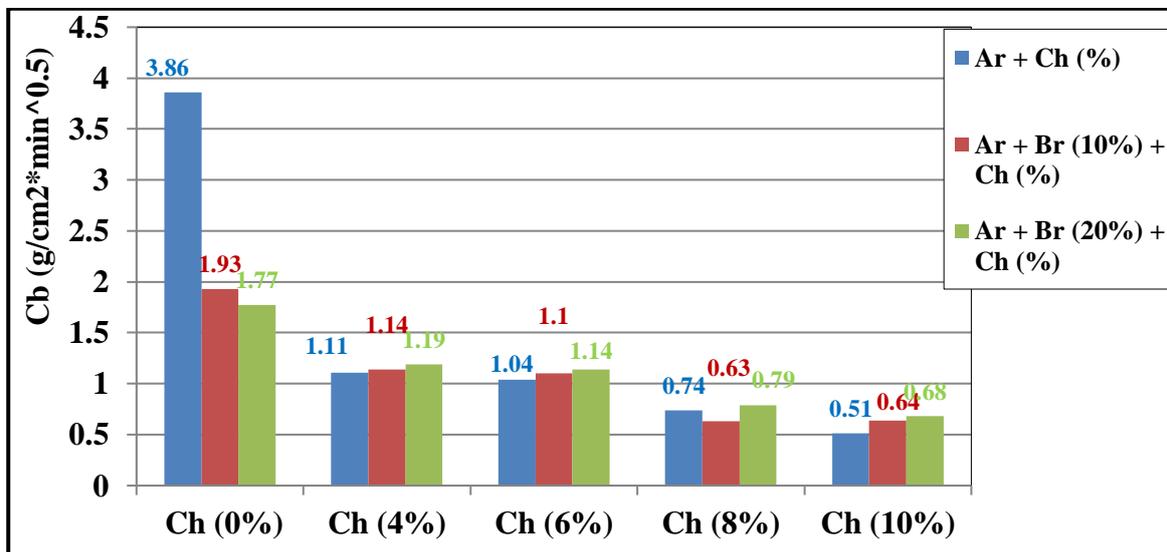


Figure III. 7: variation du coefficient Cb des éprouvettes à l'âge de 14 jours de cure.

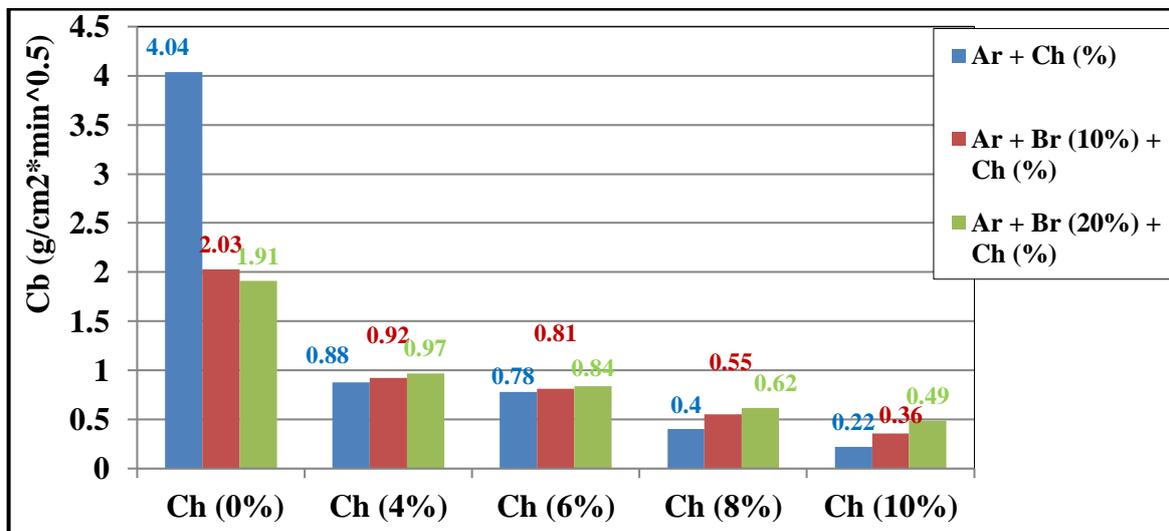


Figure III. 16: variation du coefficient Cb des éprouvettes à l'âge de 28 jours de cure.

Les résultats obtenus, indiquent les constatations suivantes :

Le coefficient d'absorption d'eau (C_b) augmente avec le temps de cure pour tous les mélanges sans chaux. Ce résultat est logique, étant donné que le processus de cure, dans les conditions de laboratoire, induit une diminution de la teneur en eau des éprouvettes. Cette diminution conduit naturellement à une augmentation de leur potentiel hydrique (suction). En conséquence, lorsque les échantillons sont mis en contact avec de l'eau, ils présentent une meilleure capacité d'absorption capillaire. Cette amélioration conduit à une augmentation du coefficient d'absorption d'eau (C_b), reflétant une réponse naturelle des matériaux séchant et durcissant au fil du temps.

À chaque temps de cure, l'augmentation du pourcentage de chaux réduit la valeur du « C_b ». Cette diminution atteint les valeurs les plus bas à un pourcentage de chaux de 10% pour l'ensemble des mélanges. Pour le Mélange 1 (Argile + Chaux), dès le départ, le C_b est réduit de 75.41%, et cette réduction devient encore plus marquée après 3 jours (77.22%), 7 jours (81.36%), 14 jours (86.78%), et atteint son maximum après 28 jours avec une diminution de 94.55%. Pour le Mélange 2 (Argile + 10% de Brique Rouge Concassée + Chaux), le C_b est réduit de 43.45% immédiatement, puis de 53.16% après 3 jours, 61.54% après 7 jours, 66.84% après 14 jours, et atteint 82.27% de réduction après 28 jours. Pour le Mélange 3 (Argile + 20% de Brique Rouge Concassée + Chaux), le C_b est initialement réduit de 43.88%, suivi de réductions de 48.68% après 3 jours, 56.10% après 7 jours, 61.58% après 14 jours, et atteint une réduction maximale de 74.35% après 28 jours.

Les résultats mettent aussi en évidence que l'incorporation de brique concassée tend à réduire le coefficient d'absorption d'eau (C_b) dans la plupart des cas. En comparant les mélanges avec et sans brique, une réduction significative du C_b est observée, surtout avec des pourcentages de chaux plus élevés et une augmentation du temps de cure. Par exemple, dans le mélange 1 (Argile + Chaux), le C_b est réduit de 75.41% dès le départ avec 10% de chaux, atteignant une baisse maximale de 94.55% après 28 jours de cure. De manière similaire, dans le mélange 2, le C_b diminue de 43.45% initialement avec 10% de chaux, pour atteindre une réduction de 82.27% après 28 jours. Pour le mélange 3, une réduction significative est également constatée, avec une baisse du C_b de 43.88% dès le départ avec 10% de chaux, et une diminution maximale de 74.35% après 28 jours. Ces résultats suggèrent que l'incorporation de 10% de brique induit une diminution optimale du C_b .

III.3.3 Essai d'immersion

Pour évaluer la résistance des briques à l'eau, nous avons effectué un essai d'immersion, visant à tester leur tenue en conditions de saturation prolongée. Cet essai consiste à immerger les briques dans l'eau pendant des périodes prolongées afin de simuler des conditions d'exposition à l'humidité ou d'inondation. Les résultats montrent que tous les mélanges contenant de la chaux, à divers pourcentages, montrent une excellente résistance à l'eau (**Figure III. 17a**). En revanche, les briques en argile seule se dégradent en quelques minutes à quelques heures (**Figure III. 17b**).



Figure III. 17: essai d'immersion : a) mélanges avec la chaux b) argile crue.

III.4 Comportement mécanique

Pour évaluer les propriétés mécaniques des briques fabriquées, nous avons réalisé des essais de compression simple dans deux états distincts: sec et humide. En parallèle, l'utilisation de l'appareil Grindo Sonic nous a permis de mesurer le module de Young dynamique. Ceci nous a permis d'évaluer la réponse élastique des mélanges étudiés et leur ductilité.

III.4.1 Résistance à la compression sèche :

Les résultats d'écrasement des briques après un temps de cure bien déterminé nous ont permis de mesurer la résistance à la compression (R_c) sèche, des différents mélanges étudiés. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures (**Figure III. 18, Figure III. 19, Figure III. 20, Figure III. 21 et Figure III. 22**). Nous avons opté pour une représentation sous forme d'histogramme afin de faciliter la comparaison entre les différents mélanges.

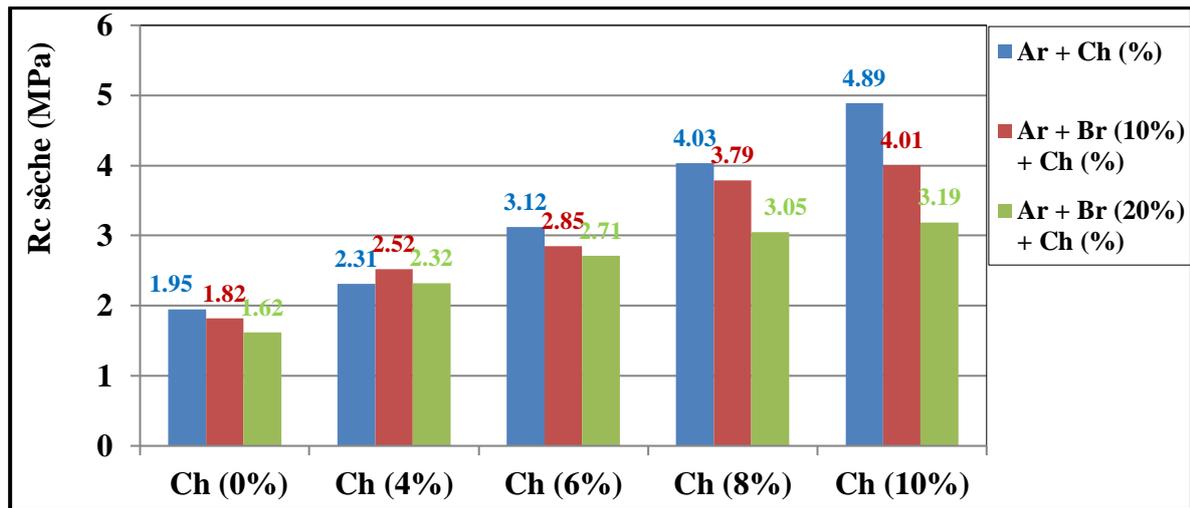


Figure III. 18: variation de Rc sèche des éprouvettes après confection (immédiate).

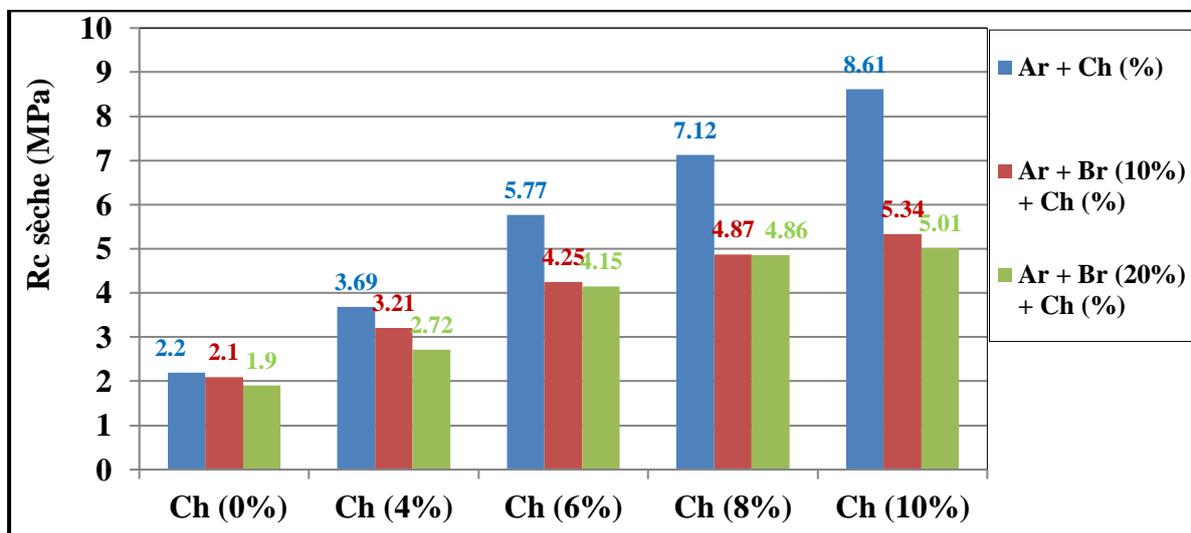


Figure III. 19: variation de Rc sèche des éprouvettes à l'âge de 3 jours de cure.

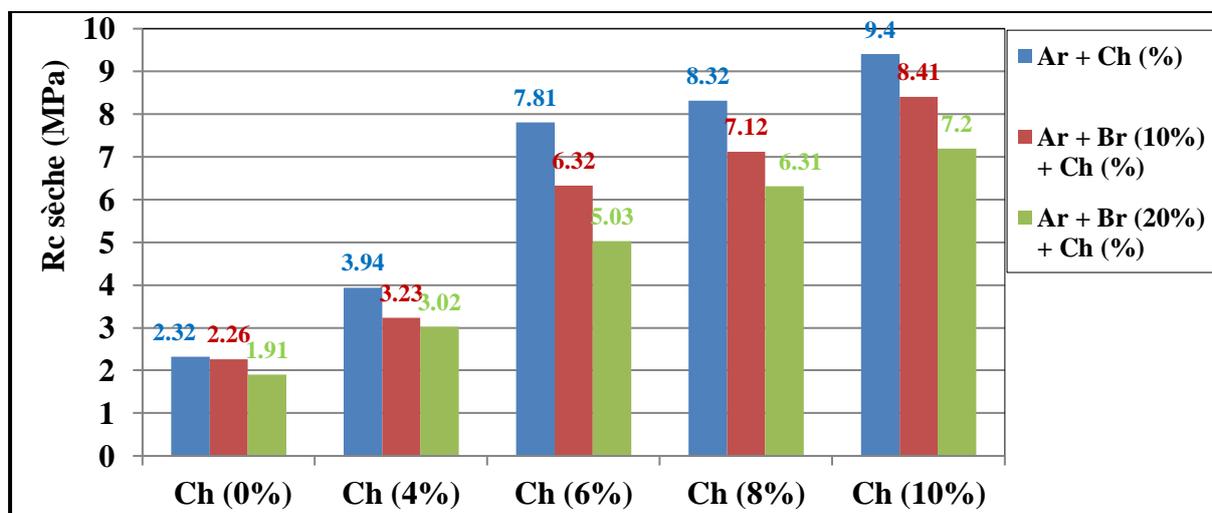


Figure III. 20: variation de Rc sèche des éprouvettes à l'âge de 7 jours de cure.

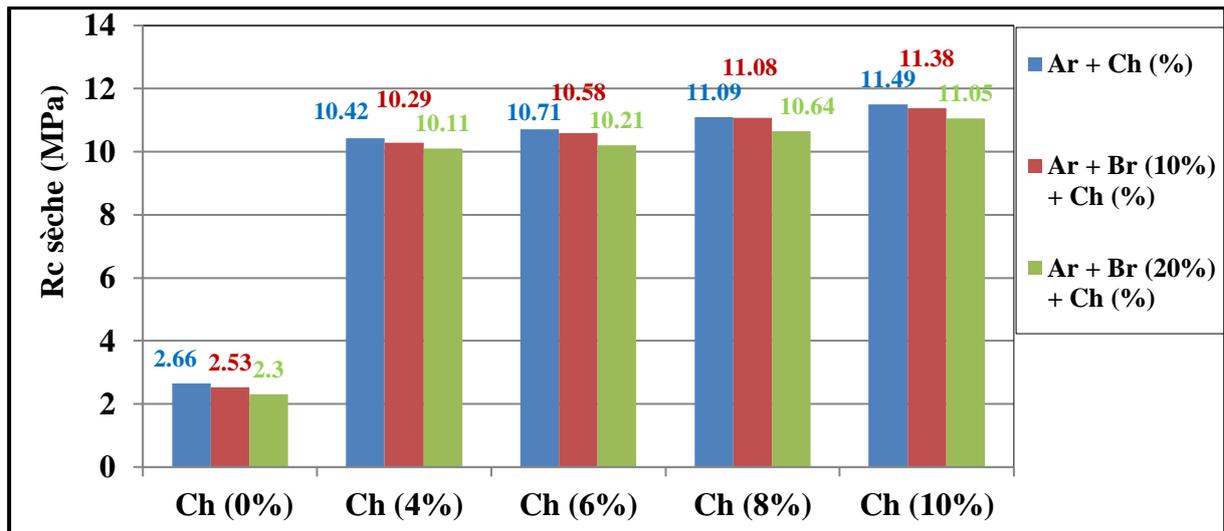


Figure III. 8: variation de Rc sèche des éprouvettes à l'âge de 14 jours de cure.

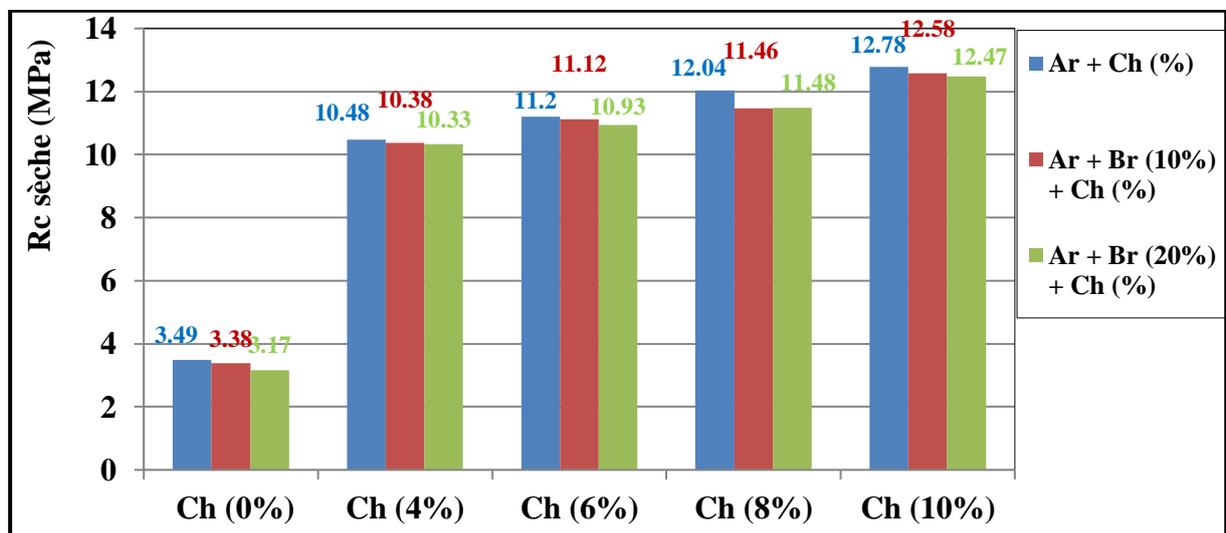


Figure III. 9: variation de RC sèche des éprouvettes à l'âge de 28 jours de cure.

Les résultats montrent que l'ajout de brique concassée affecte la résistance à la compression sèche (Rc) des mélanges d'argile et de chaux de manière significative. Immédiatement après la fabrication, le mélange d'argile seul (Ar) affiche une Rc de 1,95 MPa, tandis que l'incorporation de 10% de brique rouge concassée diminue cette valeur à 1,82 MPa et à 1,62 MPa avec 20% de brique.

Avec l'augmentation du pourcentage de chaux, on observe généralement une amélioration de la résistance à la compression sèche (Rc). Par exemple, à 10% de chaux, la Rc passe de 1,95 MPa pour l'argile seule à 4,89 MPa, ce qui indique un renforcement significatif dû à la réaction de la chaux avec les composants du mélange. Cependant, même avec l'ajout de chaux, l'effet de la brique concassée persiste, bien que dans une moindre mesure à des pourcentages plus élevés de chaux.

À 7 jours de cure, les résultats de la résistance à la compression sèche (R_c) montrent une évolution significative par rapport aux mesures immédiates. Pour le mélange d'argile seule (Ar), la R_c augmente de 1,95 MPa immédiatement après la fabrication à 2,32 MPa après 7 jours. Cette amélioration est observée également dans les mélanges avec ajout de brique concassée : par exemple, à 10% de brique, la R_c passe de 1,82 MPa à 2,26 MPa après 7 jours, et à 20% de brique, elle passe de 1,62 MPa à 1,91 MPa sur la même période.

L'effet de la chaux devient plus prononcé à 7 jours, où l'augmentation de la R_c est notable, en particulier aux pourcentages plus élevés de chaux. Par exemple, à 10% de chaux, la R_c atteint 9,4 MPa pour le mélange d'argile seule, montrant une amélioration significative par rapport aux 4,89 MPa immédiatement après la fabrication. Cette augmentation est également observée dans les mélanges avec ajout de brique, où la R_c passe à 8,41 MPa avec 10% de chaux et 7,2 MPa avec 20% de brique après 7 jours.

À 28 jours de cure, les mesures de résistance à la compression sèche (R_c) montrent une augmentation significative par rapport aux résultats à 7 jours. Pour le mélange d'argile seule (Ar), la R_c passe de 2,32 MPa à 3,49 MPa après 28 jours, marquant une amélioration continue de ses propriétés mécaniques. Dans les mélanges avec ajout de 10% de brique concassée, la R_c augmente de 2,26 MPa à 3,38 MPa, et à 20% de brique, elle passe de 1,91 MPa à 3,17 MPa sur la même période.

L'effet de la chaux devient encore plus prononcé à 28 jours, où l'augmentation de la R_c est notable, surtout aux pourcentages de chaux plus élevés. Par exemple, à 10% de chaux, la R_c atteint 12,78 MPa pour le mélange d'argile seule, montrant une amélioration significative par rapport aux 9,4 MPa à 7 jours. Cette tendance à l'amélioration est également observée dans les mélanges avec ajout de brique, où la R_c passe à 12,58 MPa avec 10% de chaux et à 12,47 MPa avec 20% de brique après 28 jours.

III.4.2 Résistance à la compression humide :

Les résultats de la résistance à la compression (R_c) humide sont données sur les figures : (**Figure III. 23, Figure III. 24, Figure III. 25, Figure III. 26 et Figure III. 27**)

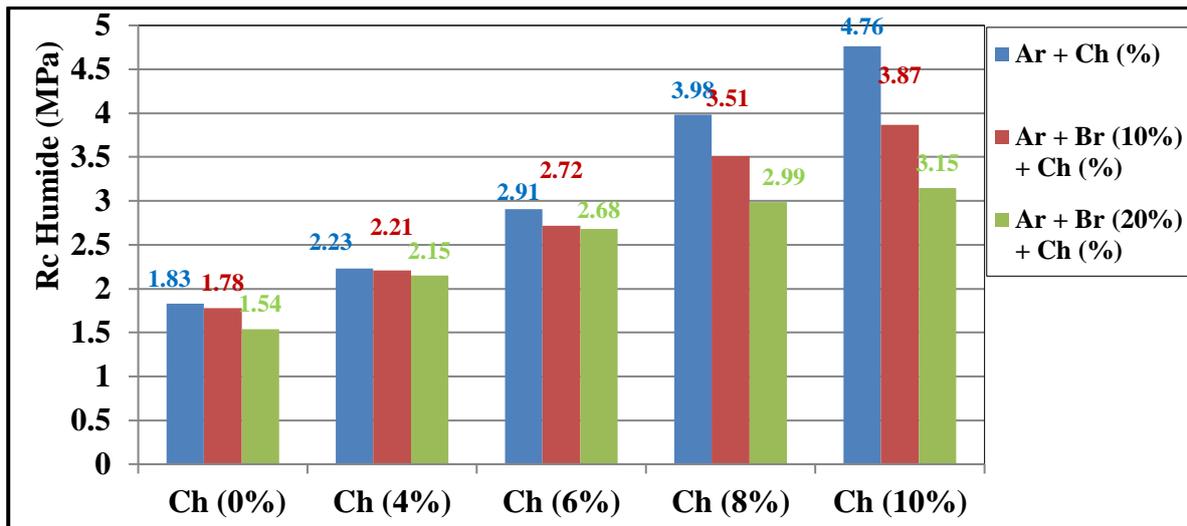


Figure III. 23: variation de la Rc humide des éprouvettes après confection (immédiate).

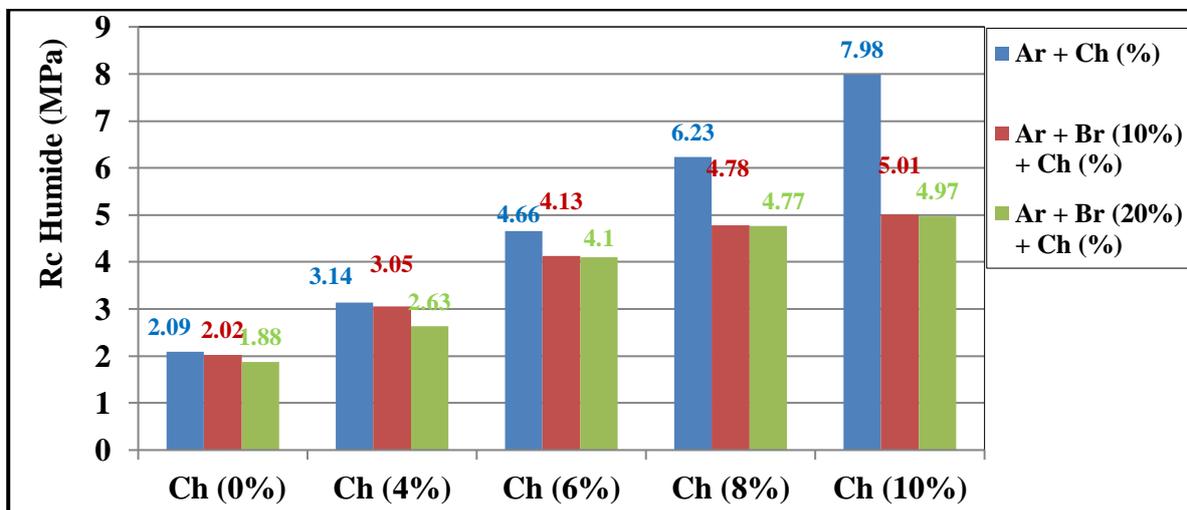


Figure III. 24: variation de la Rc humide des éprouvettes à l'âge de 3 jours de cure.

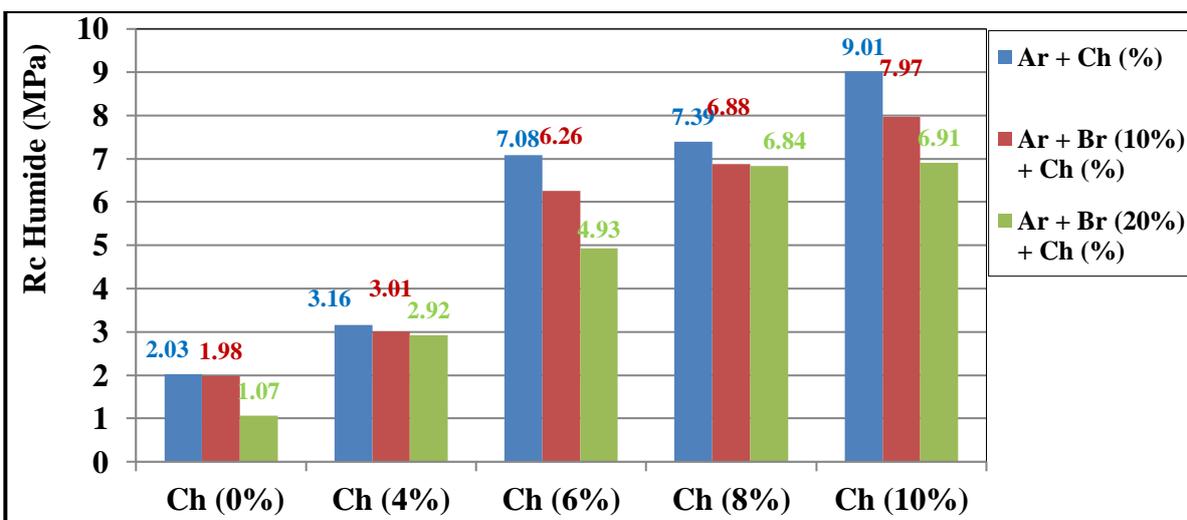


Figure III. 25: variation de la Rc humide des éprouvettes à l'âge de 7 jours de cure.

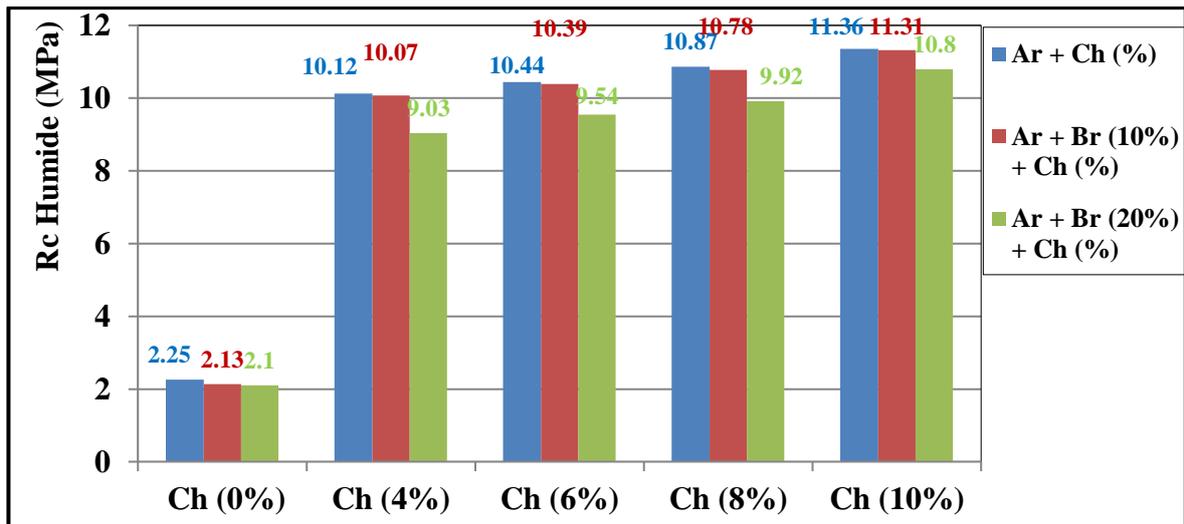


Figure III. 26: variation de la Rc humide des éprouvettes à l'âge de 14 jours de cure.

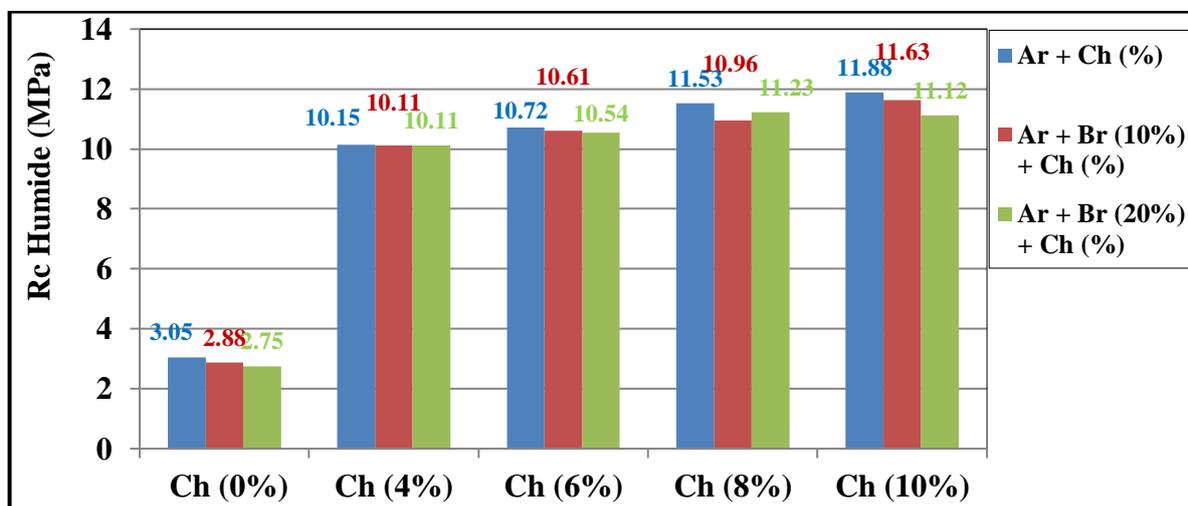


Figure III. 27: variation de la Rc humide des éprouvettes à l'âge de 28 jours de cure

Immédiatement après la saturation des éprouvettes, les résultats montrent des variations significatives de la résistance à la compression (Rc) humide avec l'ajout de brique concassée aux mélanges d'argile et de chaux.

Initialement, pour le mélange contenant uniquement de l'argile, la Rc humide est mesurée à 1,83 MPa. L'ajout de 10% de brique concassée diminue légèrement cette valeur à 1,78 MPa, tandis que l'ajout de 20% de brique concassée réduit davantage la Rc à 1,54 MPa.

Lorsqu'on ajoute 4% de chaux, la Rc humide passe à 2,23 MPa pour l'argile seule, 2,21 MPa avec 10% de brique concassée, et 2,15 MPa avec 20% de brique concassée. Avec une augmentation à 6% de chaux, les valeurs de Rc augmentent à 2,91 MPa, 2,72 MPa et 2,68 MPa respectivement pour les mélanges avec 0%, 10% et 20% de brique concassée.

À 8% de chaux, la Rc humide atteint 3,98 MPa pour l'argile seule, 3,51 MPa avec 10% de brique concassée, et 2,99 MPa avec 20% de brique concassée.

Enfin, à 10% de chaux, la Rc humide augmente à 4,76 MPa pour l'argile seule, 3,87 MPa avec 10% de brique concassée, et 3,15 MPa avec 20% de brique concassée.

III.4.3 Comparaison entre la résistance à la compression sèche et humide

En comparons les résultats de la résistance à la compression (Rc) humide immédiatement après confection avec ceux obtenus après 28 jours de cure, on constate ce qui suit :

Initialement, pour le mélange sans chaux (Argile seule), la Rc humide varie de 1,83 MPa à 3,05 MPa après 28 jours, montrant une amélioration significative de la résistance avec le temps de maturation. Avec l'ajout de 10% de brique concassée, la Rc humide passe de 1,78 MPa immédiatement à 2,88 MPa après 28 jours, indiquant également une amélioration substantielle. Pour le mélange avec 20% de brique, la Rc humide initiale est de 1,54 MPa, augmentant à 2,75 MPa après 28 jours.

Avec 10% de chaux, la Rc humide passe de 4,76 MPa à 11,88 MPa après 28 jours pour le mélange sans brique, et varie de 3,15 MPa à 11,12 MPa pour les mélanges avec 10% et 20% de brique.

Ces résultats mettent en évidence une amélioration significative de la résistance à la compression humide avec le temps de cure, indiquant une présence de cohésion et maturation des matériaux avec l'ajout de chaux et la brique concassée.

En comparant les résultats de Rc sèche et humide immédiatement et 28 jours, on peut dire que :

- Initialement, la Rc sèche montre des valeurs plus élevées que la Rc humide pour tous les mélanges. Par exemple, sans ajout de brique, la Rc sèche est de 1,95 MPa tandis que la Rc humide est de 1,83 MPa. Avec l'ajout de 10% de brique, la Rc sèche est de 1,82 MPa contre 1,78 MPa pour la Rc humide, et avec 20% de brique, la Rc sèche est de 1,62 MPa comparée à 1,54 MPa pour la Rc humide.
- Après 28 jours de cure, les deux types de Rc montrent une augmentation significative. La Rc sèche continue de présenter des valeurs supérieures à la Rc humide pour tous les mélanges. Par exemple, pour le mélange sans chaux ni brique, la Rc sèche atteint 3,49 MPa contre 3,05 MPa pour la Rc humide. Avec l'ajout de 10% de brique, la Rc sèche est de 3,38 MPa comparée à 2,88 MPa pour la Rc humide, et avec 20% de brique, la Rc sèche est de 3,17 MPa tandis que la Rc humide est de 2,75 MPa.

III.4.4 Module de Young dynamique (Ed) :

Les résultats des mesures du module de Young dynamique des différents mélanges sont illustrés dans les figures : (Figure III. 28, Figure III. 29, Figure III. 30, Figure III. 31 et Figure III. 32) Une représentation par histogramme a été utilisée pour améliorer la lisibilité des résultats et permettre une évaluation précise des différences entre les valeurs des différents mélanges.

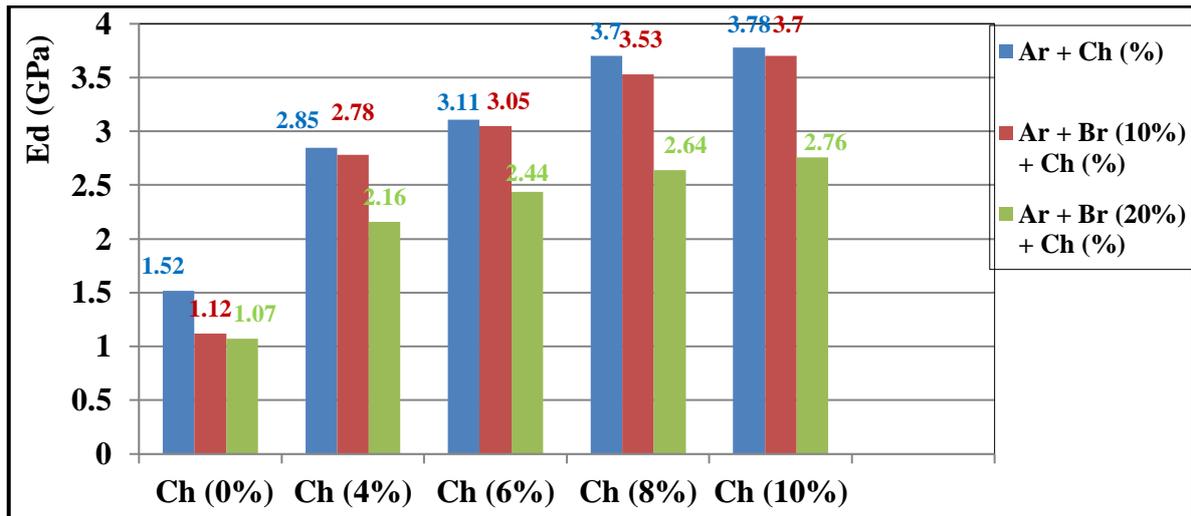


Figure III. 28: variation de Ed des éprouvettes après confection (immédiate).

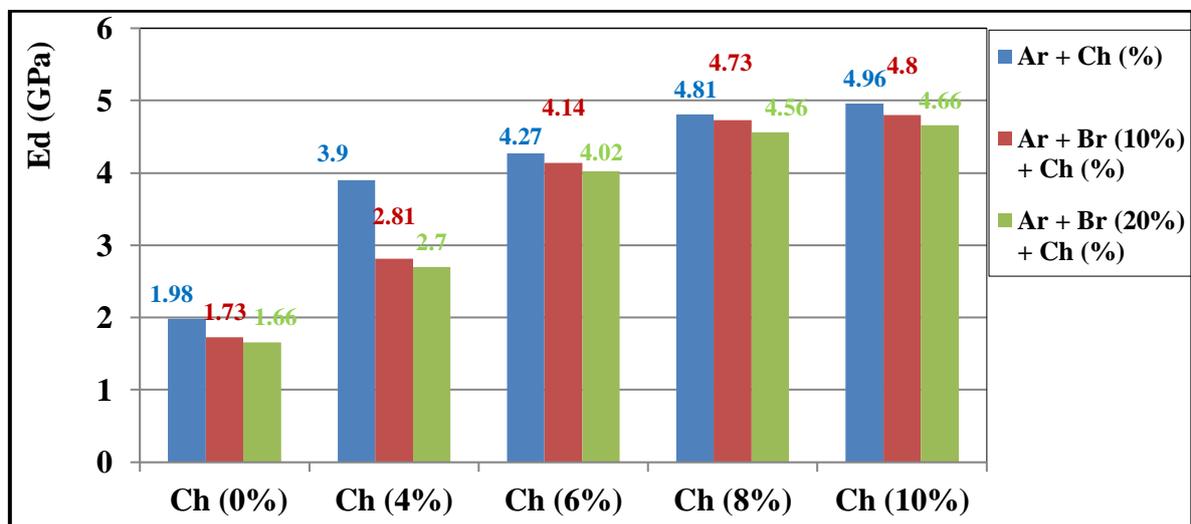


Figure III. 29: variation de Ed des éprouvettes à l'âge de 3 jours de cure.

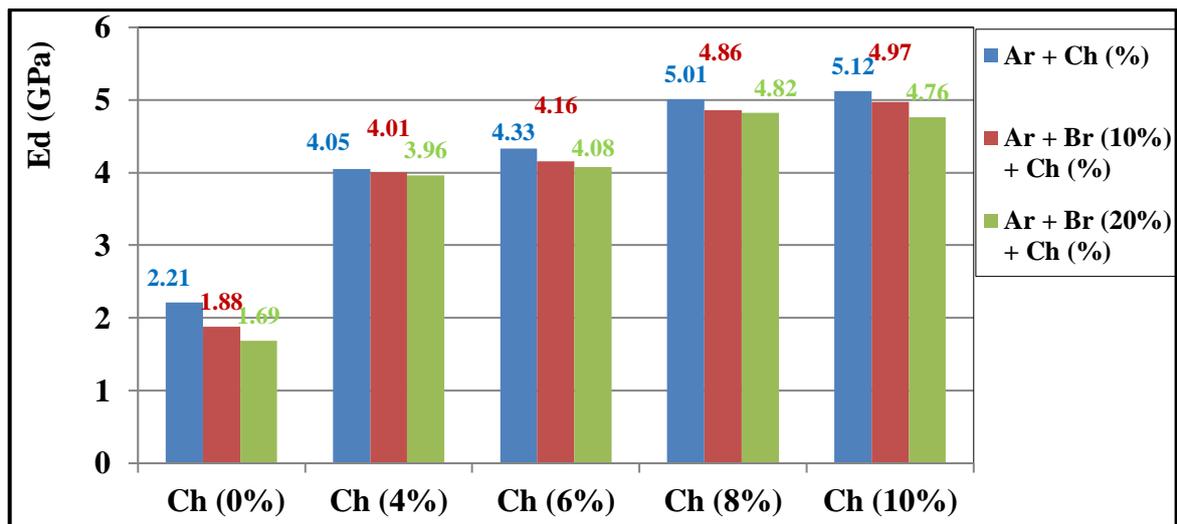


Figure III. 10: variation de Ed des éprouvettes à l'âge de 7 jours de cure.

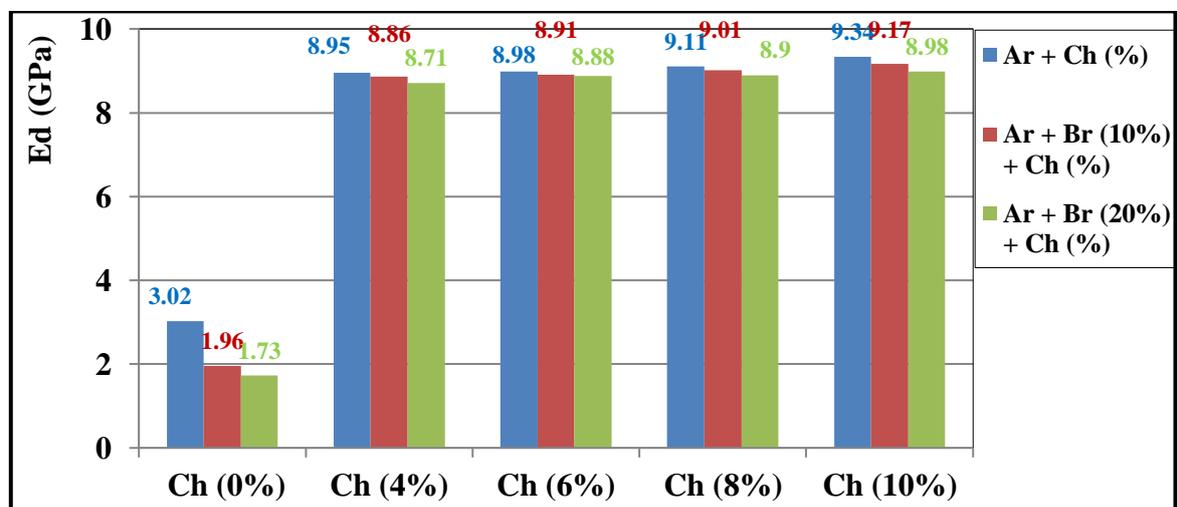


Figure III. 31: variation de Ed des éprouvettes à l'âge de 14 jours de cure.

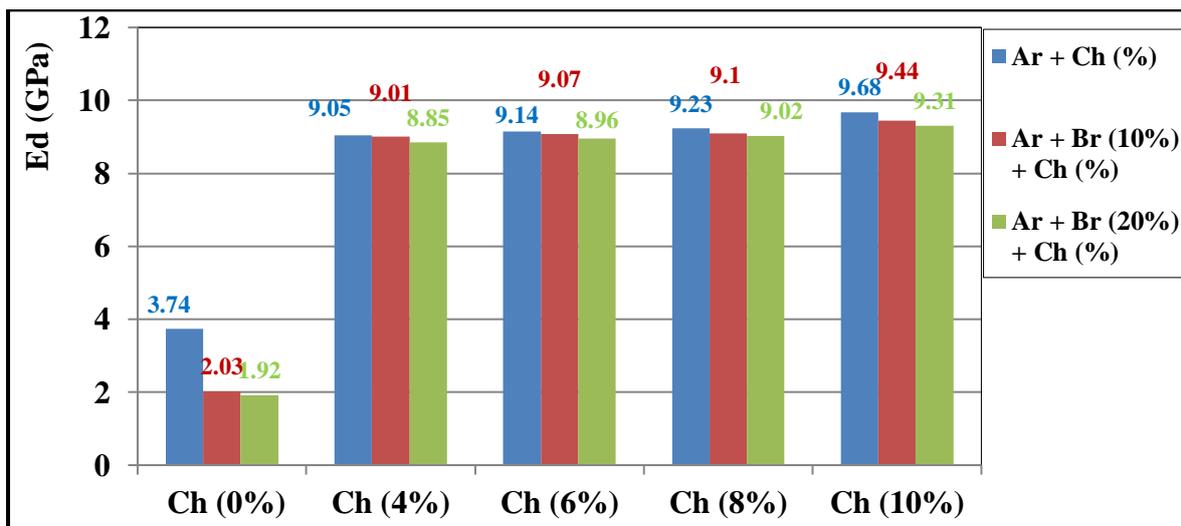


Figure III. 32: variation de Ed des éprouvettes à l'âge de 28 jours de cure.

Les mesures du module de Young dynamique (E) immédiatement après la fabrication révèlent que l'ajout de brique rouge concassée affecte significativement les propriétés mécaniques des mélanges d'argile en fonction du pourcentage de chaux.

Pour l'argile seule, le module E varie de 1.52 GPa à 3.78 GPa avec l'augmentation de la chaux de 0% à 10%. L'incorporation de 10% et 20% de brique entraîne généralement une diminution de E, atteignant respectivement 1.12 GPa et 1.07 GPa pour 0% de chaux, et 2.76 GPa et 2.44 GPa pour 10% de chaux. Cette diminution est plus marquée à des concentrations de chaux plus élevées, montrant une tendance générale à réduire le module E avec l'augmentation du pourcentage de brique concassée.

Les mesures du module de Young dynamique (E) après 28 jours de cure montrent que pour l'argile seule, le module E est de 3.74 GPa. Avec l'ajout de 10% de brique rouge concassée, le module E diminue à 2.03 GPa et à 1.92 GPa avec 20% de brique.

L'incorporation de chaux de 4% à 10% entraîne une augmentation progressive du module E, atteignant 9.68 GPa pour le mélange d'argile sans brique. Comparativement, les mélanges avec brique montrent une stabilisation du module E autour de 9 GPa avec des variations légères en fonction du pourcentage de chaux.

En comparant les résultats immédiats avec ceux obtenus après 28 jours de cure des mélanges d'argile avec différents pourcentages de chaux et de brique rouge concassée, plusieurs observations émergent :

En premier lieu, l'ajout de brique concassée conduit à une diminution du module E, indiquant une réduction de la rigidité du matériau donc un gain en terme de ductilité.

En revanche, l'ajout progressif de chaux a montré une tendance inverse : initialement, le module E augmente avec l'augmentation du pourcentage de chaux.

Cette évolution divergente suggère que les mélanges avec brique concassée bénéficient d'un temps de cure plus long pour stabiliser leurs propriétés mécaniques, tandis que l'effet de la chaux se manifeste plus rapidement, renforçant la structure du matériau dès les premiers jours de cure

Remarque

Les mesures du module de Young (E) et de la résistance à la compression sèche (Rc) indiquent des tendances intéressantes mais distinctes lorsqu'on compare l'effet de l'ajout de brique concassée dans les mélanges d'argile avec et sans chaux.

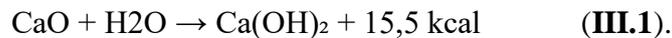
Initialement, le module de Young montre une diminution significative avec l'ajout de brique concassée indiquant une moindre rigidité du matériau. Par contre, la résistance à la

compression sèche montre une légère diminution ou stabilité initiale suivie d'une amélioration marquée avec le temps de cure.

Après un temps de cure de 28 jours, le module de Young continue de montrer une diminution, bien que moins prononcée qu'initialement, tandis que la résistance à la compression sèche montre une nette amélioration, dépassant souvent celle des mélanges sans brique concassée. Cela indique que, bien que le matériau puisse être moins rigide avec la brique concassée, il gagne en résistance au fil du temps de cure, ce qui pourrait être attribuable à une meilleure distribution des contraintes dans le matériau.

L'augmentation des caractéristiques mécaniques (résistance à la compression et module de Young) des briques en fonction du temps de cure peut être expliquée par une série de réactions chimiques et physiques induites par l'ajout de chaux.

Initialement, des réactions immédiates se produisent, telles que l'hydratation de la chaux vive au contact de l'eau libre, entraînant la formation d'hydroxyde de calcium. L'hydratation de la chaux (LCPC-SETRA 2000) est une réaction exothermique qui provoque une consommation/évaporation de 1% de la teneur en eau du sol pour chaque 1% de chaux ajoutée par rapport à la masse sèche selon la formule chimique:



Cette hydratation modifie la structure du sol, entraînant la floculation des particules et transformant le sol d'un état plastique à une structure en grumeaux stable. Les échanges cationiques entre la chaux et les particules d'argile conduisent à la floculation et à l'agglomération des particules argileuses. Ces phénomènes initiaux augmentent la cohésion interne du mélange tout en augmentant la porosité, ce qui entraîne un abaissement de la densité sèche, une augmentation de la teneur en eau de compactage, et une réduction des paramètres de plasticité.

À plus long terme, des réactions pouzzolaniques se déroulent. Ces réactions consistent en l'interaction entre l'hydroxyde de calcium et les composants siliceux et alumineux de l'argile, formant des composés cimentaires tels que les silicates et aluminates de calcium.

Notre argile, riche en silice et alumine (Information issue de la société BMSD), voit son environnement devenir de plus en plus basique avec l'ajout de chaux. Cette augmentation immédiate du pH du sol déclenche la formation de silicates et d'aluminates de calcium hydratés (CSH, CAH), produits des réactions argile-chaux qui enrobent et lient les grains du sol traité. Xing et al, 2009 ont démontré qu'il existe une relation entre le développement des performances mécaniques (résistance à la compression simple R_c) d'un sol traité et la formation des hydrates CAH et CSH.

En effet, plus le développement de ces hydrates est important, plus la résistance à la compression est élevée.

III.5 Interprétation de l'effet de la brique concassée

Les particules de brique concassée, avec une granulométrie comprise entre 1 mm et 63 μm , classées comme sable moyen à fin, sont initialement supposées remplir les vides dans le mélange d'argile, augmentant ainsi la densité sèche. Cependant, nos résultats montrent une diminution de la densité sèche maximale avec l'ajout de brique concassée. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que, au-delà d'un certain seuil, les particules de brique concassée commencent à créer une ségrégation dans le mélange. Plutôt que de remplir efficacement les vides, elles entraînent une distribution inégale des grains, créant ainsi des poches de moindre compacité.

Les mélanges contenant de la brique concassée présentent une résistance à la compression sèche inférieure à celle de l'argile seule ou de l'argile stabilisée avec de la chaux. Cela peut être attribué à une moins bonne cohésion entre les particules de brique concassée (matériau inerte) et la matrice d'argile-chaux. La ségrégation des particules mentionnée précédemment pourrait également créer des points faibles dans la structure, réduisant ainsi la résistance globale.

Malgré cette diminution de la résistance à la compression, les mélanges avec brique concassée ont montré une légère amélioration en termes de ductilité. Cette amélioration pourrait être due à la structure granulaire des particules de brique concassée, qui permettent une certaine redistribution des contraintes sous charge, retardant ainsi la rupture.

Des tests supplémentaires avec des pourcentages différents de brique concassée sont nécessaires pour déterminer un dosage optimal de cet ajout. Ces études permettront de mieux comprendre l'effet de la brique concassée sur les propriétés mécaniques des mélanges et de trouver un équilibre optimal entre densité, résistance et ductilité.

III.6 Conclusion

Les résultats des essais hydriques ont démontré l'importance du temps de cure, de la chaux et de la brique concassée sur les propriétés hydriques des briques d'argile. Un temps de cure prolongé améliore globalement la stabilité dimensionnelle et diminue l'absorption capillaire. L'ajout de chaux est bénéfique pour réduire le retrait volumique, diminuer la porosité et améliorer la résistance à l'immersion. Bien que l'ajout de brique concassée introduise une certaine porosité, il contribue à une meilleure stabilisation dimensionnelle initiale.

En ce qui concerne les essais mécaniques, les résultats montrent que le temps de cure et l'ajout de chaux ont des effets positifs sur les propriétés mécaniques des mélanges. La chaux

améliore la résistance à la compression et la rigidité du matériau, tandis que le temps de cure favorise la maturation et la cohésion interne. L'ajout de brique concassée, bien qu'il réduise initialement la résistance et la rigidité, il améliore légèrement la ductilité des mélanges.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Face à l'augmentation des émissions de CO₂ dans l'industrie cimentière et le secteur du bâtiment et des travaux publics, la recherche de matériaux de construction alternatifs et durables est devenue incontournable. Cette étude se concentre sur l'utilisation de matériaux locaux abondants en Algérie, notamment les argiles. L'objectif est de réduire les coûts de construction et l'impact environnemental tout en améliorant les propriétés mécaniques et hydriques des matériaux. Les matériaux sélectionnés sont

- Argile de Ben-Adouane : Abondante localement, elle constitue le matériau de base.
- Brique rouge concassée : Utilisée pour valoriser les déchets de construction,
- Chaux hydratée : Choisie pour ses propriétés stabilisatrices,

Pour évaluer les performances des matériaux sélectionnés, nous avons mis en place un programme expérimental détaillé. Ce programme comprend une série d'essais visant à déterminer les propriétés physiques, hydriques et mécaniques des mélanges d'argile, de brique rouge concassée et de chaux hydratée. Les essais réalisés incluent :

- Essais physiques : Ces essais incluent la mesure des limites d'Atterberg pour évaluer la plasticité des mélanges, ainsi que les essais de compactage Proctor pour déterminer la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale.
- Essais hydriques : Ces essais se concentrent sur les variations volumiques des briques au cours de différentes périodes de cure, les essais d'absorption capillaire pour mesurer le coefficient d'absorption d'eau (Cb), et les essais d'immersion pour évaluer la résistance à la dégradation en conditions de saturation prolongée.
- Essais mécaniques : Pour évaluer la résistance à la compression, nous avons réalisé des essais de compression simple sur les briques dans deux états distincts : sec et humide. En parallèle, nous avons utilisé l'appareil Grindo Sonic pour mesurer le module de Young dynamique, afin d'évaluer la réponse élastique des mélanges étudiés et leur ductilité.

Les mélanges étudiés comprennent différentes proportions d'argile, de brique rouge concassée (10% et 20%), et de chaux hydratée (0%, 4%, 6%, 8%, et 10%). Chaque mélange a été soumis aux essais mentionnés immédiatement après la fabrication et après des périodes de cure de 3, 7, 14, et 28 jours. Ces essais ont permis de suivre l'évolution des propriétés des matériaux et d'identifier les combinaisons optimales pour des performances mécaniques et hydriques améliorées.

En ce qui concerne les essais hydriques, ces essais ont révélé :

Conclusion générale

- Temps de cure : Le retrait volumique est plus prononcé dans les premiers jours, suivi d'une stabilisation. Le coefficient d'absorption d'eau (C_b) augmente avec le temps de cure en raison de la diminution de la teneur en eau des échantillons.
- Chaux : L'augmentation du pourcentage de chaux réduit significativement le C_b , atteignant une réduction maximale avec 10% de chaux après 28 jours.
- Brique concassée : L'incorporation de brique concassée tend à réduire le C_b , surtout aux pourcentages de chaux plus élevés et avec une augmentation du temps de cure.

Pour les essais mécaniques, les résultats montrent les tendances suivantes :

- La résistance à la compression sèche augmente significativement avec l'ajout de chaux. Par exemple, pour le mélange d'argile seul, la résistance passe de 1,95 MPa immédiatement à 3,49 MPa après 28 jours. Avec 10% de chaux, la résistance augmente de 4,89 MPa à 12,78 MPa après 28 jours. L'ajout de brique concassée tend à réduire la résistance initiale, mais la tendance générale reste une amélioration avec le temps de cure.
- Les résultats de résistance à la compression humide montrent une tendance similaire, avec une amélioration notable après 28 jours de cure. Par exemple, avec 10% de chaux, la résistance passe de 4,76 MPa immédiatement à 11,88 MPa après 28 jours. Toutefois, les valeurs obtenues sont nettement inférieures à ceux de la résistance à la compression sèche.
- Module de Young dynamique : Immédiatement après la fabrication, l'ajout de brique concassée réduit le module de Young, indiquant une diminution de la rigidité (gain en ductilité). Cependant, après 28 jours de cure, le module de Young montre une nette augmentation avec l'ajout de chaux, atteignant des valeurs proches de 9,68 GPa pour les mélanges avec 10% de chaux.

Concernant les interactions entre les ajouts et l'argile, on peut dire ce qui suit :

Effet de la Chaux

- L'ajout de chaux aux mélanges a montré une augmentation notable des caractéristiques mécaniques, comme la résistance à la compression et le module de Young dynamique et une diminution des paramètres de plasticité et de compactage. Ceci est due à plusieurs réactions chimiques : Réactions immédiates (hydratation de la chaux et le phénomène de floculation-agglomération), réactions à long terme (Les réactions pouzzolaniques) permettant le renforcement de la matrice du matériau par la création de nouveaux composés cimentaires (CSH, CAH, CASH).

Effet de la Brique Concassée

Conclusion générale

- Les résultats montrent que l'ajout de brique concassée diminue la densité sèche maximale et la résistance à la compression initiale des mélanges. Ce phénomène peut être attribué à la ségrégation des particules de brique concassée au-delà d'un certain seuil, créant des poches de moindre compacité. Cependant, cet ajout améliore légèrement la ductilité des mélanges, permettant une meilleure redistribution des contraintes sous charge.
- Ces résultats montrent le potentiel des matériaux locaux et des déchets de construction dans la fabrication de briques durables et écologiques, offrant une alternative viable aux matériaux de construction traditionnels.

Recommandations

Ainsi, en considérant les dosages habituels de chaux dans la littérature (inférieure à 7%), on peut choisir le mélange composé de 6% de chaux et 10% de brique rouge concassée est recommandé pour la fabrication de briques de terre comprimée, offrant un équilibre optimal entre résistance mécanique, stabilité dimensionnelle, et résistance à l'eau. Ce mélange utilise efficacement les matériaux locaux disponibles tout en valorisant les déchets de construction, contribuant ainsi à la durabilité et à l'efficacité économique du projet.

Perspectives

Pour optimiser davantage les mélanges, plusieurs axes de recherche peuvent être envisagés. Tout d'abord, des études de dosage fin sont nécessaires pour explorer des pourcentages de brique concassée inférieurs à 10%. Ensuite, il est intéressant de réaliser des tests de durabilité à long terme (cycles de gel-dégel, d'humidité-sécheresse), des mesures des caractéristiques hygrothermiques ainsi qu'étude microstructurales pour comprendre les interactions entre les différents composants.

Ces investigations permettront de mieux comprendre et d'optimiser la résistance et la stabilité des briques de terre comprimée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR.XPP94-041.Sols : reconnaissance et essais. Identification granulométrique : Méthode de tamisage par voie humide. France. Décembre 1995.

AFNOR.NFP94-048.Sols reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en carbonate: méthode du calcimètre. France. Octobre 1996.

AFNOR. NF P94-051.Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg : Limites de liquidité à la de plasticité au rouleau. France. Mars1993.

AFNOR. NF P94-057. Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique des sols : Méthode par sédimentation. France. Mai1992.

AFNOR. NF P94-068.Sols : reconnaissance et essais. Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux : Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache. France. Octobre1998.

AFNOR.NFP94-093.Sols: reconnaissance et essais. Détermination des références de compactage d'un matériau: Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié. France. Octobre 1999.

AFNOR.XP P13-901.Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : Définitions-Spécifications – Méthodes d'essais-Conditions de réception. France. Octobre 2001.

APRUE,2017 : Boudanouf, A., Bouchekrine, I., Bouachir, N., & Bouchair, A. E. (2017). L'impact de l'enveloppe du bâtiment sur l'économie d'énergie dans le nord Algerien (Doctoral dissertation, Université de Jijel).

Anger & Fontaine, 2009 : Anger, R., Fontaine, L., Joffroy, T., & Ruiz, E. (2011). Construire en terre, une autre voie pour loger la planète. Secteur Privé & Développement, revue bimestrielle de Proparco, 10, 18-21.

Anger, 2011 : Anger, R. (2011). Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction (Doctoral dissertation, INSA de Lyon).

ASTM D6276 (2019).Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization.

Bruno et col, 2015 :Khorshidifard, M., Rudbari, H. A., Askari, B., Sahihi, M., Farsani, M. R., Jalilian, F., & Bruno, G. (2015). Cobalt (II), copper (II), zinc (II) and palladium (II) Schiff base complexes:Synthesis, characterization and catalytic performance in selectiveoxidation of sulfides usinghydrogenperoxideunder solvent-free conditions. Polyhedron, 95, 1-13.

Doat etal,1979 : Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., &Vitoux, F. (1979). Construire en terre. Éditions Alternative et parallèles.

Delgado, 2007 : Balleine, B. W., Delgado, M. R., &Hikosaka, O. (2007). The role of the dorsal striatum in reward and decision-making. Journal of Neuroscience, 27(31), 8161-8165.

Doucet, 2005 : La terre crue pour un autre développement : La technique de construction en terre crue adaptée aux contraintes techniques et au contexte culturel d'une communauté (Travail de fin d'études). Université de Liège.

DTR (C2-45) (1992): Règles de Conception et de Calcul des Maçonnerie CRENIB.

DTR-C.3.2/4 : (2013) : Réglementation Thermique du Bâtiment. CNERIB

Fediex 2009 Traitement des sols et recyclage de terres à la chaux.

Guillaud & Houben, 1995 : Guillaud, H., Joffroy, T., & Odul, P. (1995). Compressed earthblocks: Manual of design and construction. Vieweg, Eschborn, Germany. (Guillaud, H., Joffroy, T., & Odul, P. (1995). Blocs de terre comprimés: Manuel de conception et de construction. Vieweg, Eschborn, Allemagne).

Houben et Guillaud, 1989 : Houben, H., Guillaud, H., Dayre, M., & Centre de recherche et d'application pour la construction en terre (Villefontaine, Isère). (1989). Traité de construction en terre (Vol. 72). Marseille: Parenthèses.

Horsch & de Paoli, 2014 ; Cours UE82 "Construire en terre crue", Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.

Ghomari, 1989 : Ghomari, F. (1989). Matériau en terre crue compactée : amélioration de sa durabilité à l'eau (Doctoral dissertation, Lyon, INSA).

LCPC, SETRA. (2000). Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide Technique. Editions LCPC, Sétra, réf. D9924.

Mesbah, A, Morel, J.C, Olivier, M. (1999). Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents. Materials and structures. Vol32.

Page : 687-694. Ecole Nationale de travaux publics Velin Cedex, France. 1999

Minke, 2006 : Minke, G. (2006). Building with earth: design and technology of a sustainable architecture. De Gruyter (Construction avec la terre : conception et technologie d'une architecture durable. De Gruyter).

Moevus, Mariette, Couvreur, Lucile, Cloquet, Basile, Fontaine, Laetitia, Anger, Romain, **Doat, Patrice, (2016)**. Béton d'Argile Environnemental: résultats d'un programme de recherche tourné vers l'application. Villefontaine : CRATerre. 87 p. ISBN 978-2-906901-94-0.

Rigassi, 1995 : Rigassi, V. (1995). Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATerre-EAG, Friedrich Vieweg&Sohn, Braunschweig, Allemagne, 104.

Références bibliographiques

Paulus, 2015 : Paulus, J. (2015). Construction en terre crue: dispositions qualitatives, constructives et architecturales–Application à un cas pratique: Ouagadougou.(Master, Université de Liège.

RT 2012 (2012) : Règlement thermique (France)

Salmi, 2014 : Salmi, S. (2014). La construction en pisé entre performances énergétiques et perception des usagers: cas du village kabyle Ait Itchir (Doctoral dissertation).

Xing, H., Yang, X., Xu, C., &Ye, G. (2009). Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil–cement. *Engineering Geology*, 103(1-2), 33-38.

Sites web :

<http://www.antikforever.com>.

<http://craterre.org>.

<http://dta-tlemcen.dz>.

<https://www.pinterest.com>; www.gite01.fr.

<http://commons.wikimedia.org>.

<https://autrecarnetdejimidi.wordpress.com>; <http://learning-from-vernacular.epfl.ch>; <http://fr.slideshare.net>.

<http://www.construction21.org>.

www.futura-sciences.com.

<http://www.tlemcen-dz.com>

<http://www.archdaily.com>.

Fr.db-city.com.

www.saint-jean-de-monts.com.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Mosquée_de_Dioulasso-bâ.

socks-studio.com.

www.block-machine.net.

www.iso.org.

<https://www.cycle-terre.eu>.