
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draia - Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Sciences de la Technologie.



THESE DE DOCTORAT LMD

Filière : Génie Civil

Spécialité : Génie Civil

Présentée et soutenue publiquement par :

Mme LAMOURI Hafsa

Le : 28/11/2022

Thème

Etude des maçonneries entre tradition et modernité.
Pratiques au sud Algérien (Adrar)

Devant le jury composé de :

Pr. MEKERTA Belkacem	Université d'Adrar	Président
Pr. SEMCHA Abdélaziz	Université d'Adrar	Rapporteur
Pr. KHELAFI Hamid	Université d'Adrar	Examineur
Pr. GHOMARI Fouad	Université de Tlemcen	Examineur
MCA MAAROUF Hafida	Université de Temouchent	Examinatrice

Année Universitaire 2022 / 2023

Remerciements

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail je dis :

MERCI

Mes profonds remerciements s'adressent d'abord à mon Directeur de thèse Mr. Abdélaziz SEMCHA, Professeur à l'Université d'Adrar, pour avoir accepté de diriger cette thèse tout au long de ces six années et pour m'avoir conseillée, aidée et encouragée. Je tiens à le remercier pour sa disponibilité et la persévérance qu'il m'a prodiguée

J'exprime toute ma reconnaissance au Professeur GHOMARI Fouad, Directeur du laboratoire EOLE de l'Université de Tlemcen, qui avec sa grande expérience, m'a aidée à surmonter les difficultés rencontrées au cours de mon travail expérimental.

Egalement, je remercie Monsieur HOUTI Farid, Maître de Conférences à l'Université de Tlemcen, pour l'attention accordée à ce travail et au temps investi pour la réalisation des essais mécaniques.

J'exprime ma profonde gratitude au Dr. MAAROUF Hafida, Pr. GHOMARI Fouad et Pr. KHELAFI Hamid, pour avoir accepté examiner ce travail et au Pr. MEKERTA Belkacem qui me fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Le Pr. KHELAFI Hamid est remercié pour tous ses efforts fournis dans la coordination administrative et les orientations durant toute la durée de notre formation doctorale.

Que toutes les personnes qui m'ont soutenue et apporté leurs aides, dans la réalisation de cette thèse, trouvent l'expression de ma reconnaissance pour leurs actes qui ont plastronné ce travail. Je cite en particulier :

- Mme TERKI Yasmin, ex. Directrice du Centre Algérien du Patrimoine bâti en Terre (CAPTerre) de Timimoun ainsi qu'à son collaborateur Mr. HACINI Mourad (Architecte au CAPTerre).
- Mr. SAHRAOUI M'hamed, Ingénieur au laboratoire LTPSud d'Adrar.

Remerciements

- Mes enseignants de la faculté des Sciences et Techniques de l'Université d'Adrar : Mme AIT HAMMOUDA Khedidja, Mr AKACEM Mustapha, Mr ADEL DJALIL M'Hamed, Mr MOULAY OMAR Hassane, Mr ABBOU Mohamed, Mr BASSOUD Abdelkader et tous ceux que je n'ai pas cités.

Je suis, par ailleurs heureuse de compter sur Mr. MOULAY LAKHDAR Miloud, artisan dans le domaine de la construction en terre à Timimoune, pour son expérience, ses connaissances et ses réponses à toutes mes interrogations.

Dédicaces

Je tiens à remercier le Tout Puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour arriver
à ce stade afin de réaliser ce travail que je dédie à:

A ma mère Eliane LENNE, et mon père Ali,

A mon mari M'hamed HANNANI,

A mes frères Noureddine et Maurad, et mes sœurs Bakhta, Khawla et Lynda

Et tous ceux qui me sont cher

Sommaire

Remerciements	i
Dédicaces.....	iii
Listes des figures	viii
Liste des photos.....	ix
Liste des tableaux.....	xii
Résumé	xiii
Liste des symboles et abréviations	xvi
Liste des équations	xvii
Introduction générale	1
Chapitre I : Les types de maçonnerie.....	4
I.1. INTRODUCTION.....	4
I.2. LES TYPES DE MAÇONNERIE	5
I.2.1. <i>La maçonnerie en pierre</i>	5
I.2.2. <i>La maçonnerie en adobe</i>	8
I.2.3. <i>Le pisé</i>	11
I.2.4. <i>La bauge</i>	13
I.2.5. <i>Le torchis</i>	14
I.2.6. <i>Le Bloc de Terre Comprimée (BTC)</i>	15
I.2.7. <i>La brique de terre cuite</i>	19
I.2.8. <i>Les produits en béton</i>	21
I.3. LE MORTIER	21
I.4. CONCLUSION	22
Chapitre II : La construction en terre.....	24
II.1. INTRODUCTION.....	24
II.2. LES PROPRIETES DE LA BRIQUE DE TERRE CRUE.....	24
II.2.1. <i>Les dimensions des briques d'adobe</i>	25
II.2.3. <i>La terre pour adobe</i>	26
II.2.4. <i>Le moulage, le démoulage et le séchage des adobes</i>	27

Sommaire

II.2.5. <i>Recommandations d'élévation des murs en adobe</i>	27
II.3. CARACTERISTIQUES DE LA CONSTRUCTION EN ADOBE DANS LA REGION D'ADRAR	28
II.3.1. <i>La confection des briques (adobes)</i>	31
II.3.2. <i>Les fondations</i>	31
II.3.5. <i>Les planchers</i>	34
II.4. ETUDE COMPARATIVE ECONOMIQUE D'UNE MAISON EN ADOBE ET EN MAÇONNERIE CONVENTIONNELLE	39
II.5. SITUATION DE LA CONSTRUCTION EN TERRE	40
II.5.1. <i>Situation de la construction en terre dans le monde</i>	40
II.5.2. <i>Situation de la construction en terre en Algérie</i>	42
II.6. STABILISATION DES ELEMENTS DE LA MAÇONNERIE EN TERRE	44
II.6.1. <i>Stabilisation à la chaux</i>	45
II.7. COMPORTEMENT DE LA MAÇONNERIE SOUS SOLLICITATIONS UNI-AXIALES DE COMPRESSION	47
II.7.1. <i>Résistance à la compression perpendiculaire aux joints horizontaux</i>	49
II.7.2. <i>Résistance à la compression parallèle aux joints horizontaux</i>	50
II.7.3. <i>Formules analytiques de la résistance à la compression de la maçonnerie</i>	50
II.8. CONCLUSION	52
Chapitre III : Pathologie des maçonneries en terre	53
III.1. INTRODUCTION.....	53
III.2 PATHOLOGIES LIEES A L'HUMIDITE	53
III.2.1. <i>Les principaux lieux de désordres</i>	54
III.2.2. <i>Les principales causes de désordres :</i>	54
III.2.3. <i>Pathologies liées à l'humidité</i>	54
III.3. PATHOLOGIES STRUCTURELLES DES CONSTRUCTIONS EN BRIQUES DE TERRE CRUE.....	56
III.3.1. <i>Pathologies coplanaires des parements du mur</i>	57
III.3.2. <i>Pathologie due à des manques de rigidité des éléments collaborant</i>	57
III.3.3. <i>Pathologie due à des différences de charge</i>	58
III.3.4. <i>Pathologie due aux mouvements différentiels des fondations</i>	58
III.4. LES TYPES DE FISSURES	58
III.2. CONCLUSION :	59
Chapitre IV : Matières premières utilisées et caractérisations.....	61

IV.2. INTRODUCTION.....	61
IV.2. CARACTERISTIQUES DES MATIERES PREMIERES	62
IV.2.1. Identification du sable de dunes.....	62
IV.2.2. L'argile	63
IV.3. FABRICATION ET CARACTERISATION DES BRIQUES DE TERRE CRUE	64
IV.3.1. Fabrication des briques	64
IV.3.2. Caractéristiques géométriques et physiques des briques.....	69
IV.3.3. Caractéristiques mécaniques des briques.....	70
IV.4. COMPOSITION ET CARACTERISATION DU MORTIER EN TERRE	73
IV.4.1. Composition du mortier en terre.....	73
IV.4.2. Caractéristiques mécaniques du mortier en terre.....	74
IV.5 CONCLUSION	75
Chapitre V : Etude expérimentale sur murets	77
V.1. INTRODUCTION.....	77
V.2. CONSTRUCTION DES MURETS :	77
V.2.1. Matériel utilisé :.....	78
V.2.2. Principe de la construction des murets :	79
V.2.3. Appareillage des essais sur les murets	82
V.2.4. Principe d'essai :	83
V.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX DES MURETS	86
V.3.1. Courbes contraintes déformations des murets en terre	86
V.3.2. Propriétés mécaniques des murets en terre	87
V.4. ETUDE ANALYTIQUE.....	90
V.4.1. Formule analytique.....	90
V.5. CONCLUSION	92
Conclusion générale :	94
Références bibliographiques :	97
Annexes.....	106

Listes des figures

Chapitre I

Figure I. 1: Assemblage d'un mur massif (en pierre), (Bonnette M., 1989)..... 8

Chapitre II

Figure II. 1 : Exemple de moules traditionnels à adobe de grande dimension pour certains pays du monde, (Doat P., 1979). 25

Figure II. 2 : Exemple de moules traditionnels à adobe de petite dimension pour certains pays du monde, (Doat P., 1979). 26

Figure II. 3 : Courbe granulométrique du sable de dune (Akacem M., 2016)..... 30

Figure II. 4 : Quatre variantes de construction d'un mur porteur en adobe, (Idir L., 2013) 33

Figure II. 5: Nouvelle variante de construction d'un mur en adobe. 33

Figure II. 6: Détails plancher pour les grands portés en bois de palmier. 37

Figure II.7 : Formation des couches d'enduit à chaux, à long terme, due à la mauvaise adhérence 38

Figure II.8 : Plan d'une maison en adobe réalisée en 1990..... 40

Figure II.9 : Evolution de la résistance à la compression au cours du temps de deux types de terre stabilisées à la chaux (Doat P., 1979)..... 46

Chapitre III

Figure III. 1 : Fissures dans la zone pleine (entre les ouvertures) dues à une forte charge de compression sur une large partie du mur. 57

Figure III. 2: Fracture verticale entre le mur supportant la charge du plancher et le mur traversant. 58

Figure III. 3: Fissurations à l'angle du mur dues à un mouvement du sol. (Gómez C. D., 2014) 58

Chapitre IV

Figure IV. 1: Courbe granulométrique du sable de dunes étudié. 62

Figure IV. 2 : Contrôle de la consistance de la terre à adobe (Doat P., 1979)..... 67

Figure IV. 3: Courbes contraintes-déformations des adobes de type a, b et c..... 72

Figure IV. 4: Courbe contrainte déformation du mortier en terre. 75

Chapitre V

Figure V. 1: Courbes contraintes déformations des murets A, B et C..... 87

Liste des photos

Chapitre I

Photo I. 1 : Le Panthéon de Rome ; un édifice religieux antique en pierre situé sur la piazza della Rotonda, bâti en 27 av. J.-C.	6
Photo I. 2 : Palais Dar El Aziza à Alger, construit dans le XVI ^e siècle, en pierre, brique, et plâtre, basse Casba d'Alger, Algérie.....	6
Photo I. 3 : Construction en pierre à Kenadsa, Algérie, (Djeradi M. A., 2013).	7
Photo I. 4 : Citadelle Grande KizKala date du VI ^{ème} siècle avant J. C, Turkménistan, Asie (Anger R. et L. Fontain, 2010)	9
Photo I. 5 : Shibam, le Manhattan du désert, Yémen (Portal L. M., 2013)	10
Photo I. 6: Maison en brique crue avec des ouvertures peu nombreuses et de petite taille, pour protéger du soleil, Tucson, Arizona, 1997, (Anger R. et Fontain L., 2010).....	10
Photo I. 7: Maison privée, construire en adobe dans les 20 dernières années,	11
Photo I. 8: Bâtiment dans l'université Murdoch à Perth, Australie, (Anger R. et Fontain L., 2010)	12
Photo I. 9 : Construction d'un mur en bauge, Gaoua, Pays Lobi, Burkina Faso (Terki Y., 2013).....	14
Photo I. 10 : Cases Obus de Musgum, Cameroun, (Anger R. et Fontain L., 2010)	14
Photo I. 11: Construction d'une maison en torchis.	15
Photo I. 12 : La ziggurate de ChoghaZanbil en brique cuite, Iran.	19

Chapitre II

Photo II. 1 : Ksar El Kantara, Biskra, Algérie (Terki Y., 2013).....	28
Photo II. 2 : Mur en Toub avec un soubassement de 1m de hauteur en pierre, Adrar.....	29
Photo II. 3 : Détails de fondation de la maison en adobe : semelles filantes en pierre locale de 0,5m de profondeur, Timimoune, Algérie.	31
Photo II. 4 : Mur de clôture en adobe avec un soubassement en pierre, Timimoune, Algérie.	32
Photo II. 5: Linteau en troncs de palmier, CAPTerre, Timimoune, Algérie.	34
Photo II. 6 : Epaisseur des ouvertures dans les anciennes habitations.	34
Photo II. 7 : Détails du plancher d'une maison en adobes réalisé en 1990, Timimoune, Algérie.	35
Photo II. 8 : Plancher avec une ossature principale en troncs de palmier et une ossature secondaire en branchage de palmier appelé « kernaf », CAPTerre, Timimoune, Algérie.	35
Photo II. 9 : Plancher avec une ossature principale en troncs de palmier et une ossature secondaire en « Gsab ».	35
Photo II. 10 : Détails intérieur d'une maison en adobe réalisée en 1990, Timimoune, Algérie.	36
Photo II. 11 : Artisanat en brique de terre crue âgée de 100 ans, de 4x6m ² , Timimoune, Algérie.....	36
Photo II. 12: Création des arcs tous les 2m dans une ancienne construction en adobe, CAPTerre, Timimoune, Algérie.	37
Photo II. 13 : Construction en adobe avec des murs porteurs réalisée en 2001, Timimoune, Algérie.	39

Liste des photos

Photo II. 14: Mur d'une construction en adobe en cours d'exécution, avec un système porteur en béton et un soubassement en pierre, Timimoune, Algérie. 39

Chapitre III

Photo III. 1 : Fissuration du mur due à l'action d'eau et apparition sur l'enduit en terre. 55

Photo III. 2 : Dégradation des extrémités du mur à proximité des ouvertures, CAPTerre, Timimoune, Algérie. 55

Photo III. 3: Fissuration du muret décollements des enduits. 57

Chapitre IV

Photo IV. 1 : Malaxage mécanique des adobes destinés aux essais préliminaires. 64

Photo IV. 2: Moulage des briques en terre crue pour les essais préliminaires. 65

Photo IV. 3 : Séchage des adobes malaxés mécaniquement : 65

Photo IV. 4 : Malaxage manuel des adobes : 65

Photo IV. 5 : Moules métalliques sans fond de dimensions 29 x 14 x 9 cm³ pour les adobes entiers, et 14,5 x 14 x 9 cm³ pour les demi adobes. 66

Photo IV. 6 : Hydratation préalable de l'argile 68

Photo IV. 7 : Malaxage manuel des composants des briques. 68

Photo IV. 8 : Démoulage et séchage des briques : 68

Photo IV. 9 : Appareillage pour la détermination des propriétés mécaniques des adobes. 71

Photo IV. 10 : Surfaçage des adobes par une couche de 1cm de plâtre. 71

Photo IV. 11 : Préparation des éprouvettes de mortier en terre pour les essais préliminaires. 74

Chapitre V

Photo V. 1 : Stockage des adobes et des matières premières destinés à l'étude. 78

Photo V. 2 : (a) Construction des murets, (b) Dimensions des murets. 78

Photo V. 3 : Transpalette pour le déplacement des adobes et des murets après séchage. 79

Photo V. 4 : Gabarit en bois fixant l'épaisseur du joint de mortier. 79

Photo V. 5 : Préparation de la pâte du mortier pour la construction des murets. 80

Photo V. 6 : Mouillage des adobes avant leurs utilisations. 81

Photo V. 7: Placement du fil à plomb pour assurer la planéité du muret. 81

Photo V. 8 : Etalement du joint de mortier à l'aide du gabarit en bois. 82

Photo V. 9 : Surfaçage des murets par une couche de 1cm de plâtre. 82

Photo V. 10 : Dispositif des essais sur murets. 83

Photo V. 11 : Rupture des murets de type A : apparence de la première fissure à t=34s ; rupture à t=42s ; 84

Photo V. 12 : Rupture des murets de type B. 84

Photo V. 13 : Rupture du muret type C : apparence de la première fissure à t=26s ; Rupture du muret à t=63s. 85

Photo V. 14: (a) Fissuration des adobes et du joint de mortier des assemblages après rupture ; (b) et (c) les murets après rupture. 86

Liste des photos

Photo V. 15 : Fissuration des interfaces brique – mortier.	86
Photo V. 16: Façade d'une maison en adobe construite en 1990 par un artisan, à Timimoune, Algérie.	89

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Caractéristiques physico-chimiques des pierres naturelles, source : (Asselin P. et Vaxelaire J.L., 2016).	8
Tableau I.3 : Analyse comparative de la consommation d'énergie et l'émission de CO ₂ de quatre types de maçonnerie (Maini S., 2005).	17
Tableau I.4 : Caractéristiques mécaniques des briques cuites creuses et pleines (Hendry A., 1997).	20

Chapitre II

Tableau II. 1: Les caractéristiques du sable de dunes d'Adrar (Akacem M., 2018).	30
Tableau II. 2: Composition chimique de l'argile d'Adrar : axe Adrar-Timimoune (Abbou M., 2016).	31
Tableau II. 3: Normes, codes et standards de la construction en terre à travers le monde (King B., 2006).	42
Tableau II. 4: Les opérations de construction en terre crue en Algérie (Kebaili N., 2006).	43
Tableau II. 5 : Modèles de caractérisation de la maçonnerie dans la littérature (Page A. W. et All S. (1981) ; Shaan R. (1987)).	48

Chapitre III

Tableau III. 1: Types de fissures en fonction de la cause et la zone d'apparition, (Fouchal F., 2006).	59
--	----

Chapitre IV

Tableau IV. 1: Caractéristiques physiques du sable de dunes étudié (sable de dunes de Bouda).	63
Tableau IV. 2: Caractéristiques physiques de l'argile d'Adrar étudiée.	63
Tableau IV. 3: Composition des trios types d'échantillons d'adobe a, b et c.	66
Tableau IV. 4 : La masse volumique des adobes.	69
Tableau IV. 5: Propriétés mécaniques des trois types d'adobe à 60 j.	73
Tableau IV. 6 : La composition du mortier en terre.	73
Tableau IV. 7: Propriétés mécaniques du mortier en terre à 60 jours.	74

Chapitre V

Tableau V. 1: Modules de Young des murets A, B et C obtenus expérimentalement à 60 jours.	88
Tableau V. 2: Résistances à la compression des murets A, B et C obtenues expérimentalement.	88
Tableau V. 3: Déformations ϵ des murets A, B et C obtenues expérimentalement à 60 j.	89
Tableau V. 4 : Résultats analytiques du module de Young, de la résistance à la compression et des déformations des trois types de murets A, B et C.	92

Résumé

La terre crue est un matériau de construction utilisé depuis des millénaires. Son aspect thermique est caractérisé par une inertie thermique permettant à la fois l'accumulation et la restitution de la chaleur. La maçonnerie en terre crue présente l'élément essentiel qui enveloppe la structure. Elle offre l'isolation thermique, hygrométrique et phonique de la structure et une résistance mécanique qui, avec un entretien régulier, peut résister aux intempéries, et au vent. Aussi, elle répond aux concepts du développement durable, du bio habitat, et des critères des bâtiments à basse consommation (BBC).

Dans ce travail, nous nous intéressons à la valorisation de la maçonnerie en terre crue, particulièrement en adobe, dans la région d'étude Adrar, qui est située dans une zone aride caractérisée par un climat sec et chaud. Dans un premier temps nous faisons une identification des matériaux locaux, sable de dune et argile, disponibles en quantité inépuisable à Adrar. Ensuite, nous réalisons un chantier à l'air libre où nous fabriquons manuellement plus de 120 briques d'adobe divisées en trois types : a, b et c pour la réalisation de modèles en maçonnerie en terre. Après, la campagne expérimentale comprend deux axes : le premier axe est destiné aux essais mécaniques de résistance à la compression sur les adobes et les éprouvettes de mortier en terre, pour définir leurs résistances à la compression, modules de Young et déformations avant assemblage, alors que le deuxième axe se base sur la construction de neuf murets A, B et C (trois murets pour chaque type d'adobe : a, b et c), et l'expérimentation sur ces derniers pour définir leurs modes de rupture, modules de Young, résistances à la compression et déformations. A la fin, nous fournirons une formule analytique donnant le module de Young d'une maçonnerie en adobe en fonction des propriétés mécaniques de ses constituants (brique et mortier) déterminés avant assemblage.

Mots clés : Adrar, zone aride, matériaux locaux, adobe, mortier, muret, résistance à la compression.

Abstract

Raw earth is a building material that has been used for millennia. Its thermal aspect is characterized by a thermal inertia allowing both the accumulation and the release of heat. The raw earth masonry presents the essential element that envelops the structure. It offers the thermal, hygrometric and sound insulation of the structure, and a mechanical resistance which, with regular maintenance, can react to bad weather and wind. Also, it responds to the concepts of sustainable development, bio habitat, and low consumption buildings (BBC).

In this work, we are interested in the enhancement of raw earth masonry, particularly in adobe, in the Adrar study region, which is located in an arid zone characterized by a dry and hot climate. First, we identify local materials, dune sand and clay, available in inexhaustible quantity in Adrar. Then, we carry out an open-air construction site where we manually manufacture more than 120 adobe bricks divided into three types: a, b and c for the realization of the models in earthen masonry. Afterwards, the experimental campaign is divided into two axes: the first axis is intended for the mechanical tests of the resistance to compression on the adobes and the specimens of mortar in the ground, to define their compressive strength, Young's modulus and deformations before assembly. While the second axis is based on the construction of nine low walls A, B and C (three low walls for each type of adobe: a, b and c), and experimentation on the latter to better understand their mechanical behavior: modes of rupture, Young's modulus, compressive strength, deformations. At the end, we provide an analytical formula giving the Young's modulus of adobe masonry according to the mechanical properties of these constituents (brick and mortar) determined before assembly.

Key words: Adrar, arid zone, local materials, adobe, mortar, wall, compressive strength

ملخص

التربة هي مادة بناء تم استخدامها منذ آلاف السنين. تتميز خصائصها الحرارية بالقدرة على تجميع وتوزيع الحرارة في نفس الوقت. وتمثل الجدران الترابية العنصر الأساسي الذي يغلف المبنى. فهي تقي المبنى من الحرارة، الرطوبة والاصوات الخارجية، وكذلك من القوى الميكانيكية ومختلف الظواهر الجوية، وهذا بصيانتها دورياً. كما ان البناء الترابي يستجيب لمفاهيم التنمية المستدامة، البناءات الصديقة للبيئة والمباني منخفضة الاستهلاك.

في هذا العمل، نهتم بتحسين البناء بالتربة الخام، خاصة بالطوب، في منطقة الدراسة أدرار، التي تقع في منطقة تتميز بمناخ جاف وحار. أولاً، قمنا بتحديد المواد المحلية، الرمال القادمة من الكثبان الرملية والطين المتوفرة بكميات كبيرة في أدرار. بعد ذلك، قمنا بتنفيذ موقع بناء في الهواء الطلق حيث قمنا بتصنيع أكثر من 120 طوبة يدوياً مقسمة إلى ثلاثة أنواع: a ، b ، c. بعد ذلك ينقسم الجانب العملي إلى محورين: المحور الأول مخصص للاختبارات الميكانيكية لمقاومة الضغط على الطوب وعينات الملاط لتحديد خواصها الميكانيكية: قوة الضغط، معامل Young والتشوهات قبل التجميع (أي الخواص خارج الجدران). بينما يعتمد المحور الثاني على بناء تسعة جدران A, B و C (ثلاثة جدران لكل نوع من الطوب: a ، b ، c) و تطبيق الاختبارات الميكانيكية لفهم سلوكها بشكل أفضل: أنماط التمزق ، معامل Young ، قوة الضغط ، التشوهات ، إلخ. في النهاية، نقدم معادلة تحليلية جديدة تعطي معامل Young للجدران المبنية بالطوب وفقاً للخصائص الميكانيكية لمكوناتها (الطوب والملاط) التي تم تحديدها قبل التجميع (قبل بناء الجدران)

الكلمات المفتاحية

المواد المحلية، الطوب، الملاط، الجدار، قوة الضغط، مناخ جاف، أدرار

Liste des symboles et abréviations

Symbole	Signification
a, b, c	Les trois types de brique de terre crue confectionnés manuellement et destinés à la campagne d'essais préconisée pour cette étude
σ_b, $\sigma_{b,a}$, $\sigma_{b,b}$, $\sigma_{b,c}$	Les résistances à la compression dans le domaine élastique des briques de terre crue de type a, b et c respectivement.
ϵ_b, E_b, ΔL_b	Les déformations, le module élastique et le déplacement en millimètre des briques de terre crue.
f_b	La charge maximale de rupture en kN
S_b	La section de la brique
σ_m, ϵ_m, E_m, ΔL_m	La résistance à la compression, les déformations, le module d'élasticité et le déplacement en millimètre du mortier en terre
R	Le coefficient de corrélation des courbes contrainte - déformation.
A, B et C	Les trois types de muret utilisés dans cette étude.
F	La charge appliquée par la machine d'essai sur les murets
σ_M, E_M, ΔL_M, ϵ_M	La résistance à la compression, le module de Young, le déplacement, et les déformations de la maçonnerie.
σ_{Mexp}, E_{Mexp}, ϵ_{Mexp}	La résistance à la compression, le module de Young et les déformations de la maçonnerie, obtenus expérimentalement.
σ_{Manal}, E_{Manal}, ϵ_{Manal}	La résistance à la compression, le module de Young et les déformations de la maçonnerie, calculés analytiquement.
L_M, L_b, L_m	La longueur dans le sens vertical des murets, des briques et du mortier respectivement.
K	Coefficient de forme lié à la structuration et le type du bloc donné par la norme EN1996-1-1.
$\sigma_{M EN96}$	La résistance à la compression de la maçonnerie donnée par la norme EN1996-1-1.
P	La masse volumique des adobes déterminée par la méthode géométrique en kg/m^3
L x l x h	(Longueur x largeur x hauteur) : le retrait après séchage, de chaque unité d'adobe dans les trois directions
LDDI	Laboratoire du Développement Durable et de l'Information
EOLE	Eaux et Ouvrages dans Leurs Environnement
CRATerre	Centre de Recherches et Application Terre
CAPTerre	Centre Algérien du Patrimoine bâti en Terre
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
CNERIB	Centre National d'Etudes et des Recherches Intégrées du Bâtiment

Liste des équations

Equation	Signification
I.1	Le module de Young de la pierre donnée par CSA (2004)
II.1	La formule de Koo et Hendry, (1973) de la résistance à la compression d'une maçonnerie en fonction de celle du mortier et du bloc
II.2	La formule d'Ohler (1986) de la résistance à la compression d'un assemblage en fonction de ces constituants
II.3	La formule de The International Building Code Requirement for masonry structure MSGC (2002) de la résistance à la compression des assemblages en briques solides.
II.4	La résistance à la compression d'un assemblage donnée par l'Eurocode 96 (EN 96-1-1, 2005)
IV.1	La résistance à la compression des briques, obtenue expérimentalement, en MPa
IV.2	La résistance à la traction des éprouvettes du mortier de dimensions 4x4x16cm ³ , en Mpa
IV.3	La résistance à la compression des éprouvettes du mortier de dimension 4x4x16cm ³ , en Mpa
V.1	La résistance à la compression des éprouvettes du mortier, obtenue expérimentalement à partir de la courbe contrainte normale – déformation
V.2	Le module de Young de la maçonnerie en fonction de la résistance à la compression de la maçonnerie, en Mpa
V.3	Le déplacement de la maçonnerie en fonction de celui de la brique et du mortier
V.4	La résistance à la compression de la maçonnerie en fonction de la résistance de ces constituants
V.5	La résistance à la compression de la maçonnerie, de la brique et du mortier
V.6	Le module de Young, obtenu analytiquement, de la maçonnerie en fonction des propriétés mécaniques des briques et du mortier
V.7	Le module de Young, obtenu analytiquement, de la maçonnerie en fonction des propriétés mécaniques des briques et du mortier
V.8	La charge totale de construction en fonction de la charge permanente et la charge d'exploitation, en MN
V.9	La contrainte au niveau des fondations, en MPa
A3.1	La charge totale de la construction

Introduction générale

Au 21^{ème} siècle, la durabilité, l'économie et l'écologie sont les critères les plus recherchés dans n'importe quel type de construction. Le développement durable, qui est défini comme étant le concept qui répond aux exigences du présent sans compromettre la capacité des futures générations de répondre aux leurs (Semcha A., 2006), répond à ces exigences surtout si on connaît que le secteur bâtiment est parmi les secteurs les plus polluants de l'environnement, à cause de l'utilisation énorme des ressources naturelles et matières premières, accompagnée par la forte consommation des énergies, notamment l'énergie grise.

La maçonnerie est l'élément du bâtiment qui constitue l'enveloppe de la structure. Elle joue un rôle multiple dans l'isolation thermique, phonique, et hygrométrique du bâtiment, la résistance au vent, au séisme, etc. et donne un style urbanistique et architectural unique à chaque région. Elle est sans doute l'interface entre l'ambiance intérieure et extérieure qui doit répondre aux exigences techniques et réglementaires, et offre un certain niveau de confort aux occupants.

En Algérie d'après l'indépendance, la croissance démographique crée une crise remarquable dans la disponibilité des logements sociaux. Ceci a poussé l'état algérien à l'industrialisation dans le domaine de la construction, par l'importation des nouvelles techniques et matériaux constructifs et leurs implantations sur le territoire national sans prendre en considération le contexte de chaque région. Par conséquent, le domaine de la construction a subi une dégradation dans la qualité de l'habitat avant même qu'elles ne soient habitées ; l'absence de confort thermique et phonique, les dépenses énergétiques en matière de chauffage et climatisation, qui s'ajoutent à l'inadaptation au mode de vie des populations. Ceci pousse les recherches actuelles à reconsidérer les anciennes techniques et matériaux constructifs, avec plus de rigueur.

Aussi, dans la majorité des projets récents, la maçonnerie est souvent utilisée comme matériau de remplissage dans la construction de structure en béton armé. Dans les calculs, l'influence de la maçonnerie sur le comportement mécanique des bâtiments est couramment négligée en raison de l'absence d'une méthode de calcul pratique ainsi que d'un outil réglementaire approprié. Plusieurs d'autres pays dans le monde négligent cette influence, comme le Pérou, où le pourcentage de logements informels entre 2007 et 2014 dépasse le 70% (Tarque N. et Pancca-Calsin E., 2022). Cependant le remplissage en maçonnerie a une influence importante sur les caractéristiques des structures (Houti F., 2002). Il est donc nécessaire de connaître les défauts constructifs des murs,

Introduction générale

les caractéristiques et propriétés mécaniques de la maçonnerie, la variabilité des épaisseurs de mortier, etc. pour estimer la sécurité structurelle de l'assemblage (Tarque N. et Pancca-Calsin E., 2022). L'Algérie affiche un retard par rapport à d'autres pays qui ont élaboré leurs propres normes pour la construction en terre. Toutefois cet écart est minime grâce au fonctionnement de la réglementation qui reste ouverte sur les normes internationales étrangères pour leur éventuelle option (Abbou D., 2014). A l'heure actuelle, Il n'existe pratiquement aucune norme nationale concernant le comportement de la maçonnerie

Le Sud algérien, en particulier la région d'étude Adrar, représente un exemple typique dans l'utilisation des matériaux locaux pour la fabrication des maçonneries soit en terre crue telle que les briques de terre crue moulées connue par l'Adobe, Toub, Ottob, Thobe ou Banco (Doat P., 1979), soit conventionnelle comme le parpaing et les briques de terre cuite. Adrar est une commune et chef lieu de la wilaya du même nom, située au Sud-Ouest de l'Algérie. Elle se trouve dans une zone aride avec une vocation agricole aux endroits où il y a présence d'eau. Cette zone est caractérisée à la fois par son climat toujours très sec (Aubert G. (1960), Ouali S. et Baddari A. K. (2006), Bellal S.A. et Hadeid M. (2016)), et peu pluvieux avec des précipitations annuelles ne dépassent les 15 mm (Khezazna A., 2017),

La maçonnerie en adobe est l'une des techniques constructives traditionnelles en terre crue qui assure non seulement une protection à l'environnement, une durabilité et un bel aspect architectural, mais aussi répond aux concepts du bio habitat et de la construction bioclimatique. La construction en adobe représente dans la région d'étude, une technique ancienne qui tend actuellement à disparaître à cause des détériorations qui apparaissent sur les joints, les enduits, la maçonnerie elle-même, du besoin d'entretien périodique, et du non-respect des techniques de construction. Alors vient la maçonnerie en brique de terre cuite et parpaing qui tendent actuellement à remplacer celles à base de terre, malgré leur inadaptation au contexte thermique et de l'environnement, conduisant à des fissurations des constructions avant même qu'elles ne soient utilisées et enfin à des ruptures survenant prématurées.

Pour toutes ces raisons et ces fausses idées ainsi que pour une adaptation de la construction à son environnement, dans les régions à climats arides, nous consacrons ce travail à valoriser la maçonnerie traditionnelle en terre crue. Bien que cette dernière ait prouvé sa valeur en matière de longévité à travers les constructions millénaires encore fonctionnelles dans le monde. Nous

préconisons à Adrar la mise en valeur de la maçonnerie en adobe par une étude théorique, pratique et analytique du comportement mécanique de murets en adobe.

Cette étude va être menée en suivant une méthodologie résumée dans les points suivants :

- Le premier chapitre présente l'étude bibliographique à travers laquelle nous ferons le point sur l'état de l'art en rapport avec le sujet : les différents types de la maçonnerie à travers l'histoire, et le mortier ;
- Le deuxième chapitre donne les particularités de la maçonnerie en adobe, la situation de la construction en terre dans le monde en général, et dans la région d'étude d'Adrar en particulier, le comportement uniaxial de la maçonnerie sous des sollicitations uniaxiales de compression ;
- Le troisième chapitre cite les pathologies qu'affectent la maçonnerie en brique de terre crue ;
- Le quatrième chapitre est consacré au choix et caractérisation des matériaux de maçonneries à étudier. En premier lieu nous identifions les matières premières destinées à la confection des adobes et du mortier de terre, à savoir : le sable de dunes et l'argile d'Adrar. L'identification est effectuée au laboratoire LDDI de l'université d'Adrar. Ensuite nous passerons à la confection des adobes destinés à la construction des murets en 03 catégories : a, b et c. Ces dernières diffèrent dans leurs compositions, et sont soumises aux sollicitations verticales de compression. Les éprouvettes de mortier en terre de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, ont été aussi soumises aux essais mécaniques de compression. L'objectif de ce chapitre est de déterminer et comprendre le comportement mécanique des composants non encore assemblés de la maçonnerie.
- Le dernier chapitre présente le travail expérimental de la construction des murets, où neufs murets ont été construits au laboratoire EOLE de l'université de Tlemcen et soumis aux chargements uniaxiaux de compression selon les normes et les recommandations internationales sur la maçonnerie. A la fin, nous présentons une formule analytique reliant le module de Young de la maçonnerie en terre en fonction des propriétés mécaniques des constituants (adobe, mortier) déterminées séparément avant assemblage.

Chapitre I : Les types de maçonnerie

I.1. Introduction

La maçonnerie est considérée comme la technique de construction la plus répandue dans la confection du bâti rural. Elle n'utilise pour l'essentiel que des petits éléments hourdés au mortier, donc elle ne nécessite pas de moyen de manutention important (Merlet J. D., 1996).

A travers l'histoire, et après avoir découvert la maçonnerie en pierre massive, qui est la première technique constructive utilisée par l'être humain, vient la maçonnerie en terre crue, qui est présente dans toutes les civilisations : Perses, Assyriennes, Egyptiennes, Babyloniennes... Les arches de Ctésiphon en Irak, les pyramides et mastabas à Saggara en Egypte, les ruines de Chan-chan au Pérou, le Parc National de Mesa Verde dans le sud-ouest des Etats-Unis ... sont des exemples qui restent présents aujourd'hui et montrent leur durabilité et résistance (Doat P., 1979). En 2500 ans avant J-C la terre a été cuite pour la première fois. Les premières briques cuites ont été produites dans des fours traditionnels dans la Mésopotamie (actuel Irak). Ensuite vient la construction avec les produits cimentaires.

La maçonnerie comme tous les éléments de la construction, peut subir des détériorations, des fissurations, des problèmes thermiques, hygrométriques et acoustiques. Les recherches effectuées sur la maçonnerie sont nombreuses et diverses. D'une part elles traitent les avantages du matériau terre et la solidité des matériaux conventionnels et d'autre part, les phénomènes néfastes qui peuvent influencer sur la résistance de la maçonnerie et par conséquence, diminuer leur durée de vie.

Dans cette partie nous ferons une étude bibliographique sur les différents types de maçonnerie en terre crue, en terre cuite, et en aggloméré de béton. Nous donnons un historique pour chaque type de maçonnerie, ainsi que les matériaux utilisés, leurs proportions, et les propriétés mécaniques. Également, nous présentons l'influence du mortier sur les caractéristiques mécaniques d'un assemblage.

I.2. Les types de maçonnerie

De nombreux types de maçonnerie sont développés à travers le monde. Ils diffèrent dans leurs compositions, dans les moyens de fabrication, ainsi que dans les techniques d'élévation des murs. A travers l'histoire, nous soulignons que la maçonnerie en pierre et en terre crue présente une particularité remarquable qui se résume par :

- Elles se caractérisent par leurs grandes dimensions (pierre, pisé, bauge),puisque'à l'époque ancienne la maçonnerie était utilisée comme élément porteur et décoratif à la fois, pour assurer la rigidité, la stabilité et en plus del'esthétisme à la construction;
- Elles utilisent des matériaux disponibles sur place, etne consomment aucune énergie non renouvelable ni polluante ;
- La construction traditionnelle représente une image d'entre-aide collective, qui traduit une solidarité entre les différents composantes sociales, et ce grâce à la tradition (exemple: la Twiza en Algérie, la décoration murale collective par les femmes à Kassena, la construction des cases Obus au Cameroun, etc.).

I.2.1. La maçonnerie en pierre

La pierre est utilisée comme matériau de construction depuis des milliers d'années. A l'époque, il s'agissait de gros cailloux de granit, de grès ou de calcaire. La pierre est utilisée d'abord pour les fondations des bâtiments de bois puis comme remplissage des murs, et après comme un élément de maçonnerie de base pour l'élévation des murs (photo I.1). Au XXème siècle le développement de nouvelles techniques et de nouveaux matériaux tels que la brique et le béton, marque le déclin de l'utilisation de la pierre dans la construction. Son usage se limite peu à peu au revêtement de façade des édifices prestigieux.

En Algérie, la pierre taillée équarrie est couramment utilisée dans tous les milieux : urbain et rural (photos I.2 et I.3), et notamment en montagne (dans les Aurès et en Kabylie), où elle est alternée avec un chaînage en branches de bois. Les murs en pierre calcaire sont les plus dominants. Ils se caractérisent par une résistance à la compression dépassant 13MPa, et un module élastique

de l'ordre de 9600MPa (Gharib T., 2015). Après la pierre calcaire vient le grès. On trouve aussi les maçonneries en pierre à plâtre (gypse) et en pierre à sable (Benouali H., 2015).



Photo I. 1 : Le Panthéon de Rome ; un édifice religieux antique en pierre situé sur la piazza della Rotonda, bâti en 27 av. J.-C.



Photo I. 2 : Palais Dar El Aziza à Alger, construit dans le XVI^e siècle, en pierre, brique, et plâtre, basse Casba d'Alger, Algérie.

Le mur massif est l'assemblage en pierre le plus fréquemment utilisé. On trouve les pierres assemblées en :

- Un seul appareil (une seule paroi) ;

- Double paroi dont la connexion entre les deux parements, est assurée par des «boutisses » qui traversent l'épaisseur de mur ;
- Deux parements séparés par un blocage de petites pierres ou de débris de carrière enrobés de mortier de chaux, Des boutisses assurent la liaison au niveaux de l'épaisseur du mur (Bonneterre M., 1989) (figure I.1).



Photo I. 3 : Construction en pierre à Kenadsa, Algérie, (Djeradi M. A., 2013).

Les types de pierres naturelles les plus utilisés et connues dans le domaine de la construction sont les pierres magmatiques (formés par solidification et refroidissement du magma comme : le granit), métamorphiques (prévenants des roches préexistants transformés par l'action de la température et la pression comme : le marbre) et les pierres sédimentaires (formés par dépôt et solidification de sédiments organiques ou minéraux comme : le calcaire, les grés) (Asselin P. et Vaxelaire J. L., (2016)).

Le tableau suivant (tableau I.1) résume les propriétés de quelques types de pierre, à savoir : la résistance à la flexion, la résistance à la compression, et la masse volumique.

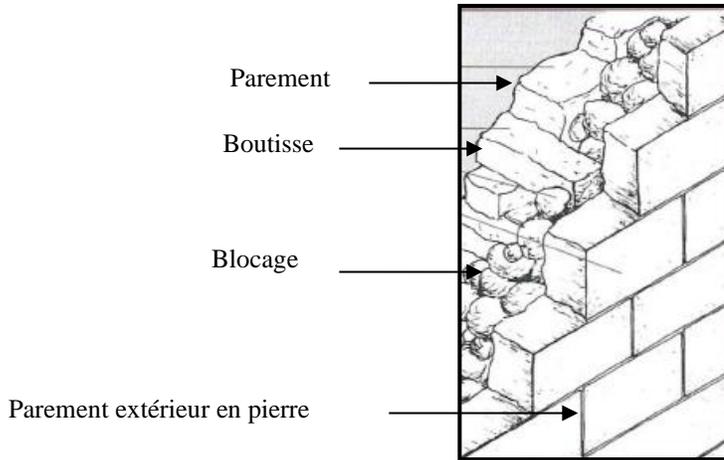


Figure I. 1: Assemblage d'un mur massif (en pierre), (Bonneterre M., 1989).

Tableau I.1 : Caractéristiques physico-chimiques des pierres naturelles, source : (Asselin P. et Vaxelaire J.L., 2016).

Pierre	Masse volumique (kg/m ³)	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)
Calcaire	1300-2700	2-17	5-275
Granit	2400-3000	8-25	150-225
Grés	1900-2700	3-14	30-250
Marbre	2600-2700	8-22	80-210

De même, la pierre est considérée comme le meilleur matériau de construction du point de vue thermique en comparaison avec les briques de terre et le parpaing de ciment (Matallah Z., 2016).

Le module de Young de la pierre peut être calculé par des formules empiriques, telles que la formule donnée par CSA (2004) :

$$E_c = (3300\sqrt{\sigma_c} + 6900)\left(\frac{\gamma_c}{2300}\right)^{1,5} \dots\dots\dots(I.1)$$

Où : E_c , σ_c et γ_c sont le module de Young, la résistance à la compression et la masse volumique de la pierre respectivement.

I.2.2. La maçonnerie en adobe

Pour plus de onze mille ans (Doat P., 1979) la maçonnerie en terre crue a été le seul matériau constructif utilisé par l'être humain. La maçonnerie en adobe présente non seulement un type de maçonnerie en terre crue qui existe presque dans tous les continents habités (ex : photo 4), et dans

les différents types d'habitations : publics, privées et monumentales, mais aussi c'est une technique de construction porteuse, recyclable, possédant une haute qualité thermique, et qui consomme une énergie grise près de zéro avec un coût inférieur à 30% à celui de la maçonnerie conventionnelle (Annexe 2). Sa résistance mécanique et son aspect hygrométrique quand elle est stabilisée permettent de la classer parmi les douze techniques constructives en terre crue regroupées dans la roue des techniques constructives élaborée par Houben H. et Guillaud H. en 1989. Aussi une vingtaine de centres historiques en adobe sont classés sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO comme Ghadamés en Libye, Toumboctou et Djénne au Mali, Alep en Syrie, Lima au Pérou, Mexico et Oaxaco au Mexique (Anger R. et Fontain L., 2010), et Shibām au Yémen (photo I.5) qu'elle est considérée comme la plus ancienne cité gratte-ciel dans le monde, construit dans le XVI^e siècle, et constituée de 8 étages atteignant 30m de hauteur (Portal L. M., 2013).

L'adobe est défini comme étant une brique de terre crue façonnée à la main ou moulée à l'état plastique, puis séchée au soleil (Anger R. et Fontain L., (2010); Doat P.,(1979)).



Photo I. 4 : Citadelle Grande KizKala date du VI^{ème} siècle avant J. C, Turkménistan, Asie (Anger R. et L. Fontain, 2010)

Le sud algérien est l'un des pays riches en patrimoine en terre crue et notamment en brique de terre crue. L'étude effectuée par le CORPUS en collaboration avec l'Euromed Hiritage sur la brique de terre crue dans 13 pays méditerranéens, montre que ce type de maçonnerie traditionnelle en Algérie possède une dureté d'environ 4 à 5 (en l'absence de norme commune sur la dureté, le

CORPUS et l'Euromed Heritage ont considéré une échelle de 1 à 10 comme suit : craie : 1, granite : 10) (CORPUS, 2015).



Photo I. 5 : Shibam, le Manhattan du désert, Yémen (Portal L. M., 2013)



Photo I. 6: Maison en brique crue avec des ouvertures peu nombreuses et de petite taille, pour protéger du soleil, Tucson, Arizona, 1997, (Anger R. et Fontain L., 2010).

Certaines régions sont encore aujourd'hui des centres de vie tels que Ténès, Cherchell et Blida situés au Nord de l'Algérie (des logements en briques crues et pierre existent encore), et au Sud les oasis de Ziban, de Oud Righ, d'Oued Souf, du M'zab, de la Saoura, du Gourara (photo I.7), du Tidikelt, du Touat en Adrar, jusqu'au Tassili N'adger.

Les dimensions des briques en terre crue en Algérie varient de 30 x 10 x 10 cm³ à 40 x 20 x 15 cm³ (CORPUS, (2015)).



Photo I. 7: Maison privée, construite en adobe dans les 20 dernières années, Timimoune Algérie (Terki Y., 2013).

I.2.3. Le pisé

En comparaison avec d'autres techniques constructives en terre crue (adobe, torchis et bauge) âgées de plus de onze mille ans, le pisé est relativement récent, car il apparaît pour la première fois à Carthage, cité Phénicienne située en Tunisie et fondée en 814 avant J, C (Anger R. et Fontain L., 2010).

Le pisé consiste à construire des murs massifs par le compactage de la terre humide et pulvérulente dans des coffrages spéciaux. Le mur est composé de fines couches de terre de 10 à 20 cm d'épaisseur étalées et damées à l'aide d'un outil spécial appelé « le pisoir » (Anger R. et Fontain L., 2010). L'épaisseur du mur peut atteindre 50cm (El Nabouch R., 2015).

Ce type de maçonnerie présente les avantages suivants :

- Une rapidité dans la construction ;
- Un cout minime et une économie du bois ;
- Une bonne résistance thermique et à l'incendie, avec solidité et durabilité .

Un test sur chantier permet de définir la meilleure teneur en eau de la terre à pisé est recommandé par le CRATerre. Ce test consiste de lâcher une boule de terre d'une hauteur d'un mètre sur le sol (Doat P., 1979), et constater si :

- Elle se casse en 03 ou 04 morceaux, elle possède la bonne consistance ;
- Elle s'éparpille complètement, elle est trop sèche donc on ajoute de l'eau ;
- Elle reste en un seul morceau, elle est trop humide.

Dans les années 1980, le pisé, avec l'utilisation d'une terre stabilisée (chaux, ciment), devient dans le continent australien un procédé de construction moderne et industrialisé à grande échelle pour la réalisation de maisons individuelles, d'habitats collectifs, de grands ensembles hôteliers, de campus universitaires (photo I.8), d'usines, etc. (Anger R. et Fontain L., 2010).

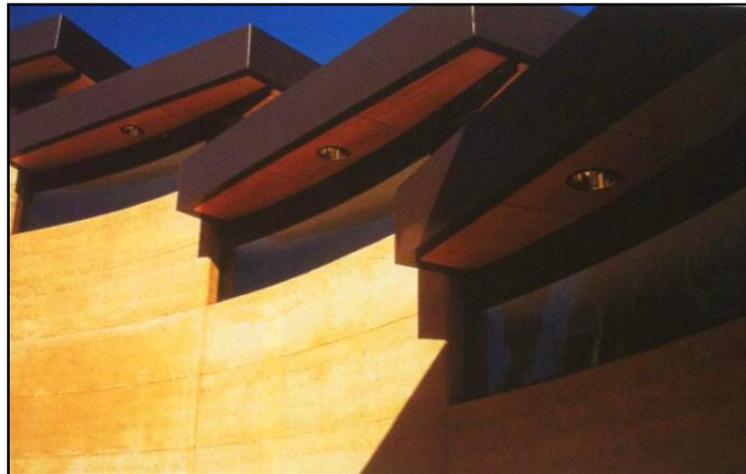


Photo I. 8: Bâtiment dans l'université Murdoch à Perth, Australie, (Anger R. et Fontain L., 2010)

La construction en pisé en Algérie entre le 16^{ème} et le 19^{ème} siècle est aussi bien remarquée dans les bâtiments militaires, religieux et publics, que dans l'architecture domestique. Le pisé est prédominant dans la ville de Cherchell, qui a été reconstruite par des immigrants andalous (venus d'Espagne) à la fin du 15^{ème} siècle (Chennaoui Y., 2015).

Les résistances à la compression de ce type de maçonnerie peuvent varier entre 0,5MPa pour des murs d'épaisseur 10cm (Hall M. et Djerbib Y., 2004) à 3,73MPa pour des murs d'épaisseur 50

cm (Miccoli L., 2014). Des expériences faites par le CRATerre sur des murs en pisé, donnent des résistances à la compression de 3,7MPa ; selon Doat P. (1979), le mur en pisé possède une dureté et une consistance équivalente aux pierres tendres de moyenne qualité.

Parmi les manuels et les codes qui dirigent la construction en pisé, nous citons :

- Le manuel de construction en terre de l’Australie (Walker P., 2002) ;
- New Zealand Standard (1998) ;
- New Mexico code (Tibbets J.M., 2001).

I.2.4. La bauge

C’est une technique porteuse monolithique qui permet de modeler des formes directement sans l’aide de moule ou de coffrage. Elle nécessite l’utilisation d’une terre plastique (15 à 20% d’eau), ou en façonnant la terre directement comme une poterie (Doat P., 1979).

Les proportions de chaque composant sont : 33% gravier, 33% sable, 33% argiles et limons (Galmiche V., 2019). Les dimensions courantes des murs sont : 10 à 30 cm d’épaisseur à la base, et 5 à 15 cm au sommet (I.9). Le montage des murs s’effectue sur des soubassements en pierre ou en brique de 50cm à 1m avec un mortier à la chaux ou à la terre (Galmiche V., 2019).

Les Cases Obus de Musgum, en Cameroun, présentent un exemple de la construction en bauge qui existent jusqu’à nos jours (photo I.10). Ces cases sont construites avec une hauteur de 9m et une forme aérodynamique qui diminue l’effet de l’impact des gouttes d’eau, ensuite les nervures décoratives contribuant à les ralentir et les dévier.

Cette technique est en disparition aujourd’hui. Son utilisation est limitée à la réhabilitation des anciennes constructions.



Photo I. 9 : Construction d'un mur en bauge, Gaoua, Pays Lobi, Burkina Faso (Terki Y., 2013)

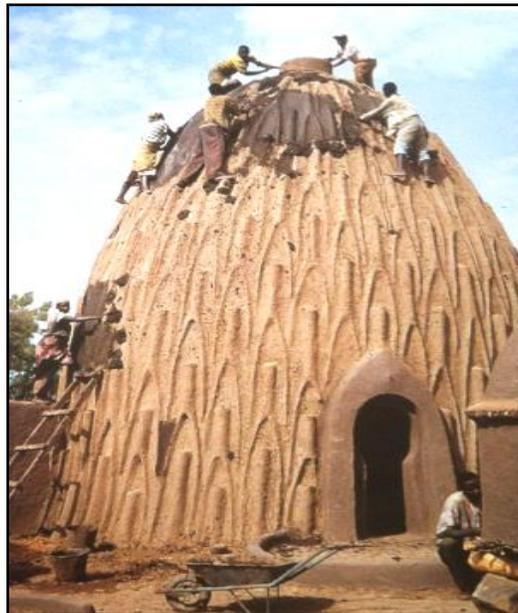


Photo I. 10 : Cases Obus de Musgum, Cameroun, (Anger R. et Fontain L., 2010)

I.2.5. Le torchis

C'est une technique très ancienne de remplissage d'ossature en bois (photo I.11), utilisée dans les régions riches en bois et pauvres en pierre. Les murs, d'épaisseur 30 cm à 35 cm (Galmiche V., 2019), sont constitués par un mélange de terre argileuse et de fibres végétales sur les deux faces de

panneaux ajourés, arrimés à la structure porteuse en bois et constitués d'un treillis de fines branches de bois souple.



Photo I. 11: Construction d'une maison en torchis.

Cette technique est employée aujourd'hui juste pour l'entretien, la réhabilitation et la restauration d'habitats existants.

I.2.6. Le Bloc de Terre Comprimée (BTC)

Selon la norme ARS 670-1996, le BTC est considéré comme un type de maçonnerie traditionnelle où on utilise des joints épais. D'autres auteurs le considèrent comme une technique récente développée dans les années 50 dans le cadre d'une recherche sur l'habitat rural en Colombie (CRA Terre, 1991). Aussi la norme XP P13-901, (2001) donne les spécifications, les méthodes d'essais et les conditions de réception des Blocs de Terre Comprimée. Ce type de maçonnerie a été employé après la deuxième guerre mondiale en France et en ex R.D.A (Doat P., 1979). Il présente une évolution moderne des blocs d'adobe, dont le principe est de compresser la terre pour améliorer ses caractéristiques.

a. La terre

La terre utilisée est humide et pulvérulente composée d'un mélange équilibré d'argile, limons, sables et petits graviers (Gauzin-Muller D., 2016). Si on prend comme exemple le BTC O (Ordinaire), le diamètre des grains ne doit pas dépasser 20 mm, et 6 mm pour un résultat optimal. Les dimensions nominales courantes sont 29,5x14x9 cm (Guillaud H.,1995).

Selon la norme ARS 680-1996 la terre sélectionnée pour la fabrication des BTC est comprimée à une teneur proche de la teneur en eau optimale. L'écart de 2% de la teneur en eau influe sensiblement sur la qualité des BTC.

D'après Maini S. (2005), les proportions adéquates pour un mélange du BTC sont : 15% gravier, 50% sable, 15% silt, 20% argile.

b. Dimensions

Les dimensions nominales les plus courantes des blocs de terre comprimée recommandées par le CRATerre sont (longueur x largeur x hauteur) (29,5x14x9) cm³; Ces dimensions sont compatibles à un poids unitaire variant entre 6 et 8 kg (CRATerre, 1995). Elles donnent un matériau manipulable et souple dans son utilisation pendant la construction.

c. La compression

C'est l'opération qui consiste à comprimer la terre dans un moule, suivit d'un démoulage immédiat du bloc. La qualité de compression est fonction de la quantité de la terre mise dans le moule (Doat P., 1979). Selon la norme ARS 680-1996 le compactage s'effectue après le remplissage d'un volume optimum du moule.

Il y a toujours une confrontation entre le type de presse et le mode de compression. Il existe plusieurs types de presses : manuelles, mécaniques, hydrauliques, pneumatiques. Le mode de compression peut être aussi bien statique que dynamique.

Le taux de compactage, qui représente le rapport entre le volume vide du moule et celui du bloc produit, ne doit pas être inférieur à 1,65 (Doat P., 1979).

d. La cure

C'est l'étape qui suit la compression de la terre dans le moule. Elle s'effectue généralement dans un endroit humide et chaud (Doat P., 1979), avec une durée qui change selon le climat et le stabilisant utilisé (CRATerre, 1995). Selon la norme ARS 680-1996, la cure est fonction des conditions hygrométriques locales et de la nature des BTC fabriqués (stabilisé ou non). Exemple : la cure des BTC stabilisés en ciment est entre 14 jours (obligatoire) et 28 jours, et pour le BTC stabilisé à la chaux est entre 30 jours (obligatoire) à 90 jours.

La cure se décompose en deux phases (ARS 670-1996) :

- La phase des réactions physico-chimiques : où se déroulent les réactions entre les différents constituants: particulièrement entre la terre et le stabilisant. Elle exige des conditions d'hygrométrie et de température bien déterminées et contrôlées ;
- La phase de séchage où est évacuée progressivement l'humidité par évaporation.

e. Avantages

Selon Maini S., (2005), la construction d'un mètre cube en blocs de terre comprimés stabilisés consomme 5 fois moins d'énergie que les briques coupées en fil (avant cuisson), et 15 fois moins que les briques cuites (tableau I.4). Aussi, les blocs de terre comprimés stabilisés sont 2,4 fois moins polluants que les briques coupées en fil, et 7.9 fois moins que les briques cuites.

Le tableau I.3 donne une comparaison de différents types de maçonnerie dans la consommation d'énergie lors de la fabrication et l'émission du CO₂.

Tableau I.2 : Analyse comparative de la consommation d'énergie et l'émission de CO₂ de quatre types de maçonnerie (Maini S., 2005).

Produit	Épaisseur (cm)	Nombre d'unités par 1m ²	Energie de consommation (MJ/m ²)	Emission de CO ₂ (Kg/m ²)
BTCS	24	40	110	16
Brique coupée en fil (wirecut brick)	22	67	539	39
Brique cuite	22	112	1657	126
Bloc de béton	20	30	235	26

Le BTC possède d'autres avantages (Guillaud H., 1995 ; CRATerre, 1995 ; CRATerre, 1991) :

- La compression de la terre améliore la densité des blocs et par conséquent améliore sa résistance à la compression, à l'érosion et à l'action de l'eau ;
- La phase de compression donne une amélioration des caractéristiques de la terre et de la qualité finale du produit par rapport aux techniques constructives traditionnelles ;
- Ce type de maçonnerie est généralement soumis à des procédures de contrôle de qualité qui répondent aux exigences des normalisations des produits de construction ;

- Grâce à la compression de la terre, le BTC présente une forme plus régulière que celle de l'adobe avec des arrêts vives ;
- Il est possible d'utiliser le BTC sans enduit grâce à leur propriétés améliorées par la compression;
- Il se pose comme un élément de remplissage dans une structure poteau-poutre, et comme un matériau principal porteur (Exemple: le projet de 10 logements en BTCS à Adrar, construits entre 1986 et 1991).

f. Inconvénients

- Le manque de la main d'œuvre et l'absence de connaissance de ce type de maçonnerie en plus de l'insuffisance de la formation des équipes de production et de contrôle de qualité (Guillaud H., 1995);
- Le procédé de production est long et nécessite des machines souvent chères (Gauzin-Muller D., 2016);
- La logistique de production et de transport rend le BTC moins économique et moins écologique (Gauzin-Muller D., 2016);
- A l'échelle industrielle, le BTC est moins économique que les briques de terre crue et même les briques cuites. Exemple : à Auroville, un mètre cube d'un mur en BTC stabilisé est 48,4% plus coûteux que les briques pleines coupées en fil et 24% plus coûteux que les briques cuites (Maini S., 2005).

g. Résistance mécanique

Le BTC non stabilisé a une capacité plus élevée à régulariser l'humidité ambiante, et une résistance mécanique élevée, mais une faible durabilité à l'action de l'eau. Ils perdent 70% de leurs poids après une immersion pendant 10min dans l'eau (Bruno A. W., 2019). Alors ces derniers peuvent être stabilisés avec du ciment, pour lutter contre leur hydrophobie, et pour améliorer leurs caractéristiques sous l'action de l'eau. Selon leur composition, les BTC présentent une résistance entre 1 et 4 MPa (Guillaud H., 1995). S'ils sont stabilisés (au ciment par exemple) cette résistance peut dépasser 6 MPa (Xinlei Y. et Hailiang W., 2019). Le BTC se considère comme une maçonnerie porteuse, contrairement des blocs de béton perforés et des bétons cellulaires. Aussi, les

murs en BTC présentent une résistance à la compression dépassant 2MPa (Xinlei Y. et Hailiang W., 2019).

I.2.7. La brique de terre cuite

C'est en 2500 avant J-C, dans la Mésopotamie, que les briques sont cuites pour la 1^{ère} fois, mais avec des procédés traditionnels (photo I.12). La 1^{ère} production industrielle des briques cuites débute en 1858 avec l'introduction du four d'Hoffman (Fouchal F., 2006).

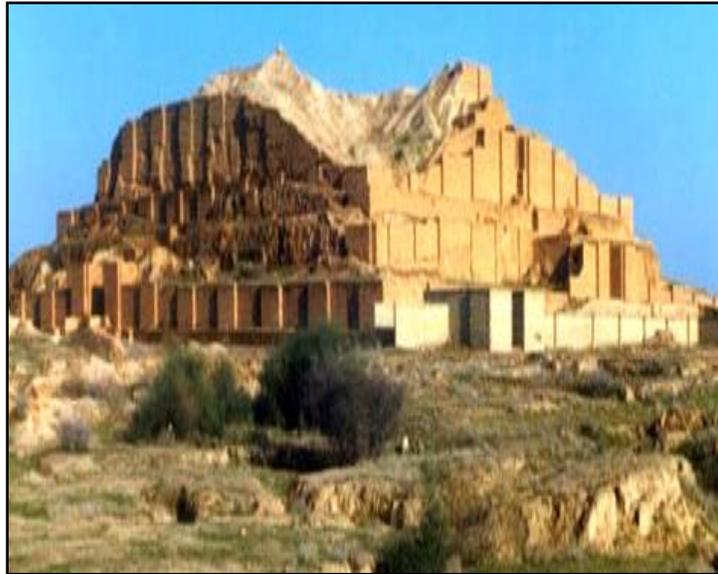


Photo I. 12 : La ziggurate de ChoghaZanbil en brique cuite, Iran.

a. La cuisson

Les briques, sous des températures élevées (900 et 1050°C) subissent des modifications et transformations de la masse volumique, de la porosité, des dimensions, etc. Cette chaleur provoque des déshydratations, des décompositions et des liaisons qui modifient les propriétés comme suit (Alviset L., 1994) :

- A 200°C, évacuation de l'eau résiduelle de séchage;
- De 200 à 450°C, décomposition de matières organiques ;
- De 450 à 650°C, destruction des minéraux argileux et départ de l'eau de constitution ;

- De 650 à 750°C, décomposition du carbonate de chaux (cas des argiles calcaires) ;

A la température de cuisson, les fondants contenus dans la terre entrent en réaction et communiquent aux briques leurs qualités mécaniques définitives c'est le « grésage », qui s'accompagne d'une baisse de porosité et l'apparition d'un retrait (retrait de cuisson de 0,5 à 3 % environ par rapport à la longueur sèche).

b. Caractéristiques

Le tableau suivant (tableau I.4) donne les caractéristiques mécaniques de la brique cuite creuse et pleine (Hendry A., 1997).

La résistance en compression des briques cuites ne dépend pas du processus de séchage au four ou bien à l'air (Sathiparan N. et Rumeshkumar U., 2018).

Tableau I.3 : Caractéristiques mécaniques des briques cuites creuses et pleines (Hendry A., 1997)

Texture	Masse volumique (kg/m³)	Module élastique (MPa)	Coefficient de Poisson	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la traction (MPa)
Calcaire	2000-2600	45000	0.2	5-25	25
Béton	2400	40000	0.3	10-40	4
Brique creuse	3000	5000	0.3	20	8
Brique pleine	3000	15000	0.2	40	4

Les briques sont fabriquées à partir d'argile généralement rouge à la cuisson (sauf les argiles calcaires qui deviennent jaunes et blanches à la cuisson), sous des températures de 900 à 1050°C (Alviset L., 1994). Elles peuvent être des blocs pleins, des briques pleines et perforées ou creuses.

- ✓ *Briques pleines et perforées* :Elles se présentent sous forme d'un parallélépipède rectangle, et possèdent une masse qui varie de 1,8 à 2,5 kg. Elles ont une masse volumique qui doit être supérieure à 1400 kg/m³, généralement entre 1700 à 1900kg/m³, et la section cumulée des perforations éventuelles ne dépasse pas les 40% de la section brute totale du produit (Alviset L., 1994).
- ✓ *Briques creuses* :Les briques creuses comportent des perforations, dont la section totale dépasse 40 % de la section du produit.

- ✓ *Blocs perforés* : ils sont à perforations verticales. On distingue les blocs perforés à enduire et les blocs perforés destinés à rester apparents.

Aussi, il existe : les briques de laitier et les briques silico-calcaires (Fouchal F., 2006) :

- ✓ *Les briques de laitier* : elles sont obtenues par le mélange de laitier et de liant (chaux grasse, chaux de laitier, etc) sous pression de 30 MPa, et suivant des procédés mécanisés. Les briques de laitier pleines présentent des résistances à la compression de 15MPa, et des résistances à la traction qui varient entre 6 et 12MPa ;
- ✓ *Les briques silico-calcaires* : elles sont obtenues par le mélange de 90% de la silice et de la chaux grasse sous une pression de 30MPa. Puis ce mélange est soumis à un jet d'une vapeur d'eau sous pression pendant plusieurs heures (autoclavage). Elles ont des résistances à la compression de l'ordre de 7MPa pour des densités de 0,8 et de 60 MPa pour des densités de 2,2.

La résistance à la compression de la brique de terre cuite diminue avec l'évolution des taux d'humidité, cela est montré par El faghir F. (2013) qui donne comme solution l'ajout des stabilisants chimiques. La sensibilité des briques en terre cuite à l'humidité a été aussi étudiée par Franzoni E. (2015) et Endo Y. (2020). Aussi, lorsque ces briques sont saturées en eau, elles présentent une diminution de 15% de leur résistance à la compression (Sathiparan N. et Rumeskumar U., 2018).

I.2.8. Les produits en béton

Ils constituent avec les briques cuites la plupart des maçonneries utilisées en Algérie. Les blocs du béton creux peuvent être utilisés pour toutes les parois du bâtiment sans distinction. Les murs en blocs du béton creux présentent des résistances à la compression de l'ordre de 1,5MPa (Houti F., 2002). La maçonnerie en blocs du béton cellulaire autoclavés connus par « les blocs silico-calcaires légers », présente des résistances de 4,3 MPa (Lateb M., 1995) à 4,8 MPa (Houti F., 2002).

I.3 Le mortier

Le mortier contribue à la transmission et à la distribution des charges dans la maçonnerie. Sa résistance est influencée par deux phases : la phase de préparation, et la phase finale de durcissement (Fouchal F., 2006).

Aussi, les mortiers sont classés en deux catégories : les mortiers à joints épais, et les mortiers à joints minces. Ces deux classes différentes dans leur composition qui est définie en fonction de : l'absorption d'eau du matériau de maçonnerie associé, les caractéristiques mécaniques du matériau de maçonnerie, et les charges que l'ouvrage aura à supporter (Merlet J-D, 1996).

La préparation d'un mortier doit être effectuée selon les normes, tout en respectant la quantité de l'eau de gâchage, pour assurer la fluidité, la maniabilité, et diminuer les effets préjudiciables du durcissement du mortier dans l'assemblage brique-mortier (Paulay T. et Priestley M., 1992), notamment la capacité de succion des briques (Lateb M., 1995).

L'influence du mortier sur le comportement de la maçonnerie a été étudiée par Farag M. F., (2017) ; il a mis en évidence que l'application d'un mortier stabilisé de 2% à 5% de ciment peut augmenter la résistance et la durée de vie du mortier et en conséquence de la maçonnerie. Fang Wu (2013), trouve que la résistance à la compression, le module de Young et le coefficient de Poisson des prismes en adobe sont influencés par le rapport entre la résistance du mortier et du bloc. Aussi, Binda L. (1988), trouve que l'augmentation de la résistance à la compression du mortier augmente la résistance globale de la maçonnerie et réduit le déplacement vertical.

Contrairement aux études de Quagliarini E. (2010) et Illumps R. (2011), qui ont trouvé que le chargement vertical n'a pas une influence sur les joints de mortier de l'assemblage, Fishburn C. C. (1961) qui a étudié l'influence du mortier sur la résistance de la maçonnerie, trouve que cette influence est limitée. Il constate que l'augmentation de la résistance du mortier de 130% augmente celle de la maçonnerie de 10%. Ces résultats sont en concordance avec ceux de Lateb M. (1995) et Bennett R.M. (1997).

I.4. Conclusion

Dans le but de valoriser la construction en terre, ce premier chapitre a eu pour but de citer les différents types de la maçonnerie qui existent dans le monde. Nous avons résumé les maçonneries de la pierre massive, le premier matériau constructif utilisé par l'être humain, de la pierre taillée en petits éléments, utilisée jusqu'à nos jours ainsi que l'adobe, la bauge, le torchis, le pisé et le BTC qui marquent leur retour dans le domaine du génie civil malgré la prépondérance des produits de béton et de terre cuite. Ces modes constructifs présentent des systèmes de construction porteurs

sauf le torchis qui présente un système de remplissage d'ossatures. Ces modes constructifs se différencient dans l'état d'humification de la terre utilisée (plastique pour l'adobe et la bauge, humide et pulvérulente pour le torchis, le BTC et le pisé), dans les moyens de façonnage et dans les procédés d'élévation des murs. Dans la suite de ce chapitre, nous présentons l'influence du mortier sur la résistance mécanique d'un assemblage. Alors que le chapitre suivant va être consacré à la construction en terre crue en particulier en adobe.

Chapitre II : La construction en terre

II.1. Introduction

Les structures en maçonnerie se distinguent par les matériaux de construction utilisés, les systèmes constructifs et la conception architecturale. Ce chapitre présente une introduction générale sur la maçonnerie en terre, en particulier sur la maçonnerie en adobe qui est l'intérêt de notre travail expérimental. Aussi, nous traiterons la stabilisation des maçonneries en terre, et le comportement mécanique des maçonneries sous les sollicitations uni-axiales de compression.

II.2. Les propriétés de la brique de terre crue

A travers l'histoire, les briques d'adobe, connues aussi par toub, banco ou briques de terre crue prennent plusieurs formes : conique, cylindro-coniques, en demi-sphère, dentiforme, et en fin en parallélépipède (Doat P., 1979).

Zami M. S. et Lee A., (2009) estiment qu'approximativement la moitié de population du globe habite dans des maisons en terre. En 2021 cette proportion est diminuée à 10% dans le monde, et à environ 25% dans les pays en cours de développement (Marsh Alastair T. M. et Yask K., 2021)

Bada A. (2016) trouve que l'augmentation des taux de chaux améliore les propriétés thermiques des adobes mais réduit leurs résistances mécaniques. Il a constaté qu'un taux de 8% de ciment permet d'augmenter la résistance à la compression des adobes jusqu'à 15MPa mais avec une réduction dans la résistance thermique.

A l'échelle des propriétés énergétiques, Shukla A. (2009) a trouvé que l'entretien d'une maison en adobe permet d'économiser de 370 GJ d'énergie par année, par rapport aux matériaux conventionnels, et la réduction de 101 t/an des émissions du gaz carbonique CO₂, qui polluent l'environnement.

Les études sur les propriétés hygrométriques montrent que les enduits en terre absorbent la vapeur d'eau 3 fois plus qu'un enduit à la chaux et 10 fois plus qu'un enduit en plâtre (Morton T.,

2005). Alors qu'un mur en brique de terre crue extrudée d'une épaisseur de 15 cm est capable d'absorber environ 120 g d'eau par mètre carré de surface de la paroi en 12 heures (Morton T., 2005). Les propriétés hygrométriques ont été aussi étudiées par Giuffrida G. (2019). A travers une étude bibliographique sur les propriétés hygrothermiques des matériaux en terre crue : adobe, cob (bauge), briques extrudées, pisé, et BTC, nous pouvons retenir l'essentiel des avantages des briques de terre.

Également, la terre n'est pas un matériau isolant, contrairement aux idées reçues. Elle possède une excellente inertie thermique. Ceci se traduit par une régulation des différences de températures intérieures et extérieures. Bassoud A. (2016), a montré que les adobes stabilisés avec un taux de 25% de fibres de palmier permettant de réduire la conductivité thermique jusqu'à 30%.

II.2.1. Les dimensions des briques d'adobe

Les dimensions des briques sont très variables, et dépendent des habitudes locales des populations :

- **Les briques de grande dimension** : L'avantage de construire avec des briques de grandes tailles est que ces dernières rendent les murs plus solides et plus faciles à monter, mais elles prennent une longue durée de séchage et risquent de se fissurer. En outre, elles sont lourdes à manipuler (figure II.1). Les exemples les plus représentatifs sont : les briques de la civilisation Babylonienne de $40 \times 40 \times 10 \text{ cm}^3$, les « Penthadoron » de la civilisation grecque qui ont des côtés de près de $\frac{1}{2} \text{ m}$ ($45 \times 45 \times 8 \text{ cm}^3$), les briques « Lidiennes » rectangulaires de $50 \times 33 \times 8 \text{ cm}^3$, les briques du Pérou de $50 \times 24 \times 16 \text{ cm}^3$, et les briques aux USA et en Australie qui dépassent le $\frac{1}{2} \text{ m}$ avec $53 \times 25 \times 9 \text{ cm}^3$ et $61 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ successivement (Doat P., 1979).

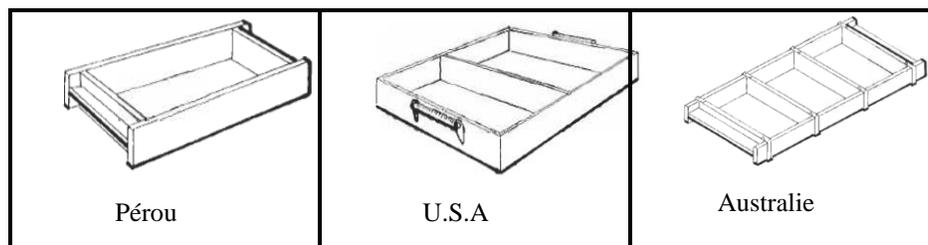


Figure II. 1 : Exemple de moules traditionnels à adobe de grande dimension pour certains pays du monde, (Doat P., 1979).

- **Les briques de petites dimensions** : ce sont des briques de petites tailles, facile à manipuler d'une seule main, mais elles prennent une longue durée dans la mise en œuvre, et demandent des quantités de mortier plus élevées (figure II.2).

Les exemples les plus représentatifs sont les briques « Tétraderon » fabriquées par les Athéniens dans la civilisation grèque de $30 \times 30 \times 10 \text{ cm}^3$, les briques en Allemagne de $25 \times 12 \times 6,5 \text{ cm}^3$, les briques d'Afrique du Nord de $35 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ ou bien $40 \times 20 \times 15 \text{ cm}^3$ dans le Sud algérien, de $20 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ en Tunisie et de $22 \times 14 \times 11 \text{ cm}^3$ en Egypte.

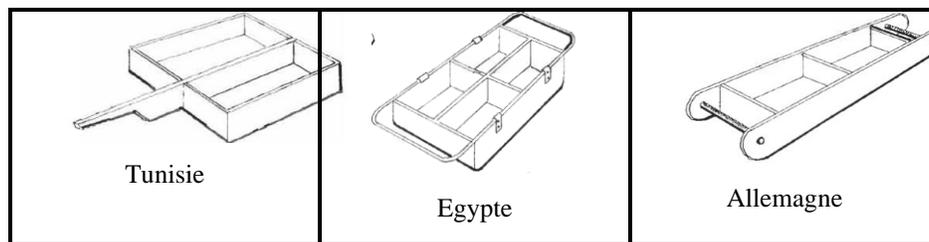


Figure II. 2 : Exemple de moules traditionnels à adobe de petite dimension pour certains pays du monde, (Doat P., 1979).

II.2.3. La terre pour adobe

La terre utilisée est relativement fine et ne contient ni cailloux, ni graviers, car la terre est malaxée et moulée à la main. Les proportions proposées par le Centre des Recherches et d'Application Terre CRATerre sont : entre 55 et 75% de sable, 10 à 18% de limons et 15 à 18% d'argile (Doat P., 1979). Les fibres peuvent être ajoutées si la terre le nécessite.

La terre sableuse ne nécessite pas de fibres, contrairement à une terre très argileuse, où nous pouvons utiliser jusqu'à 30% de fibres pour diminuer les fissurations de retrait (Galmiche V., 2019).

En général, la terre absorbe entre 20% à 30% d'eau en fonction du type de terre. Les briques d'adobe se produisent à l'état plastique. Cet état hydrique permet de donner à la terre une forme déterminée à l'aide d'un moule (Carazas Aedo W., 2003). La quantité d'eau peut être déterminée sur place à travers le test du sillon qui consiste à tracer un sillon en « v » de 8cm de profondeur dans le mélange. Il doit laisser une trace nette, et les parois tendent l'une vers l'autre sans se toucher (Doat P., 1979). Après malaxage la terre doit reposer pendant quelques jours (minimum 24h), c'est l'hydratation préalable traditionnelle de la terre connue par la fermentation. Elle a pour but de saturer les particules argileuses, détruire toutes les petites mottes de terre, facilite le mélange, améliore la qualité des briques et diminue les fissures de retrait.

II.2.4. Le moulage, le démoulage et le séchage des adobes

Le moulage manuel se fait avec une terre plastique, au contraire du moulage mécanique qui nécessite une terre liquide. Le moulage manuel s'effectue selon deux méthodes (Doat P., 1979) : le moulage à coup d'eau et le moulage à coup de sable.

Le 1^{er} consiste à jeter des boules de terre dans le moule disposé sur le sol, en commençant par les angles et en poussant la terre avec les mains. Cette méthode rend le démoulage facile, car l'effet de compactage crée un film d'eau lubrifiant entre le moule et la pâte. Dans la deuxième méthode dite à coup de sable, la terre est posée en une seule fois dans un moule à fond pouvant être amovible, muni de trous, ou des rainures, humidifié puis saupoudré de sable pour permettre un meilleur démoulage. Cette méthode fournit des adobes plus réguliers et plus résistants. Ensuite, les adobes doivent reposer au minimum 3 jours à l'air libre, de préférence à l'ombre pendant les 2 premiers jours pour éviter les fissures. L'aire de séchage doit être propre, nivelée et saupoudrée de sable. Il est conseillé de retourner les adobes tous les 5 jours pour accélérer le séchage.

II.2.5. Recommandations d'élévation des murs en adobe

Pour une bonne conception et réalisation d'une habitation en adobe, le CRATerre donne des règles et lois que nous essayons de résumer dans les points suivants (Doat P., 1979) :

- ✓ Les briques sont posées par assises continues, pour que les efforts soient répartis sur toute la longueur de la fondation et pour éviter les tassements des joints frais ;
- ✓ La longueur maximale d'un mur entre deux angles ne dépasse pas 6 m. Dans le cas contraire, les murs sont renforcés par des refends, des armatures, ou des contreforts tous les 5 m ;
- ✓ Les proportions d'un mur entre deux angles sont les suivantes : l'épaisseur étant de 1, la hauteur 8 et la longueur 12 ;
- ✓ Les ouvertures ne doivent pas dépasser 1/3 de la surface totale du mur, 1.2m dans la portée, et il faut une distance d'au moins 1m entre les ouvertures et les angles pour ne pas affaiblir ces derniers ;
- ✓ Comme pour les briques cuites, éviter la superposition de deux joints verticaux (coup de sabre) ;
- ✓ Mettre des liaisons solides entre les briques au niveau des angles.



Photo II. 1 : Ksar El Kantara, Biskra, Algérie (Terki Y., 2013)

II.3. Caractéristiques de la construction en adobe dans la région d’Adrar

Le sud algérien, et particulièrement la région d’Adrar, représente un exemple typique dans l’utilisation des matériaux locaux pour la fabrication des maçonneries traditionnelles telles que les briques de terre crue moulées connue par Toubouconventionnelles, comme le parpaing et les briques de terre cuite. Adrar se trouve dans une zone aride avec une vocation agricole, cette zone est caractérisée à la fois par son climat peu pluvieux et très sec (Aubert G., 1960), avec des précipitations annuelles ne dépasse pas les 15mm (Khezazna A., 2017), et des températures moyennes maximales varient entre 46 et 50 °C (Bouchouicha K., 2019)

On rencontre plusieurs modes de construction en terre crue à Adrar. On cite à titre d’exemple :

- Le procédé de la terre empilée : des boules de terre sont empilées afin de réaliser des murs construits par tranches d’environ 1m de haut, séparées par un intervalle de quelques jours pour permettre un bon séchage.
- Le procédé de la terre couvrante : c’est pour la réalisation des toitures. La pratique de ce procédé nécessite la superposition de plusieurs couches de matériaux : des troncs de palmiers appuyés sur les murs latéraux, des feuilles de palmiers, un tapis de paille, et une couche de terre.
- Le procédé de la terre moulée (photo II.2): où les constructeurs utilisent des moules métalliques ou en bois.



Photo II. 2 : Mur en Toub avec un soubassement de 1m de hauteur en pierre, Adrar.

Aujourd'hui, il y a un retour au procédé de la terre moulée (la construction en adobe) soit pour des raisons économiques comme la construction des hangars, des espaces de stockage, etc., soit pour des raisons touristiques, ou même pour des raisons bioclimatiques à la recherche d'endroits naturels avec un certain confort thermique.

Les modes de construction en terre crue cités précédemment sont basés sur l'utilisation des terres disponibles généralement à proximité du chantier.

Aujourd'hui la construction en terre prend une enveloppe scientifique et cela par les recherches effectuées sur les matériaux locaux, sable de dunes et argile, disponibles en quantité inépuisable dans la région. Parmi ces études nous citons celles du Akacem M. (2016), Akacem M. (2018), Lamouri H. et Semcha A. (2019), Abbou M. (2016), Moulay Omar H. (2017) et Belaidi K. (2016).

Les Ergs, présentent la source du sable dans le Sahara. Ce sont des massifs dunaires qui occupent presque la moitié de la région d'Adrar, tels que le grand Erg occidental et l'Erg Chèch (Abbou M., 2016). Selon Benna Y. (2005), les sables dunaires sont venus de la désagrégation des roches sous l'effet des chocs thermiques et de l'altération des sols. Leurs localisations et ampleurs sont fonction de l'intensité et la direction du vent de sable.

Akacem M. (2016), trouve que les sables de dunes à Adrar sont des matériaux de nature siliceuse caractérisés par l'absence des particules fins. La courbe granulométrique illustrée dans la figure

II.3 présente une forte pente ce qui caractérise les matériaux à granulométrie étroite et à faible graduation. Aussi les sables de dunes se caractérisent par leur propreté et une porosité et surface massique élevées. Le tableau suivant (tableau II.1) résume les caractéristiques du sable de dunes d'Adrar données par Akacem M. (2018).

Tableau II. 1: Les caractéristiques du sable de dunes d'Adrar (Akacem M., 2018)

Paramètres	Densité (kN/m ³)	ES	%<0,08 (mm)	Mf
Sable de dunes	27,1	85	4	1,4

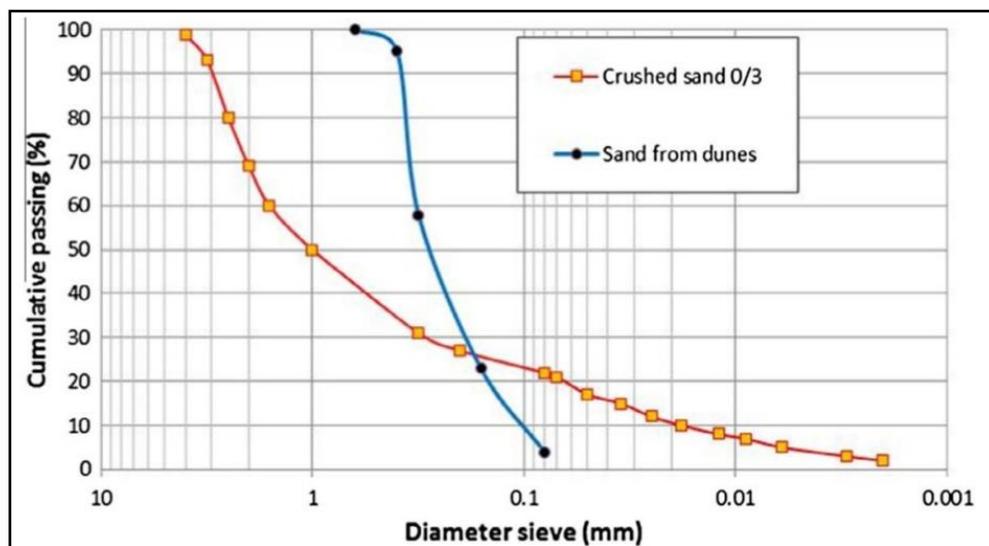


Figure II. 3 : Courbe granulométrique du sable de dune (Akacem M., 2016)

A Adrar, l'argile est considérée comme un matériau local. Les gisements d'argile se trouvent localisés le long des trois axes routiers : Adrar-Reggan, Adrar-Timimoune, et Adrar-Béchar. Les études sur l'argile d'Adrar (axe Adrar-Timimoune) montrent que c'est un matériau très plastique d'une activité normale proche du minéral Illite (Lamouri H. et Semcha A., (2019) ; Abbou M. (2016) ; Moulay Omar H. (2017) ; Belaidi K., (2016)). Les caractéristiques chimiques (tableau II.2) montrent que cette argile est apte à la production des produits rouges, et elle est considérée comme une matière première des matériaux cuits (Abbou M., 2016).

Tableau II. 2: Composition chimique de l'argile d'Adrar : axe Adrar-Timimoune (Abbou M., 2016)

Paramètre	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₃	Perte au feu	Cl
Argile d'Adrar (%)	58.19	13.32	6.13	3.12	3.67	0.35	3.96	0.2	0.11	10.14	0.024

Après avoir choisi la terre appropriée, les étapes à suivre pour la construction d'une habitation en adobe sont :

II.3.1. La confection des briques (adobes)

La préparation des adobes se fait avec des moyens rudimentaires. Un simple moule aux dimensions de la brique est utilisé. Le moule peut être métallique ou en bois, généralement sans fond pour faciliter le démoulage. Une plateforme de confection des adobes est préparée à même le sol sableux, sur lequel la brique est démoulée et laissée sécher sur place. Une fois séchée et durcie, l'adobe est stocké sur place pour les besoins du chantier.

II.3.2. Les fondations

Généralement, les sols d'assise des murs sont traités avec soin pour éviter les infiltrations des eaux qui sont le principal inconvénient. D'abord une tranchée est creusée dont les dimensions sont en rapport avec le mur projeté (la largeur varie être 0,5m à 1,5m, voir photo II.3). Aujourd'hui les pierres des fondations sont souvent liées par du béton.

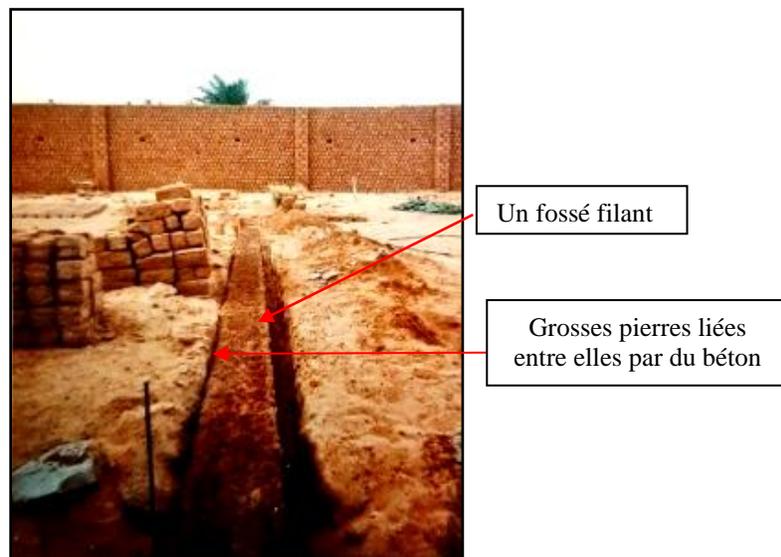


Photo II. 3 : Détails de fondation de la maison en adobe : semelles filantes en pierre locale de 0,5m de profondeur, Timimoune, Algérie.

II.3.3. Les soubassements

Les soubassements (photo II.4) constituent la continuité du mur de fondation, avec une hauteur entre 0,5m à 1m. Ils ont pour rôle de protéger l'habitat du sol, des rejets des eaux de pluie, et de la remontée capillaire. Ils sont réalisés en général par une maçonnerie au ciment en pierres résistant à l'eau et aux charges. Actuellement nous pouvons trouver des soubassements en briques de terre cuite ou bien en blocs du béton.



Photo II. 4 : Mur de clôture en adobe avec un soubassement en pierre, Timimoune, Algérie.

II.3.4. L'élévation des murs

Les murs qui sont généralement porteurs, ont une épaisseur de 35 à 50 cm d'épaisseur. Le principe est de poser les briques côte à côte, en variant leurs dispositions d'une rangée à l'autre (voir photos de la figure II.4).

Aujourd'hui, pour lutter contre les effets de l'humidité, et éviter la montée des insectes, à travers le mur, au bois du plancher, deux poutres (chainages) en béton armé de 20 cm de hauteur, sont posées le long du périmètre extérieur de l'habitation. La 1ère est posée directement sur le soubassement et la deuxième après avoir terminé l'élévation des murs extérieurs (figure II.5).

Les linteaux sont aussi réalisés par les troncs de palmier (Photo II.5).

Les ouvertures possèdent une grande épaisseur en fonction de l'épaisseur du mur (photo II.6). Dans les anciennes habitations en terre à Adrar, on trouve généralement des fenêtres de petites

dimensions mais qui ne sont pas nombreuses, permettant aux rayons solaires d'accéder au bâtiment, et diminuer l'infiltration de la poussière du vent de sable.

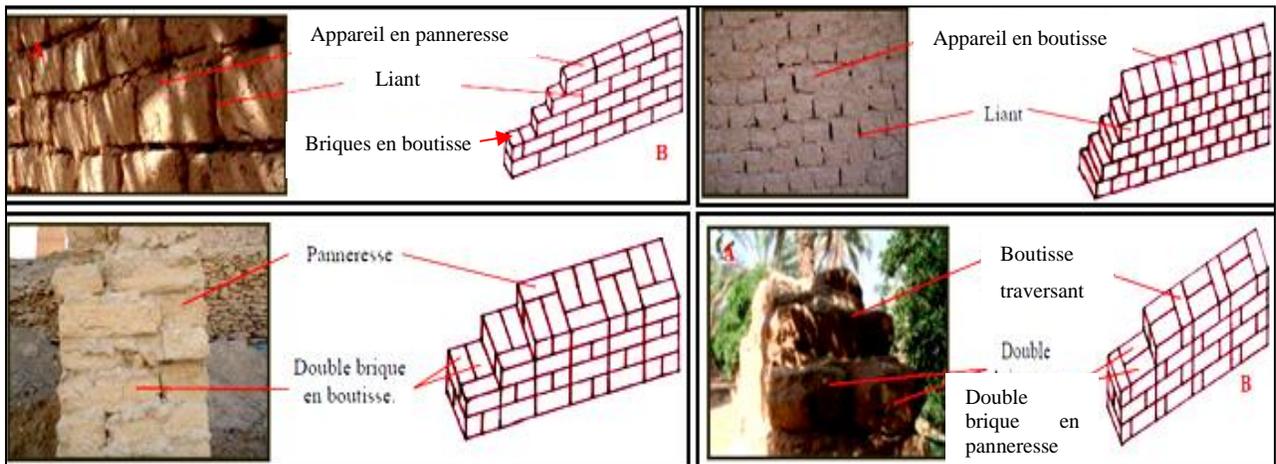


Figure II. 4 : Quatre variantes de construction d'un mur porteur en adobe, (Idir L., 2013)

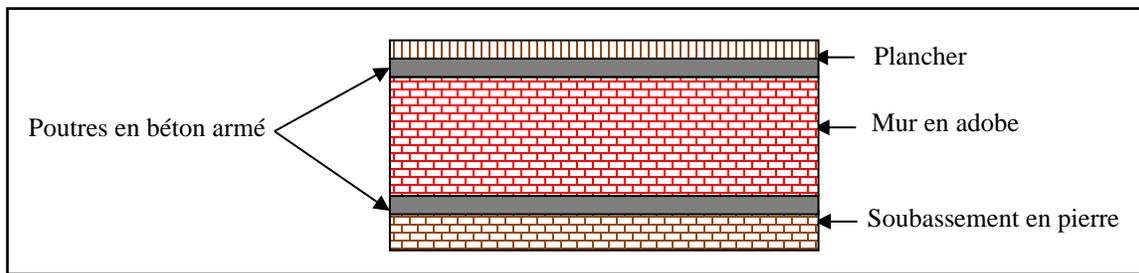


Figure II. 5: Nouvelle variante de construction d'un mur en adobe.



Photo II. 5: Linteau en troncs de palmier, CAPTerre, Timimoune, Algérie.

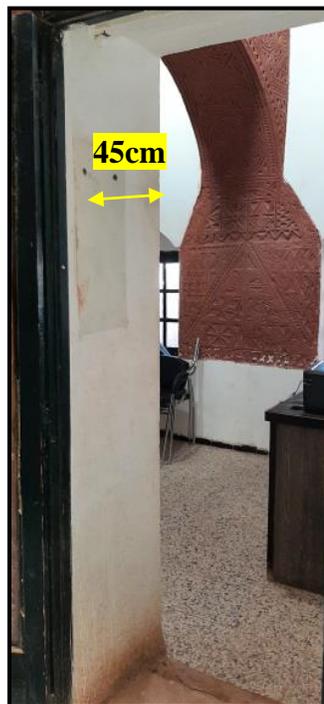


Photo II. 6 : Epaisseur des ouvertures dans les anciennes habitations.

II.3.5. Les planchers

Après séchage des murs, les planchers sont réalisés par la méthode de superposition des couches, avec une double ossature, principale et secondaire. Les couches constituant les planchers des constructions en terre à Adrar sont: une couche de troncs de palmier (ossature principale perpendiculaire aux murs) avec un intervalle régulier (photo II.7) reposant sur les murs, superposés d'une couche de branchages de palmier « kernaf » (photo II.8) ou bien en « Gsab » (ossature secondaire perpendiculaire aux poutres) (photo II.9), une couche de terre argileuse d'épaisseur 20 à 25 cm et une couche de finition constituée de mortier de chaux qui permet d'étanchéifier la surface.

Aujourd'hui un tapis plastifié peut être intercalé avant de poser la terre, pour éviter absolument l'infiltration des eaux, superposé d'une couche en mortier batard de 20 cm de hauteur. Après le séchage de la dernière couche, une couche de lait de chaux est posée pour fermer les fissures.



Photo II. 7 : Détails du plancher d'une maison en adobes réalisé en 1990, Timimoune, Algérie.



Photo II. 8 : Plancher avec une ossature principale en troncs de palmier et une ossature secondaire en branchage de palmier appelé « kernaf », CAPTerre, Timimoune, Algérie.



Photo II. 9 : Plancher avec une ossature principale en troncs de palmier et une ossature secondaire en « Gsab ».

La portée dans les anciennes constructions en terre est fonction de la longueur des troncs de palmier. Généralement elle ne dépasse pas les 2,5m. Pour les grandes surfaces, les

constructeurs mettent des arcs tous les 2m ou les 2,5m (selon la longueur de branchage de palmier) (photos II.10, II.11et II.12), ou bien ils utilisent deux branchages de palmier de grande taille, de 4 à 5m (selon la largeur de la surface) reposants sur deux poteaux en bois du palmier (figureII.6).



Arc séparant deux portées de 2.5m

Photo II. 10 : Détails intérieur d'une maison en adobe réalisée en1990, Timimoune, Algérie.



Arc séparant deux portées de

Photo II. 11 : Artisanat en brique de terre crue âgée de 100 ans, de 4x6m², Timimoune, Algérie.

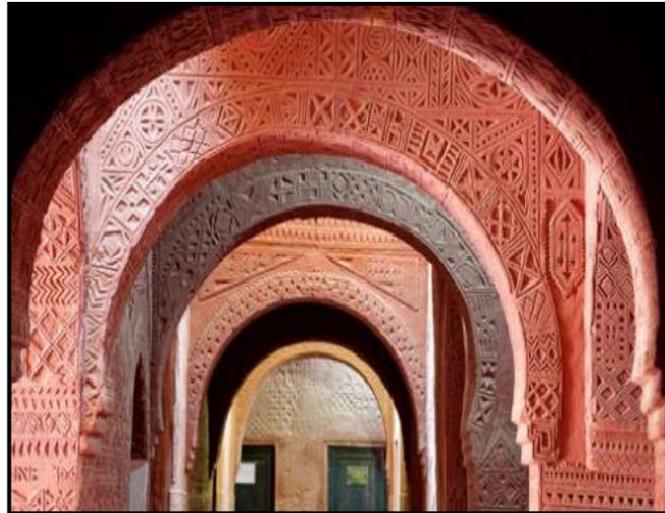


Photo II. 12: Création des arcs tous les 2m dans une ancienne construction en adobe, CAPTerre, Timimoune, Algérie.

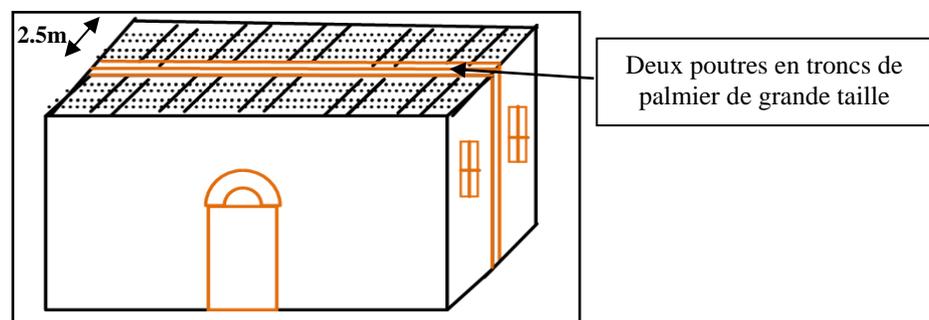


Figure II. 6: Détails plancher pour les grands portés en bois de palmier.

Concernant les enduits, les anciens utilisent l'enduit à chaux mélangé avec du sel naturel disponible dans la région. Le dosage utilisé est : 2kg de sel pour 200 litres d'enduit à chaux. L'utilisation du sel a pour but d'éviter, à long terme, la création de vide entre le mur en argile et l'enduit à chaux appelé localement « le feuilletage » (figure II.7). Celui-ci est caractérisé par la séparation entre l'enduit et le mur. Aujourd'hui, les constructeurs utilisent un mélange de la chaux avec de la peinture à eau. Le dosage utilisé est : 10kg de peinture pour 200 litres d'enduit à chaux.

D'après les artisans et les constructeurs dans le domaine de la construction en adobe dans la région, l'entretien se fait tous les 15 ans, si l'habitation est bien conçue.

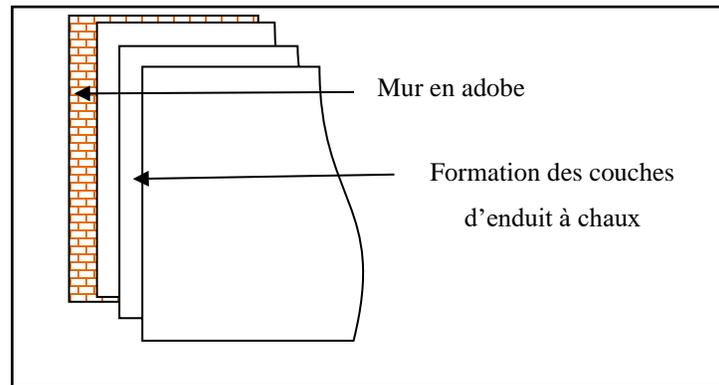


Figure II.7 : Formation des couches d'enduit à chaux, à long terme, due à la mauvaise adhérence argile–enduit à chaux.

La construction en adobe marque son existence dans toutes les anciennes villes de la willaya d'Adrar. Elle est utilisée sous trois systèmes constructifs :

- Système porteur : où les murs épais présentent l'élément qui assure la stabilité de la structure, c'est le cas des anciennes constructions dans les ksours (photo II.13)
- Système de remplissage avec une ossature poteau-poutre en béton : c'est le cas où le constructeur choisit d'utiliser un système poteaux-poutres en béton armé , avec des soubassement en pierre (photo II.14), et des murs en adobe pour assurer le confort thermique ;
- Système de remplissage avec une ossature métallique: l'adobe est utilisé aussi pour le remplissage de l'ossature métallique qui est utilisée aussi au niveau du planchers constitué de profilé IPN superposé des plaques de Zinc et une couche d'argile et de chaux.



Photo II. 13 : Construction en adobe avec des murs porteurs réalisée en 2001, Timimoune, Algérie.



Photo II. 14: Mur d'une construction en adobe en cours d'exécution, avec un système porteur en béton et un soubassement en pierre, Timimoune, Algérie.

II.4. Etude comparative économique d'une maison en adobe et en maçonnerie conventionnelle

A l'échelle économique, la production d'un bloc de terre crue (adobe) ne nécessite qu'un maçon qualifié, un moule, une bale, et une surface de fabrication, de séchage et de stockage, pour donner à la fin une brique à bas coût de revient : 10 DA seulement (le coût est donné par les artisans dans la région d'étude dans les dernières années). Ce prix est inférieur 3 à 4 fois à celui d'une brique

de terre cuite ou bien un bloc en ciment (dans la région d'étude Adrar). Selon les artisans et les investisseurs dans ce domaine, pour construire votre propre maison en adobe vous pouvez économiser 1/3 du cout de la même maison en brique cuite.

La figure II.8 présente une maison en adobe construite en 1990 au sud algérien (Timimoune). D'après l'artisan qui a construit cette maison, le coût de revient est estimé à 450000 DA dans la partie des gros œuvres. Par ailleurs, le devis quantitatif et qualitatif présenté dans l'annexe 2 (pour la partie des gros œuvres) effectué par le bureau d'étude ASPECT (Atelier Saharienne Pluridisciplinaire d'Etude et Conseil, Touat), estime le coût de la même maison en maçonnerie conventionnelle à plus d'un million de dinars. D'après ce devis nous pouvons constater que cette maison coute 2.5 fois plus que le coût cité précédemment.

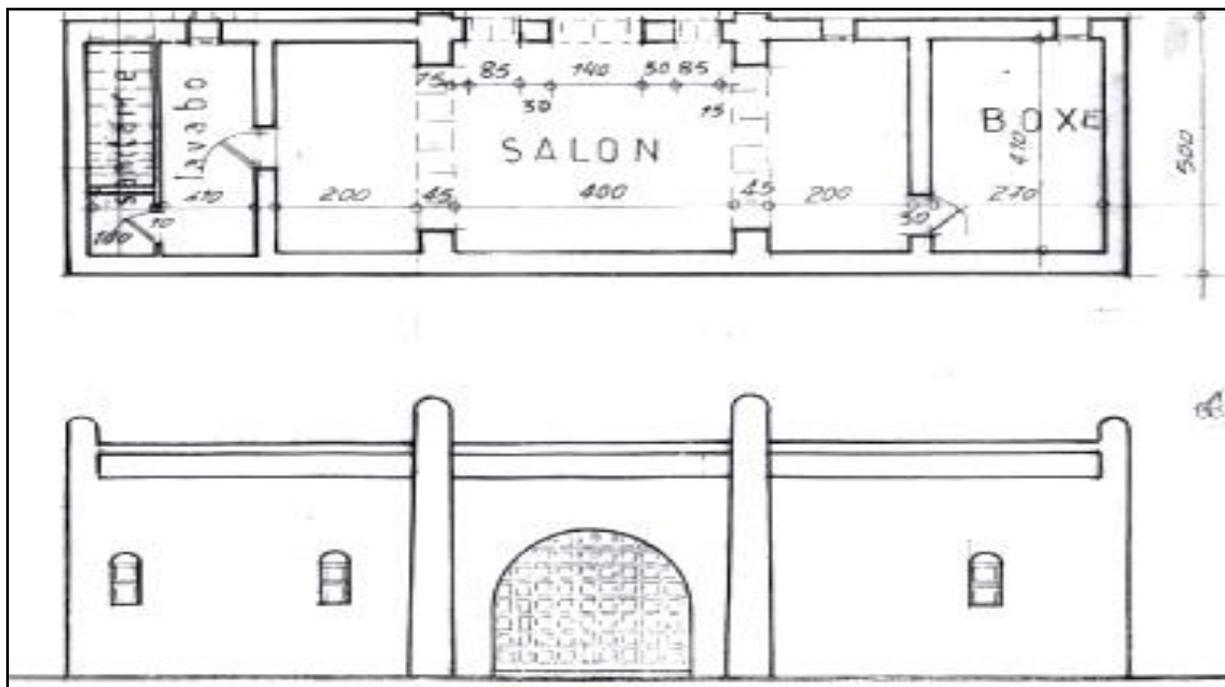


Figure II.8 : Plan d'une maison en adobe réalisée en1990.

II.5. Situation de la construction en terre

II.5.1. Situation de la construction en terre dans le monde

Plusieurs pays ont établi des codes, des standards et des normes qui traitent de la construction en terre : en France, Allemagne, Inde, Kirghizistan, Nouvelle Zélande, Pérou, Etats Unis

(Nouveau Mexique), Australie, Zimbabwe, Brésil, Columbia, Kenya, Nigeria, Sri Lanka, Tunisie et Suisse.

Actuellement, les seuls codes complets qui traitent spécifiquement la construction en bloc de terre comprimée BTC se trouvent en Allemagne et en Nouvelle Zélande. D'autres pays possèdent des codes qui sont, selon le CRATerre, largement dépassés, comme c'est le cas en Afrique du sud et en Australie. Des pays tel que le Maroc et la Côte d'Ivoire ont développé des recommandations ou des prescriptions qui sont continuellement mis à jour (Ali A., 2012).

Le Centre de Développement Industriel (CDI) et le CRATerre ont publié un guide des normes pour les BTC qui contient des normes de terminologie, de classification, de composants d'éléments, de fabrication, d'exécution et d'essais et de contrôles (Houben H., 1998).

En France, le document normatif « le guide de bonnes pratiques de la construction en terre crue, 2020 » donne des règles, des lignes directrices et des caractéristiques pour la construction en brique de terre crue.

Aux Etats-Unis la construction en adobe est intégrée aux codes nationaux de construction. Pendant les années 1920, le « Uniform Building Code (UBC) » était publié au niveau national. Il a subi des modifications pour être adopté dans les différents états, ses règles concernent les briques de terre « adobe » faites à la main. La dernière version a été publiée en 1997 (UBC, 1997).

En 2007, le programme du patrimoine mondial sur l'architecture de terre a été lancé et vise à promouvoir la conservation de l'architecture de terre à travers le monde.

Dans les dernières années, plusieurs programmes ont été effectués pour répondre aux enjeux actuels du bâtiment bas carbone. Nous citons celui de Cob Bauge qui s'intéresse à la modernisation de la construction en terre crue, et qui s'inscrit dans le cadre des actions de l'Union européenne, entre 2017 et 2023, visant à réduire de 20% des émissions de CO₂.

Le tableau suivant (tableau II.3) résume les codes et les standards pour la construction en terre crue (King B., 2006). Chaque code impose des dimensions et des conditions spécifiques.

Tableau II. 3: Normes, codes et standards de la construction en terre à travers le monde (King B., 2006).

Abréviation	Codes, normes, et standards
ASTM	American Society of Testing and Materials E2392-05 [USA]. Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems, 2005
ARIZ	Uniform Administrative Code Amendment for Earthen Materials and Straw Bale Structures, Tucson/Pima Country, Arizona [USA], 1997
AUST	The Australian Earth Building Handbook, 2002
CA	California [USA] Historical Building Code, (USA), 2001
IBC	International Building Code, [USA], 2000
IND	Indian Standard, Improving Earthquake Resistance of Earthen Buildings-Guidelines, 1993
NEP	Nepal National Buildings Code / Mandatory Rules of Thumb / Load Bearing Masonry, 1995
NM	New Mexico Adobe and Rammed Earth Code, [USA], 2004
NZ97	New Zeland Standard, Engineering Design of Earth Buildings, 1998
NZ98	New Zeland Standard, Materials and Workmanship for Earth Buildings, 1998
NZ99	New Zealand Standard, Earth Buildings not requiring Specific Design, 1998
PERU	National Building Standards Technical Building Standard NTEE.080, [Peru], 2000
CHINA	The Chinese national building standards
ECUADOR	Ecuadorian standard
GERMANY	Germanearth building standard
UBC	Uniform Building Code, (USA), 1997

II.5.2. Situation de la construction en terre en Algérie

En Algérie, les projets de construction en terre réalisés n'ont aucune identité architecturale. L'Algérie a manifesté très tôt son intérêt pour la revalorisation des constructions en terre mais cela reste insuffisant pour réduire ou même limiter l'obstacle psychologique des citoyens. L'étude de la réhabilitation et la restauration de l'ancien hôpital d'Adrar, conçu en 1942 par Michel Luychx, présente un exemple sur l'importance de la construction en terre dans le sud algérien.

Plusieurs projets en terre crue ont été réalisés en Algérie par le CNERIB depuis plus de vingt ans, mais qui restent très limités (tableau II.4).

Tableau II. 4: Les opérations de construction en terre crue en Algérie (Kebaili N., 2006)

Année	Réalisation
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 de Mustapha ben Brahim, sont réalisés en pisé.
1975	Le village d'Abadlaa été construit selon le procédé de la terre remplissante
1976	100 logements du village agricole de Felliache à Biskra sont réalisés en Toub.
1980	120 logements du village agricole de Madher à Boussaada sont réalisés en BTS.
1981	40 logements sont réalisés à Chéraga près d'Alger en blocs de terre comprimée (BTC).
1984	Un prototype bioclimatique fut réalisé à Tamanrasset en BTC. Un prototype fut réalisé au CNERIB en BTC.
1986	10 logements sont réalisés à Adrar en BTC. 10 logements sont réalisés à Reggane en BTC.
1994	24 logements sont réalisés à Tamanrasset par l'office de promotion et de gestion immobilière en BTC. 44 logements sont réalisés par l'ETR de Tamanrasset en BTC.
1998	Un prototype en pisé fut réalisé au CNERIB.
2006	Un projet intitulé « réalisation d'un logement rural avec efficacité énergétique » est lancé au CNERIB et financé par l'union européenne.

En 1988 le CNERIB a établi un document intitulé « le béton de terre stabilisée (BTS) » qui regroupe trois parties : des recommandations de la production et la mise en œuvre du

BTS, un guide technique du BTS, et une notice pour l'utilisation de la presse BTS. La mise en application de ce document est presque inexistante (Abbou D., 2014).

II.6. Stabilisation des éléments de la maçonnerie en terre

La stabilisation est un procédé physique, physico-chimique ou chimique permettant à une terre de mieux satisfaire aux exigences de son utilisation (Doat P., 1979). Elle consiste de donner à la terre une propriété irréversible contre les contraintes physiques (CRATerre, 1995). Il est nécessaire donc de connaître les propriétés de la terre à traiter, les améliorations souhaitées, les produits et les matériaux utilisés, les technologies de mise en œuvre, le coût et les conditions d'entretien. Selon le CRATerre, il existe 02 sortes de stabilisation (Doat P., 1979) :

- a. Stabilisation des terres en place : c'est l'injection de la terre par des produits qui colmatent les vides, ou par drainage des eaux situées entre particules;
- b. Stabilisation des terres remaniées : soit sans apport de stabilisant tel que le procédé de compactage et la technique de dessiccation, soit avec apport de stabilisant tel que les stabilisants chimiquement inertes (fibres végétales et animales, armatures), les stabilisants physico-chimiques, etc.

Quelle que soit sa nature, le stabilisant doit être utilisé sous les conditions suivantes (Doat P., 1979) :

- Sa concentration ne doit pas dépasser 10% du poids total de la terre ;
- Le coût doit être compatible avec l'amélioration souhaitée ;
- Quelle que soit la teneur en eau de la terre, son effet doit être efficace ;
- Assurer la longévité de la stabilisation en service et lors des changements climatiques ;
- Assurer un temps de prise ni trop long pour respecter les délais d'exécution, ni trop court pour permettre la mise en œuvre.

Illamps R., (2011) a choisi la technique de stabilisation des adobes avec les fibres pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques. Les adobes confectionnés présentent une amélioration dans la contrainte de compression avec des valeurs proches de 8MPa dans le domaine élastique. Alors que les murs testés ont des résistances inférieures à 1.2 MPa. Aussi, Itulamy L. A. M. (2018), à travers son étude sur la stabilisation des adobes par des pourcentages différents de bagasse, de sable et de granulats fins, trouve que la résistance à la compression augmente de 1/3 pour chaque stabilisant.

Pour notre étude, nous nous sommes intéressés à la stabilisation des terres remaniées par apport au stabilisant physico-chimique : la chaux vive.

II.6.1. Stabilisation à la chaux

Ce type de stabilisant nécessite l'utilisation d'une terre qui contient une quantité non négligeable d'argile (Doat P., 1979). Les meilleurs résultats de stabilisation sont obtenus pour les argiles riches en minéraux suivant : silicates d'alumine, silice, et l'hydroxyde de fer (ARS 680-1996). Aussi, les sols qui possèdent un indice de plasticité de 4 à 9 sont acceptables, de 10 à 13 sont préférables (Doat P., 1979). La stabilisation à la chaux des terres est une opération exothermique d'hydratation qui assèche la terre, en évacuant 0.5% à 1% d'eau pour un dosage de 1% de la chaux vive (ARS 680-1996).

Aussi, le taux d'augmentation de la résistance à la compression des sols stabilisés à la chaux change d'une étude à l'autre (Zak P., (2016) ; Delgado M.C.J. et Guerrero I.C., (2007) ; Turkmen I., (2017)). D'ailleurs, les travaux du Centre de Recherche et d'Application Terre (CRATerre) montrent que la résistance à la compression des adobes stabilisés à la chaux augmente environ 4 fois au cours du temps, et prend des valeurs maximales après 30 semaines (Doat P., 1979) (figure II.9). L'amélioration de la consistance et de la résistance mécanique au cours du temps du mélange stabilisé à la chaux est due selon A. Firoozi (2017) à la formation des ponts de calcium.

Selon Bada A. (2016), l'addition de 8% de chaux sert à améliorer les caractéristiques thermiques des adobes. Alors que les travaux de (Doat P., 1979) montre que l'addition de la chaux à faible pourcentage modifie plusieurs propriétés de la terre. Elle modifie la plasticité de la terre, limite la formation des nodules, réduit les effets négatifs des matières organiques, et donne à la terre traitée une meilleure tenue à l'eau.

D'après la norme ARS 680-1996, un pourcentage de 2% à 3% de chaux vive sert à la diminution de la plasticité de la terre et brise toutes les mottes, ce qui s'appelle le point de fixation de la chaux. Alors que pour une stabilisation ordinaire à la chaux éteinte, des pourcentages de 4% à 12% sont préférable (il y a toujours un dosage optimal pour chaque terre). La cure est entre 30 jours (obligatoire) et 90 jours (recommandé).

La courbe de la figure II.9, montre l'évolution de la résistance à la compression de deux types de terre dont les indices de plasticité sont successivement 10 et 14 avec une stabilisation de 5% et 10% de la chaux (Doat P., 1979).

A partir de la courbe de la figure II.9:

- Pour les deux types de terre des indices de plasticité différents, l'addition des pourcentages élevés (plus de 5%) de la chaux n'implique pas l'augmentation significative de la résistance à la compression.
- On peut distinguer que les terres stabilisées qui possèdent un indice de plasticité 14 sont plus résistantes que celles qui possèdent un indice de plasticité 10.
- Plus la durée de cure augmente, plus la résistance à la compression s'approche de sa valeur optimale.

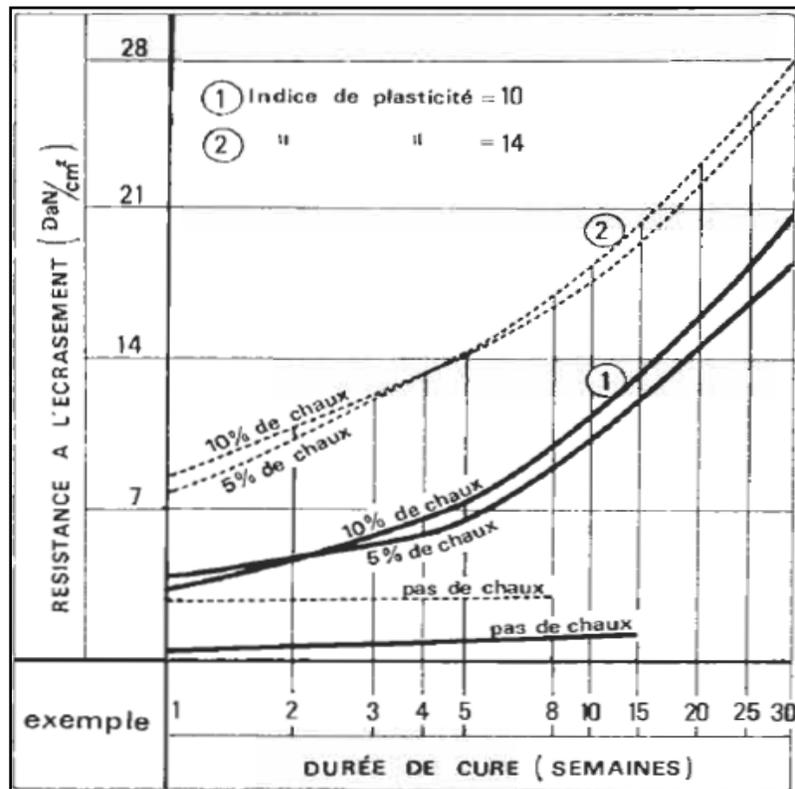


Figure II.9 : Evolution de la résistance à la compression au cours du temps de deux types de terre stabilisées à la chaux (Doat P., 1979).

II.7. Comportement de la maçonnerie sous sollicitations uni-axiales de compression

Nous distinguons la résistance à la compression de la maçonnerie dans la direction perpendiculaire et parallèle aux joints horizontaux.

La résistance à la compression de la maçonnerie est souvent influencée par les propriétés mécaniques des joints et des blocs constituant le mur, la proportion des joints et l'âge de la structure (Gharib T., 2015), le nombre de couches de mortier, la résistance à la compression du mortier, la résistance à la traction des blocs, la dimension du prisme de maçonnerie testé (EN 1996), etc.

Lourenço P. B. (1998), explique en détail le comportement des murs en maçonnerie sous des chargements en compression et en traction. Il présente les travaux de Van Der PLUIJM, qui trouve que la surface réelle de contact entre les éléments de maçonnerie et le mortier est seulement 59% de la surface totale de contact. Aussi, l'interface bloc-mortier présente la zone la plus endommagée lors du chargement d'un mur. Elle est définie comme étant une épaisseur négligeable, et elle est assimilée à une ligne de liaison localisée entre la brique et le joint du mortier (Fouchal F., 2006)

Plusieurs modèles sont développés par différents chercheurs afin d'enrichir la compréhension du comportement de la maçonnerie sous des sollicitations uniaxiales. Dans le tableau suivant (tableau II.5) nous présentons deux modèles très connus : le modèle de Page (Page A. W. et All S., 1981), et celui de Shaan (Shaan R., 1987).

Pour le modèle de Page A.W. (1978), les résultats expérimentaux montrent que le comportement global de la maçonnerie est non-linéaire. La non linéarité provient des joints de mortier qui constituent des plans de faiblesses dans la structure, due aux phénomènes de glissement, frottement et décollement des joints. Alors que Page A. W. et All S. (1981), et à travers leurs études sur le comportement de la maçonnerie en briques pleines sur des panneaux soumis à une compression biaxiale, trouvent que l'orientation du joint n'a pas un rôle significatif, ce qui est en contradiction avec leurs travaux antérieurs.

Tableau II. 5 : Modèles de caractérisation de la maçonnerie dans la littérature (Page A. W. et All S. (1981) ; Shaan R. (1987))

Modèles	Hypothèses	Panneaux d'essai	Mode de rupture
Page (1978)	<ul style="list-style-type: none"> - Comportement mécanique élastique linéaire des briques, et non-linéaire du mortier des joints, - Briques et joints de mortier isotropes et homogènes, - Frottement de Coulomb entre briques et joints. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dimensions : 500x210x45 mm³, - 5 différentes orientations du plan de joint: 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90°. 	<ul style="list-style-type: none"> - Entre 0° et 90° : fissuration dans le joint du mortier parallèle à l'axe de chargement ; - Fissuration en escalier pour les autres orientations.
Shaan (1987)	<ul style="list-style-type: none"> - Comportement mécanique élastique linéaire de la brique et du mortier, - Brique orthotrope et homogène, - Joint de mortier isotrope, - Contact parfait entre les briques et les joints de mortier. 	<ul style="list-style-type: none"> - Des murets en briques de terre cuite creuse de 190x100x40 mm³, - un mortier en ciment d'épaisseur 9 mm, et selon les mêmes orientations de Page. 	<ul style="list-style-type: none"> - Entre 0° et 22.5° : détachement entre les joints // au chargement et aux briques ; - 67.5° et 90° : fissuration des joints // à l'axe de chargement due à la traction ; - 45° : combinaison des 02 cas précédents.

Contrairement aux résultats de Page A.W. et All S. (1981), l'étude expérimentale de Shaan R. (1987), a montré que le comportement de la maçonnerie est très influencé par l'orientation des joints du mortier qui sont souvent à l'origine de la rupture.

En outre, Mohamed G. (2007) à travers son étude sur le comportement mécanique des blocs de béton a montré que les modules de Young doivent être toujours déterminés dans le domaine élastique. Ce domaine a été déterminé à partir de la pente sécante entre les contraintes à 5% et 33% de la résistance maximale de compression des courbes contrainte- déformation. Car au-delà de cet intervalle les déformations deviennent significatives.

En plus, parmi les facteurs qui influent sur la résistance à la compression, nous citons la granulométrie ou bien la taille des granulats constituant le sol. Koutous A. et Hilali E. (2019) montrent que la résistance à la compression, le module tangent initial, et la déformation axiale

maximale correspondant à la contrainte de compression maximale des terres peuvent être influencés par la forme et la taille des particules

II.7.1. Résistance à la compression perpendiculaire aux joints horizontaux

Cette résistance est considérée comme un critère important et parfois comme le seul critère pour définir la résistance à la compression globale de la maçonnerie (Fouchal F., 2006). La rupture se produit par glissement ou fissuration du joint de mortier et par fissuration du bloc (Gharib T., 2015). Zucchini A. et Lourenço P.B. (2007) considèrent que le comportement de la maçonnerie sous un chargement uni-axial de compression dépend essentiellement de la résistance à la compression et de traction de blocs. La compression uni-axiale de la maçonnerie engendre une compression triaxiale dans le mortier et une compression et une traction biaxiale dans les briques (Fouchal F., 2006). Aussi, des fissures verticales apparaissent initialement sur les briques au niveau de la ligne médiane du spécimen, qui continuent au niveau des joints de mortier verticaux. Quand la limite de rupture est atteinte, une cassure au milieu du prisme se produit (Mann W. et Betzler M., 1994).

Pour la maçonnerie en adobe la rupture se caractérise par une réduction considérable dans la hauteur, avec un endommagement des parties latérales et des déformations transversales et longitudinales inélastiques de l'assemblage qui amènent la fissuration des adobes (Illumps R., 2011).

Généralement, les propriétés mécaniques de la maçonnerie sont plus faibles que celles de ses constituants blocs et mortier. Varum H. (2007), par l'expérimentation sur 13 murets en terre, trouve des résistances à la compression variant entre 0,86 et 1,33 MPa, et cela par l'utilisation d'adobes d'une résistance allant jusqu'à 1,57 MPa et d'un mortier de résistance 1,42 MPa. Il trouve des modules de Young des murets variant entre 173 et 200 MPa, pour des adobes de module de Young plus de 400 MPa. Aussi, Varum H. (2015) a trouvé des résistances à la compression des murets en terre plus faibles (0,79 MPa) que celles des adobes (2,15 MPa) et du mortier (1,19 MPa). Contrairement aux travaux de Gharib T. (2015), qui montre que les propriétés mécaniques d'une maçonnerie se situent entre celles des blocs et du mortier, il trouve que la résistance à la compression a été augmentée de 19% par rapport à la résistance en compression du mortier et elle a diminué de 86% par rapport à celle de la pierre. Les travaux de Khalaf F. (1994) et Lateb M. (1995) sont en concordance avec ceux de Gharib T. (2015). Ils ont trouvé un rapport de la résistance à la compression de la maçonnerie à celle des blocs égal à 0,6.

II.7.2. Résistance à la compression parallèle aux joints horizontaux

Selon Lourenco P.B. (1998), l'essai en compression uni-axiale dans la direction parallèle aux joints horizontaux engendre un glissement et une fissuration de ces derniers, et des fissurations des blocs s'ils possèdent une faible résistance, mais cette influence n'est pas importante. Selon Houfman H.K. et Schubert P. (1994), le rapport entre la résistance perpendiculaire et la résistance parallèle aux joints horizontaux est presque égale à 1, mais la valeur de la résistance à la compression perpendiculaire dans ce cas est toujours surestimée.

II.7.3. Formules analytiques de la résistance à la compression de la maçonnerie

L'objectif de cette partie est de rassembler les différentes formules analytiques calculant les résistances à la compression d'une maçonnerie, vu qu'à la fin de notre travail nous établirons notre propre formule qui donne la résistance à la compression et le module de Young de la maçonnerie en adobe en fonction des caractéristiques des constituants de nos matériaux. Parmi ces formules nous citons :

- *La formule de Koo C. et Hendry A., (1973)* : Cette formule permet de calculer la résistance à la compression d'une maçonnerie en fonction de celles du mortier et du bloc, avec :

$$AF_c^3 + BF_c^2 + CF_c + D = 0 \dots \dots \dots (II.1)$$

Où :

A, B, C et D sont des variables fonctions de la résistance à la compression du mortier $f_{c,m}$ et du bloc $f_{c,u}$

- *La formule d'Ohler, (Ohler A., 1986)* : cette formule est aussi liée aux caractéristiques mécaniques du mortier et du bloc qui constituent l'assemblage, avec :

$$f_c = f_{c,m} + \frac{Sf_{c,u} - f_{c,m}}{1 + \frac{t \cdot h_m \cdot f_{c,u}}{m \cdot h_u \cdot f_{t,u}}} \dots \dots \dots (II.2)$$

Où :

S et t sont des paramètres qui définissent l'enveloppe de rupture des blocs. Il est possible de définir leurs valeurs par le rapport entre la résistance de l'assemblage f_c à la résistance du bloc $f_{c,u}$: $f_c/f_{c,u}$ (Ohler A., 1986).

M est un paramètre lié à la résistance en compression de mortier $f_{c,m}$ (Ohler A., 1986).

- *La formule de MSGC* : the International Building Code Requirement for masonry structures (2002), est basée sur les résultats expérimentaux des assemblages en briques solides.

$$F_{c,maç} = A(400 + Bf_{c,u}) \dots \dots \dots (II.3)$$

Avec :

$F_{c,maç}$ et $f_{c,u}$: les résistances à la compression en psi (1MPa=145psi) de la maçonnerie et des blocs successivement ;

A et B : facteurs liés au type du bloc et du mortier utilisés

- *La formule de l'Eurocode 96* : l'Eurocode 6 (EN 96-1-1, 2005) propose une formule empirique de calcul de la résistance de la maçonnerie (blocs en argile, en silicate de calcium, blocs de béton, blocs en béton autoclave, pierres industrielles, ...etc.) en fonction des caractéristiques mécaniques de ses composants (formule II.4). Il propose des valeurs numériques principalement justifiées sur la base de résultats d'essais très limités, qui ne peuvent donc pas être utilisées pour tous les types de produits. Remarquons également l'absence de proposition sur l'influence de l'épaisseur du joint de mortier.

$$f_k = k f_b^\alpha f_m^\beta \dots \dots \dots (II.4)$$

Où :

f_k : la résistance à la compression de la maçonnerie en MPa

k : constante liée au groupe de classification des unités (blocs en argile, en silicate de calcium, blocs de béton, blocs en béton autoclave, pierres industrielles, etc.) et du mortier (mortier à usage général, mortier en couche mince, mortier léger) constituant l'assemblage

α, β : des constantes expérimentales ;

f_b : c'est la résistance à la compression normalisée du bloc constituant l'assemblage dans la direction de l'application de la charge, en MPa

f_m : la résistance moyenne à la compression du mortier en MPa;

Plusieurs autres formules donnant la résistance à la compression des maçonneries en terre en fonction du module de Young ont été élaborées telles que :

- La formule de Paulay T. et Priestley M.J.N., (1992) : $E_M \approx 750 \sigma_m$,
- La formule de l'Eurocode EN 1052-1, (1998) : $E_M \approx 1000 \sigma_m$,
- La formule de CSA (Design of Concrete Structures), (2004) : $E_M \approx 850 \sigma_m$.

II.8. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous mettons l'accent sur la construction en adobe, qui est l'objet de notre travail expérimental et qui représente la technique constructive utilisée dans les anciennes habitations de la région d'étude Adrar, caractérisée par son climat aride et sec. Nous mentionnons leurs propriétés et caractéristiques mécaniques, hygrométriques et thermiques, et les techniques de mise en œuvre.

Dans la suite de ce chapitre nous montrons la situation actuelle des constructions en terre avec les codes, et les recommandations internationales qui définissent et orientent leurs utilisations. Ces dernières restent très limitées et insuffisantes devant le progrès très rapide de l'utilisation des matériaux conventionnels.

Également, nous nous sommes intéressés au comportement de la maçonnerie sous des sollicitations uni-axiales de compression. D'après la littérature la résistance de la maçonnerie dans la direction perpendiculaire aux joints horizontaux est toujours plus importante de celle de la direction parallèle aux ces joints, ce qui engendre des fissures et des dégradations dans les structures maçonnées. Alors nous consacrons le troisième chapitre aux pathologies des maçonneries en terre.

Chapitre III : Pathologie des maçonneries en terre

III.1. Introduction

Les pathologies des murs en maçonnerie peuvent résulter d'un défaut de la résistance mécanique de l'ouvrage, ou bien d'un défaut qui ne met pas en cause la solidité de l'ouvrage. Dans le 1^{er} cas les désordres peuvent être dus soit à un défaut de contreventement général, en l'absence de joint de dilatation ou bien leur très grand écartement, ce qui provoque des fissures, ou bien au mauvais choix du type de maçonnerie (Merlet J.D., 1994). D'une façon générale, les désordres affectant la structure sont dus à l'absence de l'étude géotechnique du sol, à la mauvaise évaluation des éléments constructifs de la structure, au vieillissement de l'ouvrage, au manque d'entretien périodique, à un défaut d'exécution et aux agressions du milieu extérieur telle que l'humidité et l'eau.

Les constructions en briques de terre crue, en particulier, sont l'objet de plusieurs problèmes, détériorations et désordres, qui sont dus dans la plupart des cas à leurs sensibilités à l'eau. Pour faire une étude pathologique, il faut observer et analyser les symptômes, puis établir un diagnostic sur les causes et les risques d'évolution des désordres, et enfin chercher le traitement adéquat. A ce sujet le CRATerre, définit deux types de pathologies : celles dites « pathologies liées à l'humidité » dues aux ruissellements des eaux et à l'humidité, et les « pathologies structurelles » dues aux mouvements différentiels des fondations, aux surcharges, et autres sollicitations qui engendrent des fissures de différentes importances dans les briques (Doat P., 1979), (Xiao Ma, 2018).

III.2 Pathologies liées à l'humidité

Comme son nom l'indique, elles sont liées à l'action de l'eau, et dues soit à l'exposition d'une surface du bâtiment à l'action d'eau, ou à l'existence d'ouvertures (fenêtres, fissures) dans la maçonnerie, qui permettent l'infiltration des eaux, ou bien la présence d'une force de pression ou capillaire qui fait pénétrer l'eau à l'intérieur du bâtiment.

III.2.1. Les principaux lieux de désordres

Ces désordres sont généralement localisés :

- A la base des murs, à cause de la remontée capillaire, l'eau d'arrosage, etc. ;
- Aux bords supérieurs des murs, à cause des eaux de pluie ;
- A des endroits précis tels que les ouvertures.

III.2.2. Les principales causes de désordres :

- Les fortes pathologies humides telles que : les eaux de pluie, de ruissellement, la remontée capillaire, etc.
- Mauvais choix du terrain de construction tels que : les terrains gonflants, de faible résistance, instables, etc.
- La mauvaise conception et réalisation des bâtiments : sous dimensionnement et excentricité des fondations, murs trop percés d'ouvertures, charges trop élevées non reprises par les chainages, mauvais choix de la terre, adobes mal appareillés, mauvais ancrage des poutres de planchers dans les murs, etc.
- L'action du vent et les objets qui sont transportés sur le haut et le bas des murs ;

III.2.3. Pathologies liées à l'humidité

Les pathologies liées à l'humidité des maçonneries en terre sont regroupées en quatre catégories en fonction du rôle de l'humidité (Beger J., 2012) :

- a. Les altérations liées à l'action propre de l'eau:* Lorsque la vapeur d'eau ou l'eau liquide se transfèrent à travers les parois, leurs propriétés physiques subissent des modifications (Beger J., 2012). Ces modifications peuvent se présenter dans la variation des dimensions lorsque l'eau et la vapeur d'eau remplissent les vides, provoquant des gonflements, et des retraits (Phillyprou M., 2005) jusqu'à la diminution de la résistance mécanique à la compression (Photos III.1 et III.2). Kevin B. (2003) montre, suite à des expériences, que la résistance à la compression diminue de 55% entre l'état sec et l'état de saturation. Alors que Olivier M. et Mesbah A. (1994) trouvent que cette résistance peut diminuer 10 fois à sa valeur initiale quand le sol est saturé. Bui Q.B. (2014) à travers ses études sur des

échantillons en terre montre qu'une faible variation de la teneur en humidité de la terre sèche n'influe pas de façon sensible sur sa résistance à la compression.



Photo III. 1 : Fissuration du mur due à l'action d'eau et apparition sur l'enduit en terre.



Photo III. 2 : Dégradation des extrémités du mur à proximité des ouvertures, CAPTerre, Timimoune, Algérie.

b. Le gel et dégel des matériaux : Lorsque l'eau présente dans les vides se transforme en glace, celle-ci en gonflant, va exercer des pressions sur les autres pores

provoquant la destruction et l'éclatement des matériaux qui constituent le mur en briques. Le cycle gel dégel entraîne une modification microstructurale qui modifie les comportement macroscopique lors du transfert de chaleur et de masse (Traoré L. B., 2019). Ce phénomène affecte tous types de matériaux en terre même ceux stabilisés (Traoré L. B., 2020).

- c. Cristallisation des sels* : Après l'évaporation des eaux traversant les murs, on remarque souvent des taches blanches, c'est la formation des cristaux de sel qu'on appelle « le salpêtre » (Pignal B., 2005). Shen Y.X., (2017) montre que la résistance à la compression et le taux d'érosion éolienne diminuent lorsque la teneur en sel augmente. Le sel le plus fréquents à la surface des murs en terre crue est le Na_2SO_4 , tandis que le chlorure de sodium NaCl joue peu de rôles dans la détérioration des matériaux (Shen Y.X., 2017). Ils peuvent avoir pour origines les eaux souterraines, et les gaz atmosphériques (Beger J., 2012). La cristallisation peut avoir lieu à la surface (efflorescence), ou dans la paroi (subflorescence). Dans les deux cas, elle provoque l'effritement et le décrochement des briques. Plus grave encore, l'affaiblissement de la cohésion, qui désintègre le matériau, augmente la taille des pores et pulvérise la brique d'adobe (Philkyrou M., 2005). Des études de cas des constructions historiques en Scandinavie en briques massive ont montré que l'enduit chanvre-chaux sur les murs en maçonnerie endommagés par les sels pourrait être une option pour les protéger (Balksten K. et Strandberg-de Bruijin P., 2021).
- d. Des dégradations biologiques* : Ces dégradations sont dues à l'apparition des moisissures et des champignons (la mэрule). Les dégâts observés sont la pourriture des parties en bois affectées par l'eau en particulier celles encastées dans le mur, ainsi que les fissures et la perte de solidité (Philkyrou M., (2005) ; Xiao Ma, (2018)).

III.3. Pathologies structurelles des constructions en briques de terre crue

Ces pathologies sont parfois, les conséquences des pathologies humides. Ces dommages incluent sur la fissuration structurelle (qui affecte l'intégrité du bâtiment). Ils ont diverses formes :

verticales, horizontales, diagonales, et en forme de X. Aussi il y a apparition de tassement des murs, un manque de jonction entre les composants du bâtiment, etc. (Xiao Ma, 2018).

III.3.1. Pathologies coplanaires des parements du mur

On distingue des fractures au niveau des zones pleines dues à une trop forte compression sur une large partie du mur (figure III.1, photo III.3), des fissures inclinées ou bien suivant une ligne verticale sous l'élément qui subit une charge ponctuelle (cas du poids propre d'une poutre ou poutrelle).

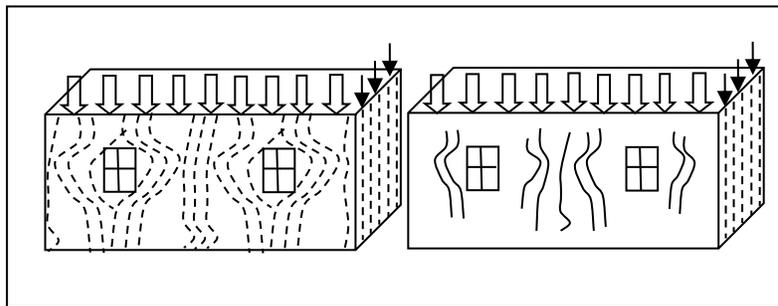


Figure III. 1 : Fissures dans la zone pleine (entre les ouvertures) dues à une forte charge de compression sur une large partie du mur.

III.3.2. Pathologie due à des manques de rigidité des éléments collaborant

Pathologie due à des manques de rigidité des éléments collaborant engendrant la déformabilité de certains éléments qui sont censés être d'une extrême rigidité. C'est la cause de la formation de fracture sous ouverture ou sous planchers par exemple (photo III.3).

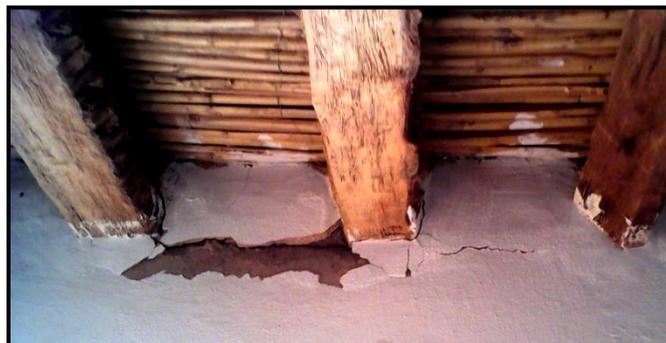


Photo III. 3: Fissuration du muret décollements des enduits.

III.3.3. Pathologie due à des différences de charge

Pathologie due à des différences de charge entre les murs transversaux engendrant la formation d'une fracture verticale dans l'angle formé par ces derniers (figure III.2).

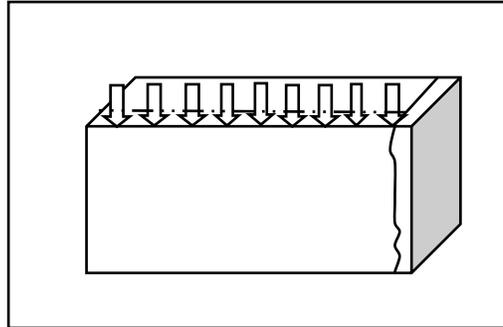


Figure III. 2: Fracture verticale entre le mur supportant la charge du plancher et le mur traversant.

III.3.4. Pathologie due aux mouvements différentiels des fondations

Pathologie due aux mouvements différentiels des fondations soit à l'angle où la fissuration est caractérisée par un angle α , dont le point le plus haut atteint le faitage du mur, soit au milieu du mur engendrant une série de fissurations (figure III.3).

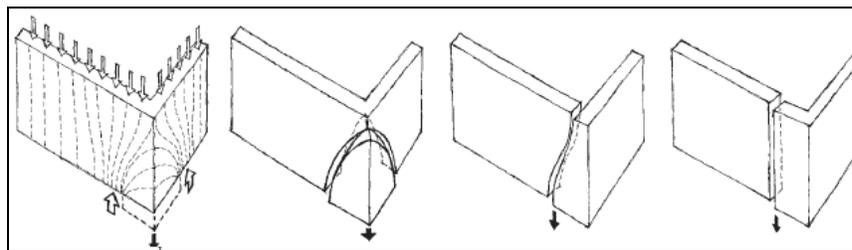


Figure III. 3: Fissurations à l'angle du mur dues à un mouvement du sol. (Gómez C. D., 2014)

III.4. Les types de fissures

Il est rare, ou bien impossible, de trouver une structure sans aucune fissuration. Les raisons d'apparition des fissures sont regroupées en deux catégories (Fouchal F., 2006) : des facteurs externes dus au tassement d'une partie de la structure, au fléchissement des poutres maitresses et planchers, etc. et des facteurs internes tels que la variation des dimensions de la maçonnerie due à

la température, l'humidité, etc. Le tableau suivant (tableau III.1), résume les types de fissures en fonction de la zone et les causes d'apparition.

Tableau III. 1: Types de fissures en fonction de la cause et la zone d'apparition, (Fouchal F., 2006).

Type de fissure	Zone d'apparition	Cause d'apparition
Horizontale	Droit de plancher	Rotation du plancher sur le chaînage
Microfissures de spectre	Joints de maçonnerie	Utilisation des blocs non stabilisés, joint mal doser, épaisseur insuffisante d'enduit
Oblique	Angle d'ouverture	Dilatation des appuis de baies, ou résistance faible de la maçonnerie
Verticale	Jonction de deux bâtiments adjacents contigus	Absence de joint de dilatation
Verticale	Angles des constructions	Défaut de chaînage vertical
En escalier	Maçonnerie en générale	Instabilité du terrain ou l'assise de la construction
En hachures obliques	Près d'un plancher, ou un poteau en béton armé	Dilatation thermique du béton
Microfissurations de retrait en mailles larges		Un excès d'eau de gâchage, une épaisseur très grande ou un mauvais dosage de l'enduit

III.2. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous traitons les pathologies humides et structurelles qui peuvent affecter les constructions en terre. Aussi, nous citons les différents types de fissures qui peuvent apparaître dans ces constructions en mettant en évidence les zones et les causes probables d'apparition.

En définitive, nous pouvons dire que malgré les études et les recherches effectués dans le domaine de la construction en terre, elles restent insuffisantes pour maîtriser les enseignements et les techniques qui traitent ce dernier. Afin de mieux envelopper cette problématique nous avons

consacré les chapitres suivants de ce travail à l'étude expérimentale et analytique du comportement mécanique de la maçonnerie en adobe sous un chargement uni axial de compression.

Chapitre IV : Matières premières utilisées et caractérisations

IV.2. Introduction

L'objectif principal de notre étude est de valoriser la maçonnerie en brique de terre crue dans les régions à climat aride par une étude expérimentale du comportement de murs en terre crue de dimensions réduites (murets, dont les gabarits sont dictés par les moyens d'expérimentation).

Une série de murets représentatifs en brique de terre crue sont confectionnés pour cette étude expérimentale. Pour comprendre le comportement mécanique de ces murets, il est important de connaître le comportement de leurs constituants à savoir les briques et le mortier. Également il faut déterminer les propriétés intrinsèques et les spécificités des matières premières lors de la confection des nouveaux produits ou bien des produits existants améliorés.

Ce chapitre va donc être consacré à l'identification de matières premières et la caractérisation des adobes et du mortier destinés à la construction des murets en terre crue.

Les essais géotechniques (l'analyse granulométrique, l'équivalent sable, la masse volumique) sont réalisés au laboratoire LDDI de l'université d'Adrar, sur le sable de dunes et l'argile d'Adrar selon les normes internationales. Ceci a permis de les identifier et de les classer suivant les classifications normatives les plus connues. Ensuite un chantier a été réalisé pour la confection de plus de 120 briques d'adobe, divisées en trois types a, b et c, à base des matières premières de la région d'Adrar. Après, la masse volumique et la résistance à la compression des briques ont été déterminées. Pour la caractérisation du mortier en terre, des éprouvettes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ont été confectionnées et soumises aux essais mécaniques de la résistance à la compression.

IV.2. Caractéristiques des matières premières

IV.2.1. Identification du sable de dunes

Pour le sable de dunes, nous avons réalisé la série d'essai suivante : analyse granulométrique par tamisage par voie sèche, équivalent de sable, les masses volumiques apparente et absolue.

A. Analyse granulométrique par tamisage

Le sable de dunes utilisé dans notre étude provient des dunes de la région de Bouda. Cette commune se situe à 27 km au centre-ouest de la wilaya d'Adrar (figure IV.1)

Selon la norme NF P 18-560, le matériau étudié (sable de dunes) est versé dans la série de tamis à son état sec. La courbe granulométrique obtenue est représentée dans la figure IV.1.

La courbe granulométrique (figure IV.1) montre que le sable de dunes possède une pente relativement forte et donc c'est un matériau mal gradué, bien trié, avec un pourcentage de fines inférieur à 1%. Le diamètre du plus grand élément ne dépasse pas 1,6mm.

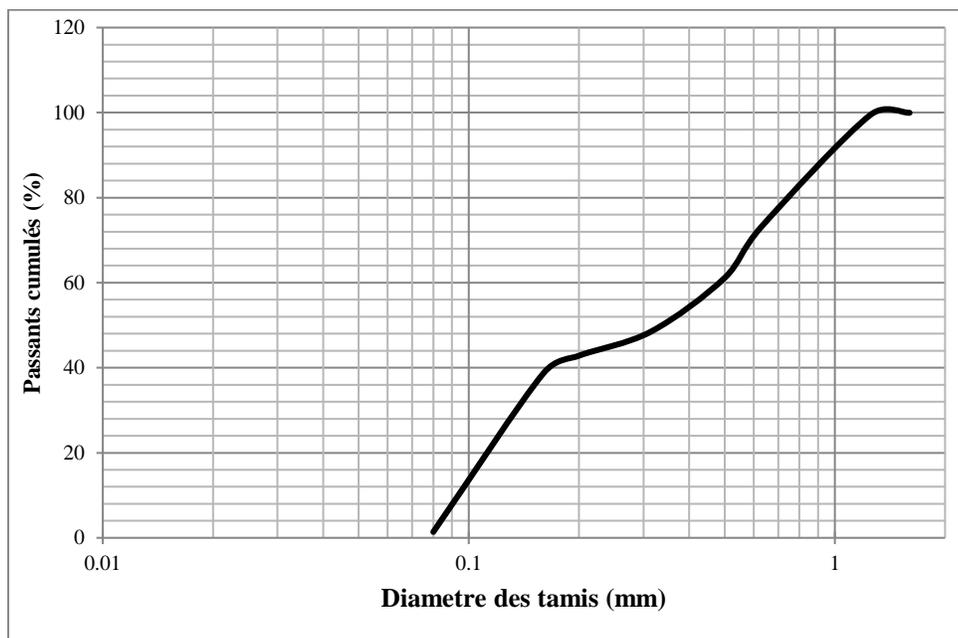


Figure IV. 1: Courbe granulométrique du sable de dunes étudié.

Tableau IV. 1: Caractéristiques physiques du sable de dunes étudié (sable de dunes de Bouda)

Dénomination	Valeur
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,66
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,24
Equivalent de sable (%)	65
Module de finesse	1,7
Le coefficient d'informaté Cu	4,9
Le coefficient de courbure Cc	0,49

Aussi, le sable de dunes de Bouda est considéré comme un sable de nature siliceuse, avec un taux de quartz (SiO₂) supérieur à 90% (Moulay Ali A., 2021)

IV.2.2. L'argile

La fraction d'argile étudiée est prélevée au niveau du gisement situé au nord de la wilaya d'Adrar sur une largeur de 20 km longeant la route nationale RN°6. Ce gisement est en exploitation pour l'alimentation d'une briqueterie privée, actuellement en activité.

Tableau IV. 2: Caractéristiques physiques de l'argile d'Adrar étudiée.

Paramètres	Argile d'Adrar
Tamisât < 2µm	44%
Limite de liquidité	76,8%
Limite de plasticité	38,46%
Indice de plasticité	38,34%
Coefficient d'activité de Skempton Ac	0,73
La valeur de bleu de méthylène	8,1

D'après les résultats obtenus (tableau IV.2), la fraction d'argile étudiée appartient à la catégorie des sols argileux très plastique At (d'après les limites d'Atterberg et l'abaque de Casagrande). La valeur du bleu de méthylène confirme aussi ce résultat (VBS > 8) ;

Aussi, elle possède une activité normale, proche du minéral Illite (K. Belaidi, 2016).

IV.3. Fabrication et caractérisation des briques de terre crue

IV.3.1. Fabrication des briques

Les adobes sont confectionnés à base des matériaux locaux de la région d'Adrar : sable de dunes et argile. Les proportions de ces derniers sont les mêmes illustrés dans le tableau IV.3. Pour les essais préliminaires, 18 adobes, divisés en trois catégories a, b et c, sont confectionnés.

a. Préparation des échantillons d'adobe pour les essais préliminaires

En premier temps, le malaxage s'effectue mécaniquement dans une bétonnière (photo IV.1) au laboratoire LDDI de l'université d'Adrar. Le mélange est malaxé difficilement pendant plus de 40min et avec une quantité d'eau qui dépasse 36% pour les briques non stabilisés.



Photo IV. 1 : Malaxage mécanique des adobes destinés aux essais préliminaires.

Nous utilisons les seuls moules métalliques cubiques à fond mobile (photo IV.2) disponibles au niveau du laboratoire LDDI, de dimensions $15 \times 15 \times 15 \text{cm}^3$. Le démoulage s'effectue après 03 jours, mais avec un affaissement des briques de plus de 7cm (photo IV.3a). Après 28 jours de séchage nous observons l'existence de petites mottes d'argile (photo IV.3b). Pour ces dernières raisons, nous avons opté pour la technique du malaxage à la main (photoIV.4).



Photo IV. 2: Moulage des briques en terre crue pour les essais préliminaires.



(a)



(b)

Photo IV. 3 : Séchage des adobes malaxés mécaniquement :

(a) Affaissement des briques après 3j de séchage ; (b) Existence de mottes d'argile non malaxées à la bétonnière après 28j de séchage.



(a)



(b)

Photo IV. 4 : Malaxage manuel des adobes :

(a) adobe stabilisé à la chaux vive de type c ; (b) adobe de granulométrie < 3mm de type b.

b. Production des adobes pour la construction des murets

Pour la production à grande échelle, les adobes ont été confectionnées manuellement à l'air libre (température $33\pm 2^{\circ}\text{C}$) dans des moules métalliques (photo IV.5) de dimensions (longueur x largeur x hauteur) $29 \times 14 \times 9 \text{ cm}^3$ (selon CRATerre, 1995) au lieu de dimensions traditionnelles de (longueur x largeur x hauteur) $40 \times 20 \times 15 \text{ cm}^3$, car il n'existe aucune norme nationale ou bien internationale qui imposent des dimensions normalisées de la construction en adobe, d'une part, et d'autre part pour faciliter leurs transport et leurs utilisation pendant l'élévation des murs. Les proportions du sable et d'argile sont celles recommandés par le CAPTerre (tableau IV.3).



Photo IV. 5 : Moules métalliques sans fond de dimensions $29 \times 14 \times 9 \text{ cm}^3$ pour les adobes entiers, et $14,5 \times 14 \times 9 \text{ cm}^3$ pour les demi adobes.

Tableau IV. 3: Composition des trios types d'échantillons d'adobe a, b et c.

Type d'adobe	Sable de dunes	Argile	Sable concassé (0/3)	Eau	Chaux vive
a	75%	25%	-	26%	-
b	50%	25%	25%	25%	-
c	50%	25%	25%	35%	4,7%

c. La teneur en eau pour la confection des adobes :

La quantité d'eau est déterminée par l'essai traditionnel du sillon recommandé par le CRATerre (Doat P., 1979). Cet essai consiste à tracer un sillon en « V » de 8cm de profondeur dans le mélange à l'aide d'un bâton. La consistance est parfaite si et seulement si le bâton laisse une trace nette, et

les parois du sillon se gonflent et tendent l'une vers l'autre sans se toucher (figure IV.2). La quantité de chaux vive pour les adobes de type c est celle proposée par Bada A., (2016) (voir tableau IV.3).

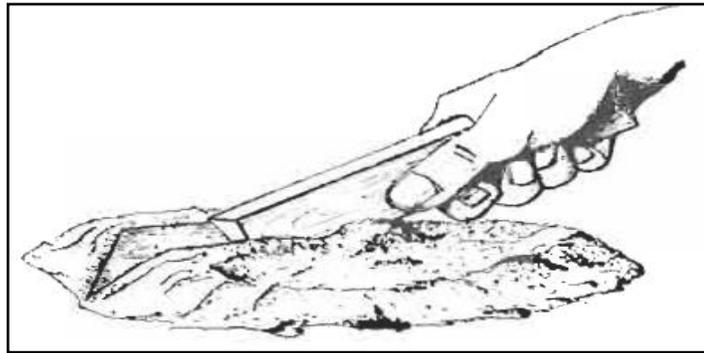


Figure IV. 2 : Contrôle de la consistance de la terre à adobe (Doat P., 1979).

Pour la construction des murets, plus de 120 briques de terre crue ont été confectionnées à l'air libre selon les étapes suivantes :

- La fermentation préalable de l'argile pendant 24h dans la moitié de la quantité d'eau (photo IV.6) ;
- Le malaxage des composants secs (sable de dunes et/ou sable concassé et/ou la chaux) ;
- L'ajout du mélange secs et le reste de la quantité d'eau à l'argile hydratée (photo IV.7) ;
- Le moulage est effectué selon la méthode dite à coup d'eau (Doat P.,1979), qui engendre un film d'eau lubrifiant entre le moule et le mélange, facilitant le démoulage (photo IV.8a) ;
- Le séchage à l'air libre pendant 3 jours sur une aire recouverte de sable (photo IV.8b). Après, les briques sont stockées au laboratoire.



Photo IV. 6 : Hydratation préalable de l'argile



Photo IV. 7 : Malaxage manuel des composants des briques.



(a)



(b)

Photo IV. 8 : Démoulage et séchage des briques :

(a) Démoulage des briques ; (b) Surface de séchage des briques.

IV.3.2. Caractéristiques géométriques et physiques des briques

La masse volumique des éléments est déterminée par la méthode géométrique. Les mesures sont effectuées sur 18 blocs, six blocs pour chaque type : a, b et c (tableau IV.4)

Tableau IV. 4 : La masse volumique des adobes.

Type	N°	ρ (kg/m ³)	ρ_{moy} (kg/m ³)
a	1	1,883	1,859
	2	1,860	
	3	1,835	
	4	1,840	
	5	1,870	
	6	1,866	
b	1	1,835	1,836
	2	1,830	
	3	1,837	
	4	1,843	
	5	1,832	
	6	1,836	
c	1	1,663	1,664
	2	1,665	
	3	1,664	
	4	1,667	
	5	1,661	
	6	1,662	

Les résultats du tableau IV.4 montrent que les adobes de types « a » présentent la plus grande densité. Ce sont des adobes lourds en comparaison avec les adobes « b » confectionnés avec l'ajout du sable concassé, et des adobes « c » stabilisés à la chaux vive. Ce dernier type est le plus léger, et le plus maniable lors de sa confection.

IV.3.3. Caractéristiques mécaniques des briques

Les briques confectionnées sont soumises à un chargement uni-axial de compression jusqu'à la rupture (photo IV.9) pour : la détermination de la résistance à la compression (équation IV.1), les déformations, le traçage des courbes contraintes déformations, et la détermination du module d'élasticité E.

$$\sigma_b = \frac{f_b}{S_b} \dots \dots \dots (IV.1)$$

Avec :

σ_b : la résistance à la compression des briques ;

f_b : la charge maximale atteinte pendant l'essai (N);

S_b : la surface chargée des briques (mm²).

Les déformations des briques sont enregistrées à l'aide d'un capteur de déplacement installé au-dessus de la brique. Une barre métallique est placée au-dessus de chaque brique pour assurer une meilleure transmission des efforts (photo IV.9).

Après 60 jours (en absence de normes, nous suivons la norme ARS 680-1996 recommandée pour les BTC qui exige une cure entre 30 et 90 jours), et pour la caractérisation des briques (module de Young, la résistance à la compression, déformations), 18 échantillons d'adobes sont surfacés d'une couche de 1cm de plâtre, pour assurer la distribution des forces lors du chargement vertical (photo IV.10). Le test se fait en utilisant une machine à compression (Controlab) de 160kN de capacité, selon la norme européenne NF EN 772-1 jusqu'à la rupture des briques.

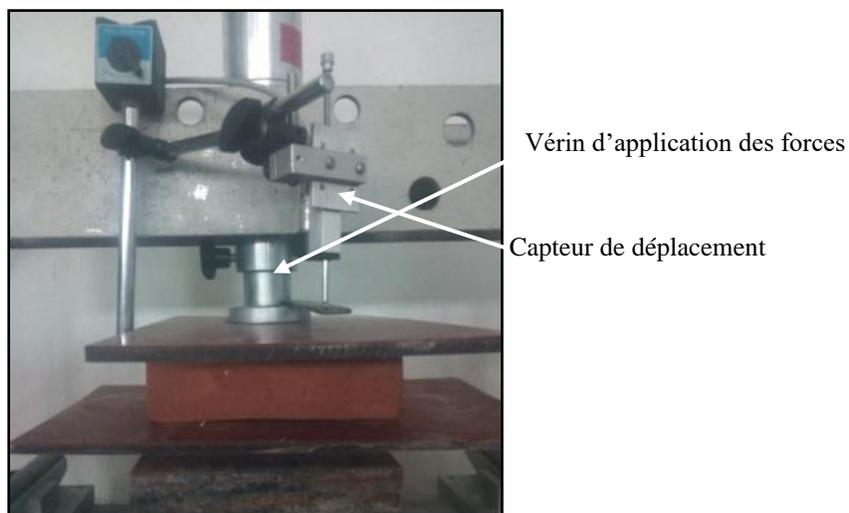


Photo IV. 9 : Appareillage pour la détermination des propriétés mécaniques des adobes.



Photo IV. 10 : Surfaçage des adobes par une couche de 1cm de plâtre.

Les propriétés mécaniques des 3 types des briques (module de Young, résistance à la compression et déformations) sont présentées dans la figure IV.3 et résumées dans le tableau IV.5.

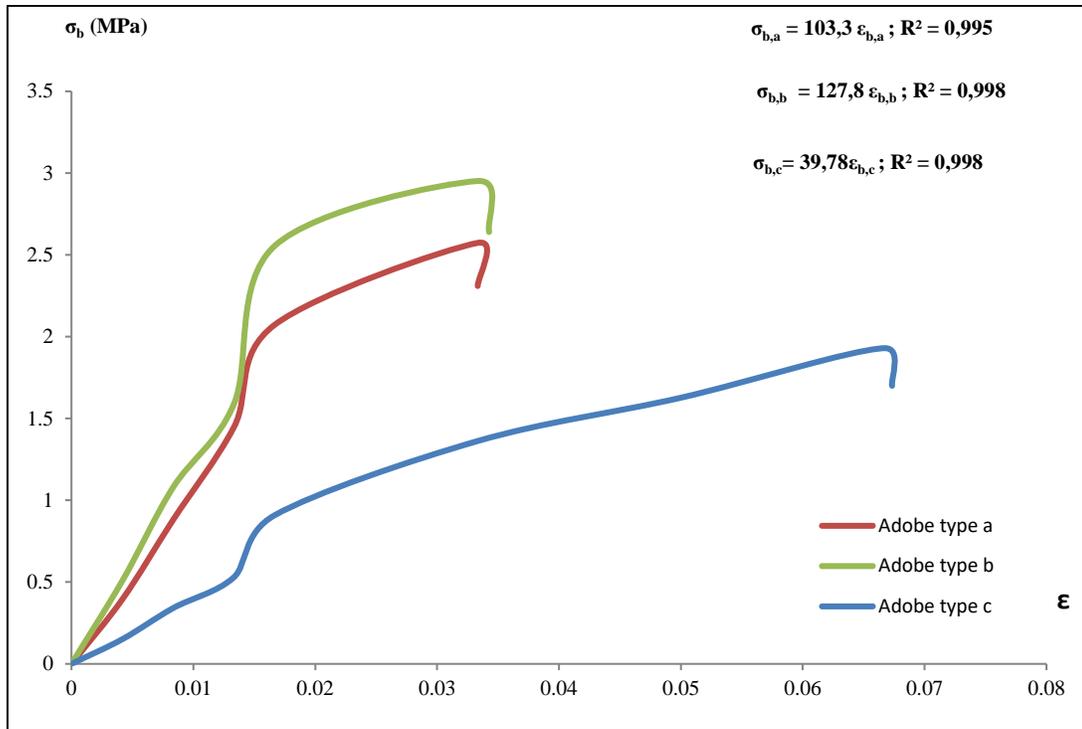


Figure IV. 3: Courbes contraintes-déformations des adobes de type a, b et c.

La vitesse de chargement adoptée est : 0,5kN/s.

D'après le tableau IV.5 et la figure IV.3, nous pouvons remarquer que les adobes b sont plus résistants que les adobes a et c, avec une contrainte élastique à la compression avoisinant 1MPa.

En outre, la brique de type c est moins déformée que les briques a et b et plus maniable lors de sa fabrication (durée de malaxage 2 fois moindre que pour les adobes non stabilisés a et b). Cette amélioration de la consistance au cours du temps du mélange stabilisé à la chaux est due à l'amélioration des propriétés physiques des argiles par la chaux (Firoozi A., 2017).

Tableau IV. 5: Propriétés mécaniques des trois types d'adobe à 60 j.

Type	N°	σ_b (MPa) à 60j	$\epsilon_b(10^{-3})$	E_b (MPa)
Adobe a	1	0.800	11.80	103.44
	2	0.802	12.12	103.40
	3	0.807	12.07	103.33
	4	0.790	12.00	103.29
	5	0.814	12.43	103.39
	6	0.823	12.06	102.95
Moyenne		0.806	12.08	103.30
Adobe b	1	0.940	13.12	126.90
	2	0.980	13.30	127.94
	3	0.898	13.14	127.71
	4	0.960	13.28	128.03
	5	0.972	13.40	127.70
	6	1.094	13.74	128.52
Moyenne		0.974	13.33	127.80
Adobe c	1	0.604	10.02	39.39
	2	0.633	10.21	39.80
	3	0.580	10.32	39.50
	4	0.650	10.19	39.44
	5	0.630	10.22	39.70
	6	0.725	10.66	40.85
Moyenne		0.637	10.27	39.78

IV.4. Composition et caractérisation du mortier en terre

IV.4.1. Composition du mortier en terre

La composition du mortier en terre étudié est la même que celle des briques de type a (tableau IV.6) (photo IV.11a), avec une augmentation dans la quantité de l'eau de gâchage pour assurer la fluidité et la maniabilité (Paulay T. et Priestley M.,1992), et diminuer la capacité de succion des briques (Lateb M., 1995).

Tableau IV. 6 : La composition du mortier en terre.

	Sable de dunes (%)	Argile (%)	Quantité d'eau (%)
Mortier en terre	75	25	28

IV.4.2. Caractéristiques mécaniques du mortier en terre

L’essai est réalisé en suivant le procédé utilisé pour les briques d’adobe, où nous utilisons une machine à compression de capacité 160kN (Controlab). Nous compressons 08 échantillons de 4 x4 x 16 cm³ (photo IV.11b) selon la norme Européenne EN 1015-11. Les déformations sont aussi enregistrées à l’aide d’un capteur de déplacement. L’appareillage est connecté à un système d’acquisition des données pour l’enregistrement des résultats. La courbe contrainte déformation et les propriétés mécaniques (module de Young, résistance à la compression, déformations) du mortier en terre à 60 jours sont présentés dans la figure IV.4 et dans le tableau IV.7.

Les essais réalisés nous permettent de déterminer la résistance à la compression Rc à partir de la charge de rupture Fc, avec :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \dots\dots\dots (IV.2)$$

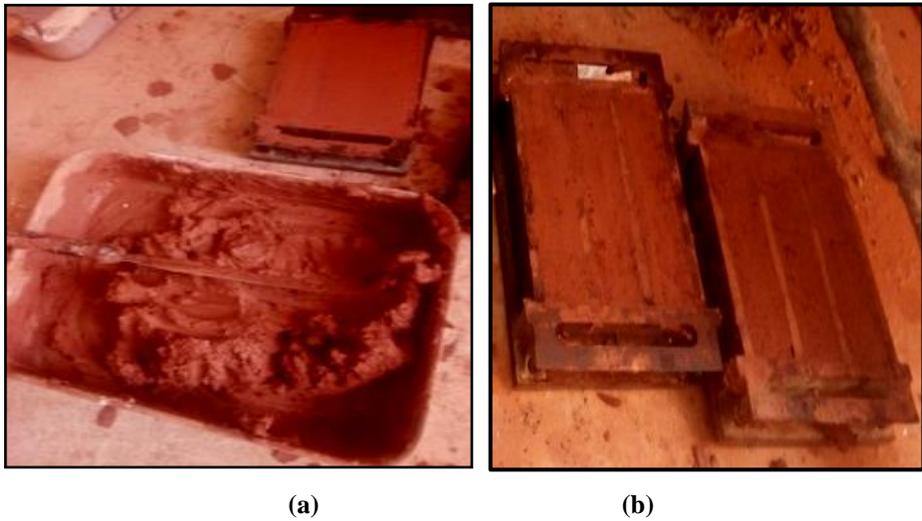


Photo IV. 11 : Préparation des éprouvettes de mortier en terre pour les essais préliminaires.

Vitesse de chargement : 0,5 kN/s

Tableau IV. 7: Propriétés mécaniques du mortier en terre à 60 jours

Propriétés	σ_m (MPa)	ϵ_m (10 ⁻³)	$\sigma_m = E_m \cdot \epsilon_m + C$
Mortier en terre	0,28	84	$\sigma_m = 55,93\epsilon_m - 4,45 \dots\dots\dots (IV.3)$

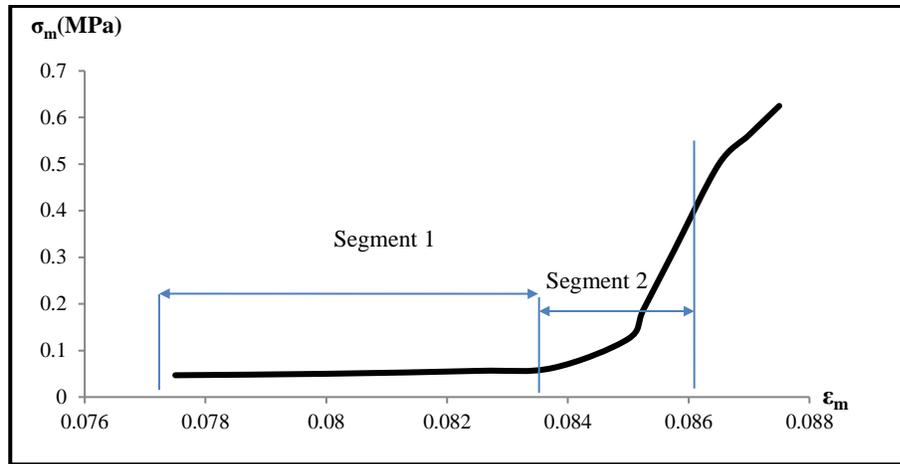


Figure IV. 4: Courbe contrainte déformation du mortier en terre.

Le mortier en terre étudié possède un comportement linéaire dans le domaine élastique (33% de la charge maximale de rupture). La courbe obtenue (figure IV.4) possède deux segments de droite, ce qui signifie que le matériau a tendance au départ de voir des pores se refermer (segment 01) pour changer ensuite de comportement d'un matériau plus compact (segment 02). Ces pores sont visibles sur toute la masse des éprouvettes sous forme de microfissures. Aussi, il est important de noter que la différence dans les propriétés du mortier en terre et celles des adobes de type a, malgré qu'ils aient la même composition, est due essentiellement à la grande quantité d'eau utilisée dans la préparation du mortier.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, et à travers les essais effectués nous pouvons conclure et retenir les enseignements suivants :

- ✓ Le sable de dunes de la région d'étude Adrar est considéré comme étant un sable propre riche en éléments fins. Alors que l'argile d'Adrar est considérée comme une argile très plastique, qui possède une activité normale proche du minérale Illite.
- ✓ Les trois types d'adobes sont différents par leurs compositions, ce qui fait que leurs densités changent et sont aussi différentes. Les briques de type « a » et « b » sont plus lourds que les briques de type « c » stabilisés à la chaux vive.

- ✓ Les adobes présentent un comportement mécanique linéaire dans le domaine élastique. Les résistances à la compression atteignent 1MPa pour les adobes de granulométrie inférieure à 3mm (type b) et diminue à 0,806MPa pour les adobes de type a, et à 0,637MPa pour les briques stabilisés à la chaux. Ce dernier type est le moins déformé et le plus maniable lors de sa fabrication.
- ✓ L'augmentation de la quantité d'eau dans la composition du mortier, bien qu'il ait la même composition que les adobes de type a, diminue sa résistance mécanique à 0,3 MPa et son module de Young à 56MPa, et augmente les déformations.
- ✓ Le comportement mécanique à la compression du mortier en terre est linéaire dans le domaine élastique, mais diffère de celui des adobes. La courbe contrainte déformation montre que le matériau a tendance au départ de voir ses pores se refermer pour changer ensuite de comportement à l'image d'un matériau plus compact.

Chapitre V : Etude expérimentale sur murets

V.1. Introduction

Ce dernier chapitre est consacré à la construction des murets et l'expérimentation sur ces derniers. Pour cela, les briques confectionnées, ainsi qu'une dizaine de kilogramme des matières premières sont transportées au laboratoire EOLE de l'université de Tlemcen. La taille des murs ainsi que les dimensions des briques sont conditionnées par les gabarits des structures d'expérimentation disponibles au laboratoire EOLE.

Les murets confectionnés sont divisés en trois catégories (selon le type d'adobe utilisé) : A, B et C. Ils seront ensuite soumis à un chargement uni-axial de compression pour la détermination des paramètres de leurs comportements sous l'action de charges conformément à des situations d'exploitation dans une structure concrète.

Après 60 jours, nous présentons les résultats expérimentaux des mesures sur les murets en terre. Les résultats sont présentés pour les trois types de murets A, B et C, qui sont hourdés avec le même type de mortier de terre.

Aussi, nous allons présenter les différentes courbes contraintes déformations, les résistances à la compression, les modules de Young, ainsi que les déformations des murets. Une étude analytique inspirée des travaux antérieurs (Page A., 2014) a été mise au point. Celle-ci nous donnera l'expression analytique du module de Young de la maçonnerie en adobe en fonction des propriétés mécaniques de ses constituants : briques et mortier. Les valeurs analytiques obtenues seront ensuite comparées avec celles obtenues expérimentalement.

V.2. Construction des murets :

Pour notre travail, et pour les besoins de cette étude, nous réalisons 09 murets en adobe. Les adobes confectionnés et les matières premières sont transportés au laboratoire EOLE de l'université de Tlemcen (photo V.1), avec :

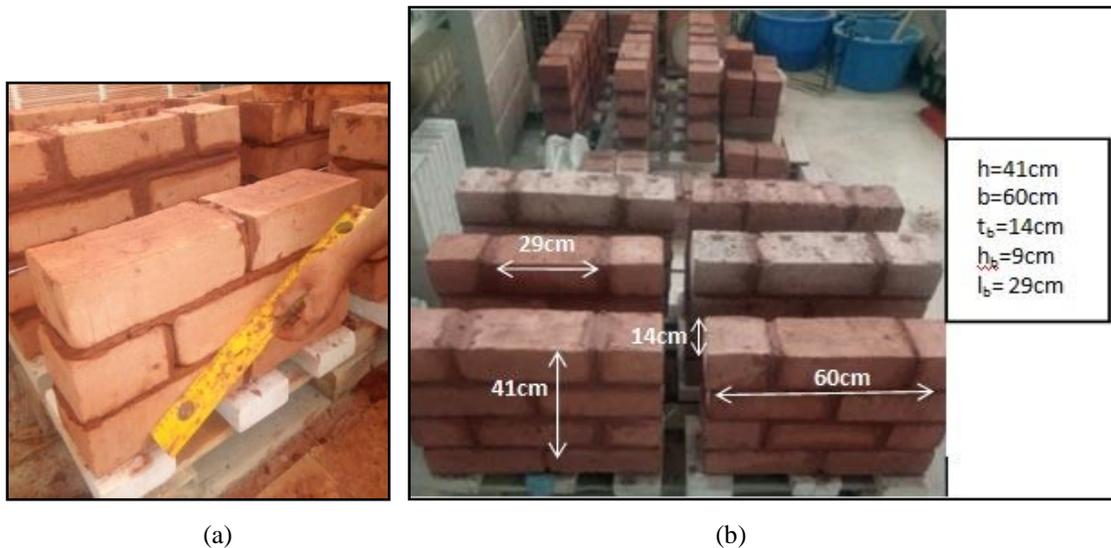
- Murets type A : construits à base des adobes de type a et du mortier en terre ;

- Murets type B : construits à base des adobes de type b et du mortier en terre ;
- Murets type C : construits à base des adobes de type c et du mortier en terre.

Les murets sont construits selon les règles de l'art, tout en respectant la planéité transversale et longitudinale (Photo V.2a). Les dimensions des murets sont fonction des dimensions du gabarit d'essai (voir photo V.10), et elles sont illustrées dans la photo V.2b. Les dimensions finales des murets sont $60 \times 40 \times 14 \text{ cm}^3$ au lieu de $59 \times 40 \times 14 \text{ cm}^3$, due aux défauts de fabrication des briques.



Photo V. 1 : Stockage des adobes et des matières premières destinés à l'étude.



(a)

(b)

Photo V. 2 : (a) Construction des murets, (b) Dimensions des murets.

V.2.1. Matériel utilisé :

Le matériel utilisé pour la confection des murets en adobe est le suivant : truelles, auge, fil à plomb, niveau, etc. et transpalette (Photo V.3).

L'épaisseur du joint de mortier horizontal et vertical est fixée à l'aide d'un gabarit en bois (photo V.4)



Photo V. 3 : Transpalette pour le déplacement des adobes et des murets après séchage.



Photo V. 4 : Gabarit en bois fixant l'épaisseur du joint de mortier.

V.2.2. Principe de la construction des murets :

Pour la construction des murets nous avons suivi les différentes étapes :

- Préparation de la pâte à mortier (photo V.5)
- Mouillage préalable des briques de terre crue (photo V.6) pour éviter l'absorption de l'eau du mortier pendant la réalisation de la maçonnerie (de préférence par l'utilisation d'une éponge pour éviter les effets de l'humidité sur la brique crue),

- Mise en place du fil avant la disposition des blocs en maçonnerie (photo V.7),
- Etalage du mortier suivant l'épaisseur et ce à l'aide du gabarit fixant ainsi les dimensions du joint (photo V.8),
- Vérification de la planéité du mur avec la règle en bois et le fil à plomb ;
- Surfaçage des murets avec une couche de 1cm de plâtre pour assurer la planéité de la surface supérieure (photo V.9) ;
- Les 09 murets sont stockés dans le même lieu de construction, à cause de la fragilité du matériau terre ;

L'écrasement est effectué après 60 jours de séchage des murets (en absences de normes, nous suivons le même temps de séchage que pour les briques et le mortier) aux conditions du laboratoire ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) pour assurer une meilleure adhérence entre le mortier et les brique.



Photo V. 5 : Préparation de la pâte du mortier pour la construction des murets.



Photo V. 6 : Mouillage des adobes avant leurs utilisations.



Photo V. 7: Placement du fil à plomb pour assurer la planéité du muret.



Photo V. 8 : Etalement du joint de mortier à l'aide du gabarit en bois.



Photo V. 9 : Surfaçage des murets par une couche de 1cm de plâtre.

V.2.3. Appareillage des essais sur les murets

Pour la réalisation des essais nous utilisons (photo V.10) :

- Un portique de 1,5 m x 1,7 m ;
- Une barre métallique pour la transmission des efforts ;
- Un vérin de capacité 160 kN exerçant des paliers de pression de 0,5kN/s jusqu'à la rupture ;

- Un système hydraulique ;
- Un capteur de déplacements placé au-dessus du muret ;
- Un système d'acquisition des données pour le traçage des courbes contraintes-déformations.



Photo V. 10 : Dispositif des essais sur murets.

V.2.4. Principe d'essai :

Après 60 jours de séchage, les 09 murets (03 murets pour chaque type d'adobe a, b et c) sont soumis à un chargement uni-axial de compression jusqu'à la rupture pour la détermination de la résistance à la compression selon la norme européenne EN1996-1-1. Les déformations sont aussi enregistrées à l'aide d'un capteur de déplacement installé au-dessus de chaque muret. Aussi, une barre métallique est placée au-dessus des murets pour assurer une bonne transmission (uniforme) des efforts (photo V.10).

Lorsque la contrainte de rupture est atteinte, nous observons les mêmes modes de rupture :

- Rupture par fissuration des briques (photo V.11 et V.12);
- Fissuration des joints (photo V.12, V.13 et V.14a) ;
- Fissurations parallèles au plan de chargement sur la totalité du mur ;
- Rupture par cisaillement localisé au milieu des murets (photo V.14b et V.14c) ;
- Fissuration au niveau des interfaces brique-mortier (photo V.15) avec un arrachement d'une partie du mortier par la brique.



Photo V. 11 : Rupture des murets de type A : apparence de la première fissure à $t=34s$; rupture à $t=42s$;



Photo V. 12 : Rupture des murets de type B.

En analysant les modes de rupture apparus sur les murs construits en matériau terre, nous remarquons que la maçonnerie en adobe possède le même comportement mécanique que la maçonnerie conventionnelle, mais avec des résistances plus faibles. Ces murs en adobes sont donc plus fragiles. Cette fragilité peut être due au fait qu'ils sont construits avec des matériaux non monolithiques, contrairement aux matériaux cimentaires ou cuits.



Photo V. 13 : Rupture du muret type C : apparence de la première fissure à $t=26s$; Rupture du muret à $t=63s$.

Aussi, au cours de l'essai de chargement des murets, les fissures sont visibles en premier temps dans les extrémités des adobes (photo V.11 et V.13), puis se propagent au niveau du mortier (photo V.13 et V.14a), due à son comportement mécanique plus faible en comparaison à celui des briques en adobes.

Lorsque la limite de rupture est atteinte, nous observons une rupture par glissement des murets de (photo V.14b et V.14c) avec des fissurations sur l'interface adobe-mortier (photo V.15). Ces modes de rupture sont dus essentiellement à la compression triaxiale engendrée au niveau des joints du mortier et à une compression et une traction biaxiale des adobes.

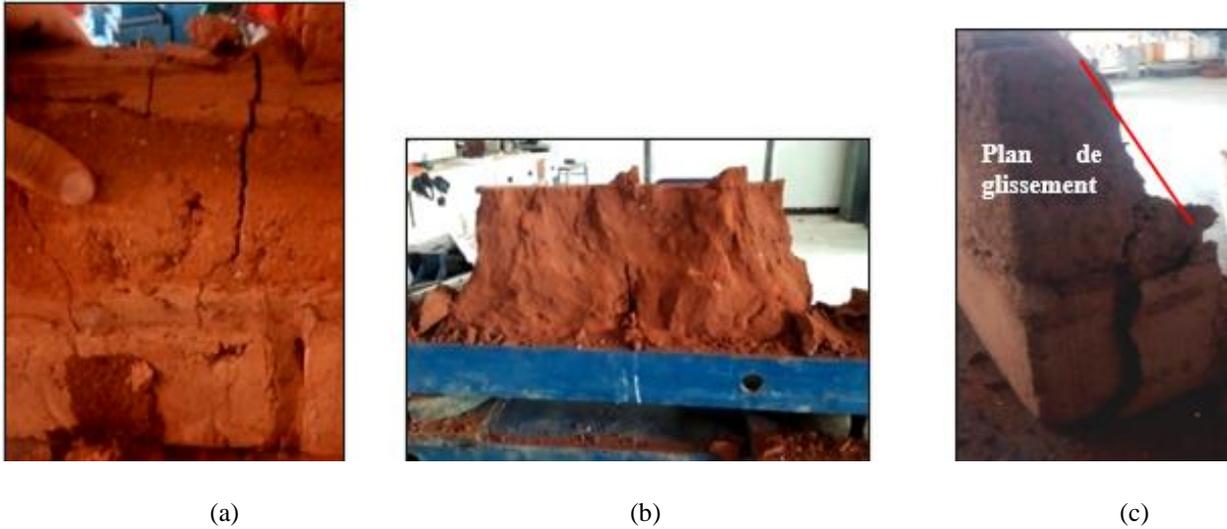


Photo V. 14: (a) Fissuration des adobes et du joint de mortier des assemblages après rupture ; (b) et (c) les murets après rupture.



Photo V. 15 : Fissuration des interfaces brique – mortier.

V.3. Résultats expérimentaux des murets

V.3.1. Courbes contraintes déformations des murets en terre

Les modules de Young, les résistances à la compression et les déformations des murets sont déterminés dans le domaine élastique (Mohamed G., 2007) (pour la maçonnerie, ce domaine a été déterminé à partir de la pente sécante entre les contraintes à 5% et 33% de la résistance maximale de compression des courbes contrainte- déformation) (figure V.1). Selon Mohamed G. (2007) au-delà de ce domaine les déformations deviennent importantes, très disparates et difficiles à formuler.

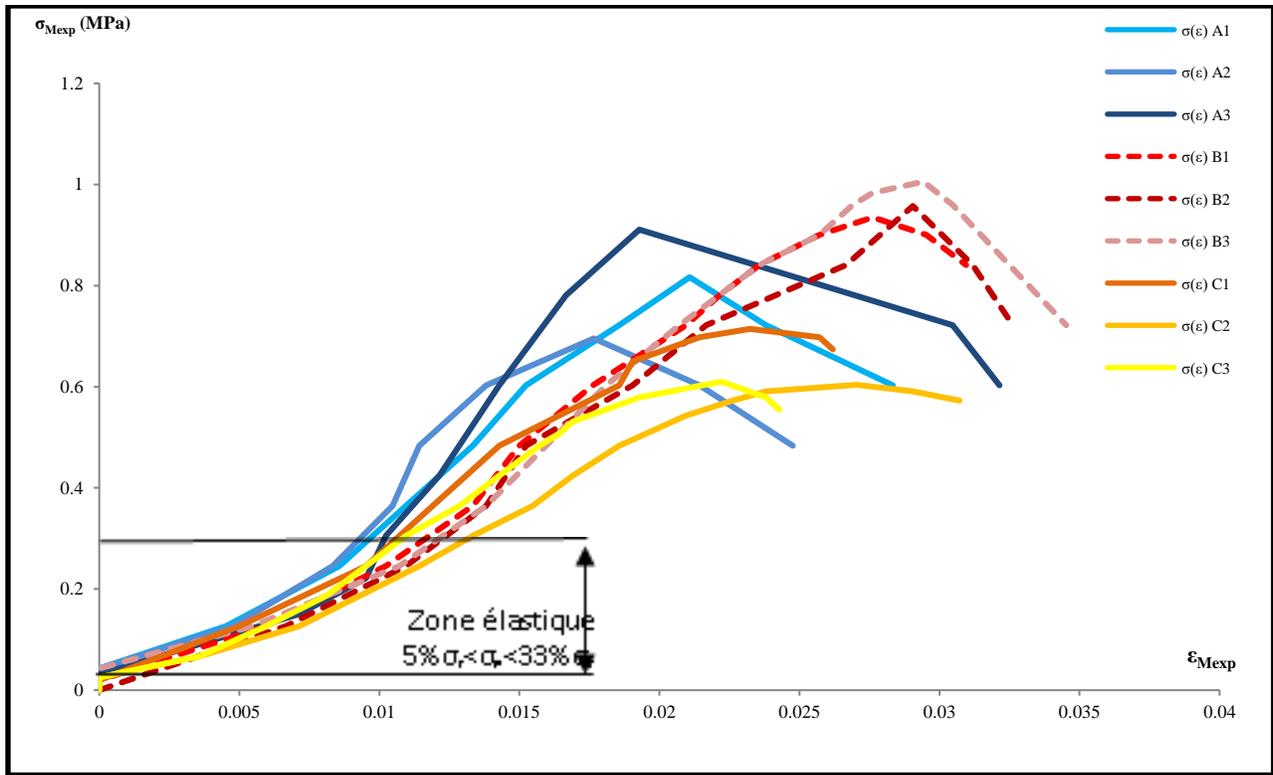


Figure V. 1: Courbes contraintes déformations des murets A, B et C.

Les murets de type A et B sont caractérisés par un comportement rigide dans le domaine élastique. La courbe contrainte-déformation possède un coefficient de corrélation R^2 entre 0,90 et 0,97 avec une pente qui présente selon la loi de comportement élastique le module d'élasticité E . Lorsque la contrainte limite de rupture est atteinte, nous observons un comportement fragile des murets A et B, caractérisé par une forme aiguë de la courbe $\sigma_{A,B}(\epsilon)$ (figure V.1). Alors que les murets de type C construits à base des adobes stabilisés à la chaux possèdent le même comportement mécanique dans le domaine élastique, mais avec un module de Young faible par rapport aux murets A et B. Lorsque la contrainte limite de rupture est atteinte, nous observons une forme arrondie de la courbe $\sigma_C(\epsilon)$, ce qui signifie un comportement d'adoucissement (figure V.1) contrairement aux murets A et B qui possèdent une rupture franche.

V.3.2. Propriétés mécaniques des murets en terre

Le module de Young, la résistance à la compression et les déformations des murets A, B et C sont présentés dans les tableaux V.1, V.2 et V.3 respectivement.

Tableau V. 1: Modules de Young des murets A, B et C obtenus expérimentalement à 60 jours.

Type de muret	A			B			C		
N°	1	2	3	1	2	3	1	2	3
E_{Mexp} (MPa)	28,490	28,750	22,470	28,320	24,120	29,05	25,670	20,220	23,650
Moyenne	26,570			27,163			23,180		
E_{Mexp}/E_b	0,26			0,21			0,58		
E_{Mexp}/E_m	0,39			0,40			0,34		

Tableau V. 2: Résistances à la compression des murets A, B et C obtenues expérimentalement.

Type de muret	A			B			C		
N°	1	2	3	1	2	3	1	2	3
σ_{Mexp} (MPa)	0,270	0,230	0,301	0,309	0,316	0,332	0,236	0,199	0,201
Moyenne	0,267			0,319			0,212		
σ_b (MPa)	0,844			0,936			0,697		
σ_m (MPa)	0,28								
σ_{Mexp}/σ_b	0,32			0,34			0,30		
σ_{Mexp}/σ_m	0,95			1,1			0,8		

Les propriétés mécaniques des murets en adobe obtenues expérimentalement sont inférieures à celles de ses constituants (brique et mortier). Nous constatons que la diminution des propriétés mécaniques de la maçonnerie en comparaison de ces constituants est due aux lignes de discontinuité entre les briques et les joints de mortier : les interfaces. Ces derniers sont déjà traités dans la maçonnerie conventionnelle par Fouchal F. (2006). En effet, le module de Young de la maçonnerie est inférieur 3 fois à celui du mortier, et 2 à 5 fois au module élastique E_b des briques a, b et c. Aussi, le rapport σ_{Mexp}/σ_b de la résistance à la compression des murets à celles des adobes est le même pour les trois types des adobes a, b et c. Il a pour valeur 0,33.

Également, les déformations des murets A, B et C sont similaires à celles des adobes a, b et c respectivement, avant assemblage (tableau V.3) ; aussi, elles sont 6 à 8 fois inférieures à celles du mortier en terre testé avant assemblage.

Tableau V. 3: Déformations ϵ des murets A, B et C obtenues expérimentalement à 60 j.

Type de muret	A			B			C		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
N°									
$\epsilon_b (10^{-3})$	12,08			13,33			10,27		
$\epsilon_m (10^{-3})$	84			84			84		
$\epsilon_{Mexp} (10^{-3})$	11	10,5	15,7	13,3	13,8	13,8	9,5	11,4	9,5
Moyenne	12,4			13,6			10,1		
$\epsilon_{Mexp}/\epsilon_b$	1,03			1,02			0,98		
$\epsilon_{Mexp}/\epsilon_m$	0,148			0,162			0,120		

Les murets du type C construits à base de briques stabilisées à la chaux sont moins déformés que les murets A et B, bien qu'ils soient moins résistants. D'après les deux tableaux V.1 et V.2 nous pouvons déduire la relation entre le module de Young E_M et la résistance à la compression σ_M de la maçonnerie, avec :

$$E_M \approx (85 - 115) \sigma_M \dots \dots \dots (V.1)$$

Aussi, Il est important de mentionner que l'obtention de grandes résistances n'est pas un objectif principal dans les constructions en adobe dans la région, vu le style urbanistique des constructions à étages réduits (généralement, au maximum en RDC + 1 étage). L'annexe 3 présente un exemple de la descente de charge d'une maison en adobe construite en 1990, qui est en bonne état jusqu'à nos jours (photos V.16). La descente de charge nous donne une contrainte maximale de 0,06MPa (Annexe 3), inférieure à la charge admissible du sol ($\sigma_{sol}=0,15$ MPa).

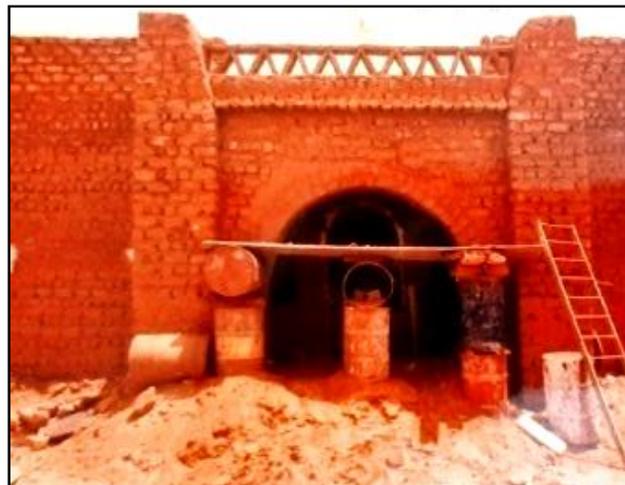


Photo V. 16: Façade d'une maison en adobe construite en 1990 par un artisan, à Timimoune, Algérie.

V.4. Etude analytique

Parmi les formules analytiques qui déterminent les propriétés des murs en maçonnerie en fonction de celles des briques et du mortier, nous retenons celle de l'Eurocode 96. Elle détermine la résistance mécanique à la compression de la maçonnerie (blocs en argile, en silicate de calcium, blocs de béton, blocs en béton autoclave, pierres industrielles, etc.) en fonction de la résistance en compression du mortier et celle du bloc, avec l'utilisation d'un coefficient de forme K (EN 96-1-1, 2005).

Plusieurs chercheurs dans ce domaine ont élaboré d'autres formules : Page A.W. (1981), Bui T.L. (2014). Mais ces formules donnent toujours des résultats plus importants que ceux expérimentaux. Dans ce présent travail, nous présentons notre formule analytique pour le calcul des propriétés mécaniques (σ_{Manal} , E_{Manal} , ϵ_{Manal}) d'un mur en brique de terre crue.

Hypothèses :

Nous travaillons avec les mêmes hypothèses utilisées par Page A. W. (1981) et Bui T.L.(2014), avec :

- I. La contrainte est uniformément distribuée sur toute la section horizontale ;
- II. Les unités de maçonnerie et le mortier sont des matériaux homogènes et isotropes ;
- III. La liaison entre les briques et le mortier est parfaite ;
- IV. Les joints verticaux sont négligés ;
- V. L'épaisseur du joint est constante ;
- VI. Le déplacement vertical total de l'assemblage (ΔL_M) est égal à la somme du déplacement dû à la brique (ΔL_b) et à celui dû au mortier (ΔL_m) ;
- VII. La contrainte de compression appliquée sur le muret est la même dans tous les composants.

V.4.1. Formule analytique

D'après l'hypothèse VI, nous pouvons écrire :

$$\Delta L_M = \Delta L_b + \Delta L_m \dots \dots \dots (V.2)$$

Le déplacement s'écrit : $\Delta L = \varepsilon \cdot L$,

Alors :

$$L_M \varepsilon_M = \varepsilon_b L_b + \varepsilon_m L_m \dots\dots\dots(V.3)$$

D'après les formules (V.2) et (V.3), nous pouvons écrire :

$$\frac{\sigma_M}{E_M} L_M = \frac{\sigma_b}{E_b} L_b + \left(\frac{\sigma_m - C}{E_m} \right) L_m \dots\dots\dots(V.4)$$

L'application de l'hypothèse VII nous donne :

$$\sigma_M = \sigma_b = \sigma_m \dots\dots\dots(V.5)$$

L'équation (V.4) devient :

$$\frac{L_M}{E_{Manal}} = \frac{L_b}{E_b} + \frac{L_m}{E_m} - \frac{C \cdot L_m}{E_m \sigma_m} \dots\dots\dots (V.6)$$

Alors, le module d'élasticité analytique de la maçonnerie E_{Manal} s'écrit comme suit :

$$E_{Manal} = \frac{L_M}{\left[\frac{L_b}{E_b} + \frac{L_m}{E_m} - \frac{C \cdot L_m}{E_m \sigma_m} \right]} \dots\dots\dots(V.7)$$

Les modules de Young E_{Manal} , la résistance à la compression compressive σ_{Manal} et les déformations ε_{Manal} des 03 types de murets calculés à partir de l'équation (V.7) sont résumés dans le tableau V.4.

Tableau V. 4 : Résultats analytiques du module de Young, de la résistance à la compression et des déformations des trois types de murets A, B et C

Type de muret	A	B	C
$E_{\text{Manal}}(\text{MPa})$	30,88	31,28	27,89
$E_{\text{Manal}}/E_{\text{Mexp}}$	1,2	1,2	1,2
$\varepsilon_{\text{Manal}} (10^{-3})$	12,93	13,40	12,26
$\varepsilon_{\text{Manal}}/\varepsilon_{\text{Mexp}}$	1,04	0,98	1,21
$\sigma_{\text{Manal}}(\text{MPa})$	0,399	0,419	0,342
$\sigma_{\text{Mexp}}/\sigma_{\text{Manal}}$	0,7	0,8	0,6
$\sigma_{\text{M(EN96)}}(\text{MPa})$ (équation II.4)	0,263		
$\sigma_{\text{Mexp}}/\sigma_{\text{M(EN96)}}$	1,01	1,07	0,94

Les résultats obtenus dans le tableau V.4 nous donnent un aperçu sur la fiabilité des essais effectués, où les propriétés mécaniques (E_{Mexp} , E_{Manal} , σ_{Mexp}) des murets de type B construits avec les briques b, qui possèdent les plus grandes propriétés mécaniques ($\sigma_{b,b}$, $E_{b,b}$), sont ceux qui ont le comportement le plus résistant en comparaison avec les murets A et C.

La formule analytique (II.4) de l'Eurocode 96, nous donne des résultats similaires à ceux trouvés expérimentalement, avec un écart type inférieur à 4%.

Aussi le rapport $\sigma_{\text{Mexp}}/\sigma_{\text{Manal}}$ est égal à 0,7 (tableau V.4). Cette différence est due certainement à la simplicité de l'approche analytique qui ne prend en compte que les déformations à la surface, d'une part et d'autre part, la différence des conditions de prise, d'humidification, et d'emplacement du mortier dans les deux cas. Pour le premier cas expérimental, le mortier en terre d'épaisseur de 1cm, est soumis à une compression triaxiale dans le muret, alors que dans le cas analytique, nous considérons que la compression appliquée par le dispositif sur le prisme de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ est seulement uniaxiale.

V.5. Conclusion

Cette étude nous a permis de mieux comprendre le comportement de la maçonnerie en brique de terre crue, et de voir la complexité de l'interprétation des résultats dans un assemblage hétérogène.

La construction des murets en terre nous a donné une idée sur la fragilité de ce matériau, plus précisément dans la phase de transport des briques d'adobes. Malgré cet inconvénient, la construction des murets est réalisable moyennant des précautions dans la manutention. Par contre

l'expérimentation sur les murets nous a donné un comportement similaire à celui des matériaux conventionnels.

Les murets testés présentent les mêmes modes de rupture, avec des fissurations au niveau des joints, des briques, et des interfaces joint – brique. Les courbes contraintes - déformations des murets réalisés à l'aide de briques de types a et b montrent un comportement linéaire rigide dans la partie élastique, ce qui donne un comportement fragile à la rupture. En revanche, pour les murets dont les briques sont stabilisés à la chaux, nous remarquons les mêmes modes de rupture mais avec un comportement plus doux.

Si nous comparons les propriétés mécaniques des murets obtenues expérimentalement avec ceux du mortier et des briques, nous trouvons que la résistance des murets σ_{Mexp} est plus faible que celle du mortier seul. Aussi elle est environ 33% inférieure à la résistance à la compression σ_b des briques seules. Ceci est due aux lignes de discontinuité au niveau des interfaces brique-mortier.

De même nous constatons que le module de Young de la maçonnerie est 2,5 à 3 fois inférieur au module élastique E_m du mortier, et 1,7 à 4,7 fois, au module élastique E_b des briques a, b et c. En outre, l'utilisation d'un capteur de déplacement nous a permis d'enregistrer les déformations des murets qui sont 6 à 8 fois plus faibles que celles du mortier en terre, et prennent les mêmes valeurs que les déformations des briques.

Dans cette étude, nous citons aussi la formule analytique de l'Eurocode 6 (EN 96-1-1, 2005) donnant la résistance à la compression de la maçonnerie en fonction de celle du mortier et des briques. Les résultats obtenus sont similaires aux résultats trouvés dans la partie expérimentale avec un écart type inférieur à 4%. L'étude analytique, inspirée des travaux de A. W. Page (1981) et de T. L. Bui (2014), nous a permis de fournir une formule analytique donnant le module de Young de la maçonnerie en brique de terre crue E_{Manal} en fonction des propriétés mécaniques de la brique en terre crue (E_b) et du mortier (E_m, σ_m) déterminées isolément hors murets. Également, les déformations et les contraintes de compression des murets sont déterminées analytiquement.

Les résultats obtenus sont similaires aux résultats expérimentaux avec une différence due essentiellement à la simplicité de l'approche analytique, et la différence des conditions de prise, de l'humidification et de l'emplacement du mortier dans les deux cas.

Conclusion générale :

L'objectif de départ de ce travail était la valorisation de la construction en maçonnerie de briques de terre crue, dans les régions à climat aride, tout en adhérant aux principes du développement durable. Cela pour mettre en valeur des bénéfices et les retombées positives des constructions en terre que les populations semblent abandonner au profits de constructions dites « modernes », à base de matériaux plus énergivores qui s'adaptent mal à l'environnement Saharien.

L'étude globale comportant plusieurs facettes pour la valorisation d'un savoir-faire ancestral, nécessitera plusieurs approches. Nous nous sommes intéressés à l'aspect comportement mécanique des briques de terre crue (adobes) et stabilisées à la chaux.

Nous préconisons à Adrar la valorisation des constructions en terre crue, par une série d'essais mécaniques sur des briques en terre crue, de mortier en terre, et des murets construits en terre. Nous avons pour ce faire, confectionné plus de 120 briques manuellement, à base de matériaux locaux de la région d'Adrar (sable de dunes et l'argile d'Adrar), regroupées en trois lots : le 1^{er} lot, de type a (granulométrie <1,6mm), le second lot de type b (granulométrie <3mm), et le troisième lot stabilisé à la chaux, nommé type c (granulométrie <3mm + la chaux). Au total, neuf murets ont été confectionnés : A, B et C (trois muret pour chaque type d'adobe).

Les essais géotechniques sur les matières premières montrent que le sable de dunes de la région d'Adrar est un sable propre riche en éléments fins. Alors que l'argile d'Adrar est appartient aux sols très plastique et possède une activité normale proche du minéral Illite. Elle est apte à la production des produits rouges, et elle est considérée comme une matière première des matériaux cuits.

Les adobes ont été confectionnés manuellement à l'air libre dans des moules métalliques de dimensions (longueur x largeur x hauteur) 29 x 14 x 9 cm³ au lieu de dimensions traditionnelles de 40 x 20 x 15 cm³, due à l'absence de normes nationales et internationales qui imposent des dimensions normalisées de la construction en adobe, d'une part, et d'autre part pour faciliter leurs transports et leur utilisation pendant l'élévation des murs.

La campagne expérimentale exécutée sur les adobes et le mortier en terre a également montré le pouvoir mécanique de ces matériaux terreux. Les adobes présentent un comportement linéaire rigide dans le domaine élastique avec des résistances à la compression à l'âge de 60j près de 1MPa

Conclusion générale

pour le type a ($\sigma_{b,a}=0,844\text{MPa}$) et b ($\sigma_{b,b}=0,936\text{MPa}$), et atteint une valeur de $0,697\text{MPa}$ pour l'adobe stabilisé à la chaux vive de type c. Selon le Centre de Recherche et d'Application Terre (CRATerre), cette valeur peut être augmentée au double après 30 semaines. Aussi, la brique de type c est moins déformée que les briques a et b et plus maniable lors de sa fabrication. Cela est due à l'amélioration des propriétés physiques des argiles par la chaux. Le module de Young est de l'ordre de $103,3\text{MPa}$ pour les adobes a, environ 128MPa pour les adobes b, et prend une valeur moins de 40MPa pour le type c.

Le mortier en terre possède la même composition que les adobes de type a avec une augmentation dans la quantité de l'eau de gachage (teneur en eau 28%) pour assurer la fluidité, la maniabilité, et diminuer les effets préjudiciables du durcissement du mortier dans l'assemblage. Leur comportement est légèrement différent à celui des adobes étudiés. Il possède un comportement linéaire dans le domaine élastique, avec une courbe qui contient deux segments de droite. Le premier segment signifie que le matériau a tendance au départ à voir des fissures se refermer, pour changer ensuite de comportement d'un matériau plus compact (segment 02). Aussi, il faut noter que notre mortier possède des propriétés mécaniques différentes à celles des adobes de type a, bien qu'ils ont la même composition due essentiellement à la grande quantité d'eau utilisée dans la préparation du mortier.

Suite à l'étude du comportement mécanique des adobes et du mortier, les neufs murets en terre ont été soumis au chargement uni-axial de compression. Ils présentent un comportement linéaire rigide dans le domaine élastique. Alors que lorsque la contrainte limite de rupture est atteinte, nous observons un comportement fragile des murets A et B, caractérisée par une forme aigüe de la courbe contraintes – déformations. Également la courbe contraintes – déformations des murets type C construits avec les adobes stabilisés à la chaux présente une forme arrondie, ce qui signifie un comportement d'adoucissement contrairement aux murets A et B qui possèdent une rupture franche.

Les essais mécaniques sur les murets conduisent à des fissurations aux extrémités des briques, puis se propagent au niveau du mortier, avec des fissurations parallèles au plan de chargement sur la totalité du mur. Lorsque la limite de rupture est atteinte, nous observons une rupture par glissement des murets avec des fissurations sur l'interface adobe-mortier. Ces modes de rupture

Conclusion générale

sont dus essentiellement à la compression triaxiale engendrée aux niveaux des joints du mortier et à une compression et une traction bi-axiale des adobes.

Les propriétés mécaniques des murets obtenues sont faibles par rapport à celles des constituants brique et mortier. La résistance à la compression σ_{Mexp} est environ 33% inférieure à la résistance à la compression σ_b des briques, alors que le module de Young de la maçonnerie E_{Mexp} est 2,5 à 3 fois inférieur au module élastique E_m du mortier, et 1,7 à 4,7 fois, au module élastique E_b des briques. Cette diminution des propriétés mécaniques de la maçonnerie par rapport à ces constituants est dû aux lignes de discontinuité au niveau des interfaces brique-mortier. Egalement, les déformations des murets A, B et C sont similaires à celles des adobes a, b et c respectivement, testés avant assemblage, et elles sont inférieures 6 à 8 fois de celles du mortier en terre testé avant assemblage. Ceci nous permettra de dire que l'influence de la résistance à la compression du mortier sur la maçonnerie est faible, ce qui est en concordance avec la littérature.

En nous basant sur les travaux antérieurs qui ont étudié le comportement mécanique de la maçonnerie analytiquement, ce travail nous fournit une nouvelle formule du module de Young de la maçonnerie en brique de terre crue en fonction des propriétés mécaniques de ces constituants : briques et mortier. Ces derniers sont déterminés avant assemblage, ce qui facilite la détermination des propriétés mécanique d'une maçonnerie en adobe sans passer par un travail expérimental.

A la fin de ce travail, nous pouvons retenir que la maçonnerie en adobe possède le même comportement que la maçonnerie conventionnelle, avec des propriétés mécaniques plus faibles, mais qui restent acceptables au regard du style urbanistique des constructions à étages réduits des constructions dans la région d'étude.

L'aspect résistance mécanique ne posant pas de problème majeur à l'application des briques de terre crue (stabilisées ou non), nous recommandons vivement l'adoption des constructions en terre dans nos région à pluviométrie très réduite et climat chaud et sec. Les autres paramètres à prendre en considération en complément à ce travail et qui représentent des perspectives de poursuite de cette recherche, résident dans l'étude du confort thermique et la régulation hydrique des construction sahariennes ainsi que les techniques de protection et d'entretien des construction, contre les effets du vent et la pluie.

En fin, notre futur travail va être basé sur ces questions de modélisation de la maçonnerie en adobe et le développement d'un nouveau model numérique de ce type de maçonnerie.

Références bibliographiques :

- Abbou D., (2014), "Architecture de terre en Algérie: un patrimoine à conserver et à développer", mémoire de magister, Université Mustaganem, Mustaganem, Algérie.
- Abbou M., Moulay Omar H., Akacem M., Semcha A., Mekerta B., (2016), « Caractérisation des gisements de la région d’Adrar, en vue de leur valorisation dans l’industrie des matériaux de construction », International Seminar on Local Materials and Sustainable Construction (SIMaLoCoD), Adrar University, Algeria, pp. 1-5.
- Akacem M., Bouteldja M., Cerezo V., Hachichi A., (2016), “A method to use local low performances aggregates in asphalt pavements – An Algerian case study”, Construction and Building Materials 125 (2016) 290-298. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.035
- Akacem M., Mekerta B., Zestar R., Moulay Omar H., Abbou M., (2018), “Valorisation of fine dune sand in asphalt concrete”, 6th International Symposium on Sediment Management San Cristobal de Las Casas, Chiapas, Mexico. 19-23, 317.
- Ali A., (2012), « Performances thermiques du matériau terre pour un habitat durable des régions arides et semi arides : cas de Timimoun », mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, Algérie .
- Alviset L., (1994), « Matériaux en terre cuite », technique de l’ingénieur, traité construction, C 906, France.
- Anger R., Fontain L., (2010), « Bâtir en terre, Du grain de sable à l’architecture», France, Edition Belin.
- ARS 680-1996, « Blocs de terre comprimée ; code de bonne pratique pour la production de blocs de terre comprimée », Normes, CRATerre-EAG BASIN, ACP-UE
- Asselin P. et Vaxelaire J. L., (2016), « Le guide pratique de la pierre naturelle », l’Union national des économistes de la construction (Untec) et le Centre Technique des Matériaux Naturels de Construction (CTMNC), Paris, France.
- Aubert G., (1960), « Les sols de la zone aride , étude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation », Colloque général sur les problèmes de la zone aride, ORSTOM (Office de la recherche scientifique et technique outre-mer), Paris.

Références bibliographiques

- Bada A. (2016), « Caractéristiques thermomécaniques des matériaux locaux à base d'argile d'Adrar », Séminaire International sur les Matériaux Locaux et la Construction Durable (SIMaLoCoD), Université Ahmed Draya, Adrar.
- Balksten K. et Strandberg-de Bruijin P., (2021), "Understanding deterioration due to salt and ice crystallization in Scandinavian massive brick masonry", *Heritage*, 4, 349-370, <http://doi.org/10.3390/heritage4010022>.
- Bassoud A., Bada A., Khelafi H., (2016), « Caractéristiques thermophysiques des matériaux de construction par ajout des fibres végétales », International Seminar on Local Materials and Sustainable Construction , Université d'Adrar, Algerie.
- Bellal S. et Hadeid M., (2016), " Accès à l'eau souterraine et transformations de l'espace oasien : le cas d'Adrar (Sahara du Sud-Ouest algérien)", *cahiers de géographie du Québec*, Volume 60, N° 169, pp 29-56.
- Beger J., Tasca- Guernouti S., Woloszyn M., Buhe C., (2012), « L'humidité dans les batiments: pathologies et paramètres gouvernants », XXX^{ème} rencontres AUGC/IBPSA (Association Universitaire de Génie Civil/ the International Building Performance Similation Association), Chambéry.
- Belaidi K., Mouhamed Amine A., Mekerta B., (2016), « Caractérisation physico-chimique et mécanique des gisements d'argile de la région d'Adrar », Application dans les centres de stockage des déchets de classe 3 », International Seminar on Local Materials and Sustainable Construction (SIMaLoCoD), université d'Adrar, Algerie, pp.1-5.
- Benna Y., Ait Said S., Bedjou S., Barara A., Guettache B., (2005), « Valorisation des sables de dunes », Synthèse et recommandation, CNERIB, Algérie.
- Bennett R.M., Boyd K.A., Flanagan R.D., (1997); «Compressive properties of structural clay tile prisms», *J. Struct. Eng.*, 127, p.920–926.
- Benouali H., (2015), « La réglementation technique algérienne de construction avec les matériaux locaux », festival Architerre, Algérie.
- Binda L., Fontana A., Frigerio G., (1988), «Mechanical behavior of brick masonries derived from unit and mortar characteristics», Department of Structure Engineering Polytechnic, P 205- 216, Milan.
- Bonnette M., (1989), « Guide technique : la maçonnerie en pierre », Service de l'urbanisme, ISBN 2-920860-30-5, Québec.

Références bibliographiques

- Bouchouicha K., Hassan M., Bailek N., Aoun N., (2019), " Estimating the global solar irradiation and optimizing the error estimates under algerian desert climate", *Renewable energy*, 139, pp 844-858.
- Bruno A. W., (2019), "Hygro-mechanical characterization of hypercompacted earth for building construction", *These de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France.*
- Bui Q.B., Morel J.C., Hans S., Walker P., (2014), "Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth", *Construction and building materials*, 54(11): 163-169, doi:10.1016/j.conbuidmat.2013.12.067.
- Bui T. L., (2014), "Contribution à l'étude de murs maçonnés renforcés par matériaux composites (FRP et TRC) : application aux sollicitations dans le plan », *Thèse de doctorat, Claude Bernard Lyon 1 university, France.*
- Carazas Aedo W., (2003), « L'adobe : guide de construction parasismique », édition CRATerre, France.
- Chennaoui Y., (2015), « Le pisé de Cherchell : histoire, composants et système de mise en œuvre », *Séminaire les architectures en terre du Maghreb TERMeghreb, Lambèse, Tazoult.*
- CORPUS , (2015), « Architecture traditionnelle méditerranéenne : Mur en brique de terre crue, Algérie », *Union Européenne.*
- CRATerre : Centre de Recherches et Application Terre, (1991), « Le bloc de terre comprimée ; Elément de base », P 27, Eschbom.
- CRATerre : Centre de Recherches et Application Terre, (1995), « Blocs de terre comprimée », volume I, Manuel de production, Eschbom.
- CSA: Design of concrete structures, Canadian Standards Association, 2004.
- Delgado M.C.J. et Guerrero I.C., (2007), "The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review", *Construction and Building Materials* 21 (2007) 237–251.
- Djeradi M.A., (2013), « Architectures vernaculaire », tome 36-37, 2012-2013]. http://pierreseche.com/AV_2012_ameur_djeradi.htm.
- Doat P., Hays A., Houben H., Matuk S. et Vitoux F., (1979), « Construire en terre », *Centre de Recherche et d'Application Terre (CRATerre), Paris.*
- El faghir F., (2013), « Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue », *thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, France, p 121*

Références bibliographiques

- El Nabouch R., Bui Q. B., Perrotin P., Plé O., Plassiard J. P., (2015), « Modélisation numérique de structures en pisé : analyses et recommandations », 33ème Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet.
- EN 1052-1: Methods of test for masonry, Part 1: determination of compressive strength. CEN, 1998.
- EN 1996- 1-1: Eurocode 6 - Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structure, 2005.
- Endo Y., Yamaguchi K., Hanazato T., Michra C., (2019), “characterization of mechanical behavior of masonry composed of fired brick and earthen mortar”, Engineering Failure Analysis, Vo 109, 2019, doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104280
- Fang Wu, Gang Li, Jin-Qing Jia, (2013), “strength and stress-strain characteristics of traditional adobe block and masonry”, Materials and Structures, 46, 1449-1457
- Farag M. F., El hariri M. O. R., Hamdy G. A. R., (2017), “Influence of mortar mix proportions on the behavior of masonry exposed to harsh environmental conditions”, 11th international conference on the role of engineering towards a better environment, Alexandrie, Egypte.
- Fishburn C.C., (1961), “Effect of Mortar Properties on Strength of Masonry”, National Bureau of Standards Monograph 36, Washington.
- Fouchal F., (2006), « Contribution à la modélisation numérique des interfaces dans les structures maçonnées », thèse de doctorat, université de Reims Champagne-Ardenne, France, p 196.
- Franzoni E., Gentilini C., Graziani G., Bandini S., (2015), « Compressive behavior of brick masonry triplets in wet and dry conditions », Construction and Building Materials, Vol 82, p.45-52.
- Galmiche V., (2019), « Construction et réhabilitation en terre crue: points de vigilance », Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, France.
-
- Gauzin-Muller D., (2016), « Architecture en terre d'aujourd'hui : les techniques de la terre crue », TERA Award.

Références bibliographiques

- Gharib T., (2015), « Renforcement des structures historiques en maçonnerie par matériaux composites : application aux murs en pierres calcaires », thèse de doctorat, Université Claude Bernard – Lyon 1, France.
- Gómez C. D., (2014), « Outil 5, Comprendre les désordres structurels : Les désordres structurels des bâtiments dans l'architecture méditerranéenne », Programme RehabiMed, Université polytechnique de Catalogne, Espagne.
- Guillaud H., (1995), « Blocs de terre comprimée », Vol II, Manuelle de conception et de construction, Eschbom.
- Hall M., Djerbib Y., 2004, "Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency", *Construction and Building Materials*, vol.18, no4, p. 281-286.
- Hendry A., Sinha B., Davies S., (1997), "Design of Masonry Structures", E et FN Spon, an imprint of Chapman Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK. ISBN 0-419- 1500-3.
- Houben H., Oyejola O.A., (1998), Série technologique n°11, Guide « Blocs de terre comprimée, normes », Belgique, Coédition CDI et CRATerre
- Houfman H.K. et Schubert P., (1994), «Compressive strength of masonry parallel to the bed joints», Proc. 10th. Brick and block Masonry Conf.
- Houti F., (2002), « Comportement des structures en maçonnerie sous sollicitation uniaxiale », Mémoire de magister, Université de Tlemcen, Algérie.
- Idir L., (2013), « Présentation d'un guide technique de réhabilitation du patrimoine architecturale en terre en Algérie », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammri, Tizi Ouzou, Algérie.
- Illamps R., Ioannou I., et Charmpis C.D., (2011f), "A study of the mechanical behavior of adobe masonry", *Structural Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XII*, WIT Transactions on the Built Environment, Vol 118.. doi: 10.2495/STR110401
- Itulamy L. A. M. (2018), « The raw earth brick : a building material to meet the needs of local population », International Conference : Architectural Research for a Global Community The Built Environment Shaping the Quality of Life. Philadelphia, Etats Unis.
- Kebaili N., (2006), «L'architecture de terre contemporaine en Algérie, évaluation post-occupation d'habitations rurales dans la région centre des hauts plateaux », mémoire de magister, Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme d'Alger (EPAU), Algérie.

Références bibliographiques

- Kevin B., (2003), "Characterization water transfer properties and deterioration in tufeau: building material in the Loire Valley- France", International Journal Building Environment.
- Khalaf F. M., Hendry A. W. et Fairbairn D. R., (1994), "Study of the Compressive Strength of Brick work Masonry". ACI Struc. J.
- Khezazna A., (2017), "Les changements climatiques au Nord-Est algérien. Evolution récente et projections futures". Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba.
- Khoo C., Hendry A., (1973), "A failure criterion for brickwork in axial compression". Proc 3rd Int Brick/Block Masonry Conf Essen, Germany; p. 139–45.
- King B., Mark P.E., San Rafael C.A., (2006), "Review of earthen building codes and standards from arround the world", 94903 USA (415) 331-7630.
- Koutous A., Hilali E., (2019), "grain shape effects on the mechanical behaviour of compacted earth", Case Studies in Construction Materials, volume 11.
- Lamouri H. et Semcha A., (2019), « Caractérisation du sable de dunes et de l'argile d'Adrar », International Conference on Materials, Heritage and Environment in Drylands Ahmed Draia University, Adrar, Algeria.. 1-5.
- Lateb M., (1995), « Calcul de la capacité portante des murs en maçonnerie de petits éléments sous charges verticales », Thèse de doctorat, Ecole nationale des ponts et chaussées, N° 18-474 (4) ; P158 ; France.
- Le guide de bonnes pratiques de la construction en terre crue, (2020), France
- Lourenço P.B., (1998), "Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behavior of masonry", Structural Analysis of Historical Constructions, p 57-91, Barcelone.
- Maini S., (2005), « Earthen architecture for sustainable habitat and compressed stabilised earth block technology », Programme of the city on heritage lecture on clay architecture and building techniques by compressed earth, Saudi Arabia and India High Commission of Rihadh City Development, The Auroville Earth Institue, Auroville Building Centre.
- Mann W., Betzler M., (1994), "Investigation on the effect of different forms of test samples to test the compressive strength of masonry", Proc. 10th. Brick and block Masonry Conf., eds. N.G. Shrive and A. Huizer, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, p. 1305-1313.

Références bibliographiques

- Marsh Alastair T. M. et Yask K., (2021), “The state of earthen housing worldwide: how development affects attitudes and adoption”, Building Research and Information BRI, <http://doi.org/10.1080/09613218.2021.1953369>.
- Matallah Z., (2016), « Efficacité des matériaux de construction et confort thermique en zone chaude et aride. Application au cas de la région de Ghardaia », Séminaire International sur les Matériaux Locaux et la Construction Durable (SIMaLoCoD), université Ahmed Draya, Adrar.
- Merlet J. D., (1996), « Maçonnerie, introduction », technique de l’ingénieur, traité construction, C 2 100, France
- Miccoli L., Muller U., Fontana P., (2014), “Mechanical behavior of earthen materials: earth block masonry, rammed earth and cob”, Construction and building materials, Vol. 61, p.327-339.
- Mohamad G., Lourenço P.B., et Roman H.R., (2006), “Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression”, Review and prospects, Cement and Concrete Composites 29 (2007)181–192, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.11.003
- Moulay Ali A., (2021), « Caractérisation des bétons élaborés dans les zones arides. Vers une formulation optimale laboratoire/chantier », Thèse de doctorat, Université d’Adrar, Algérie.
- Moulay Omar H., Abbou M., Akacem M., Mekerta B., Semcha A., (2017), « Etude des caractéristiques mécaniques des matériaux locaux de la région d’Adrar utilisés en constructions routières », African Review of Sciences, Technology and Development, 02, (2017) 34-46.
- MSJC: Building Code Requirements for Masonry Structures, (2002), (ACI 530-02/ASCE 5- 02/TMS 402-02), Reported by the Masonry Standards Joint Committee.
- New Zealand Standard, (1998), “Engineering Design of Earth Building”, Standard New Zealand, Wellington, New Zealand.
- Ohler A., (1986), « Zur berechnung der druckfestigkeit von mauerwerk unter berucksichtigung der mehrachsigen spannungszustande in stein und mortel”. Bautechnik, Berlin, 63(5) (1986) 163-169.
- Olivier M. et Mesbah A., (1994), « Mechanical behaviour of raw earth block masonry».Conference: EC workshop on Resarch on the Conservation of Brick Masonry Monuments, Leuven, Belgique.

Références bibliographiques

- Ouali S., Baddari A. K. K. (2006), "Etude géothermique du Sud de l'Algérie". Revue des énergies renouvelables, volume 9, numéro 4, pages 297--306.
- Page A. W., (1978), "Finite element model for masonry", J. of Struc, Div., ASCE, Vol.104, N°ST8.
- Page A. W. et All S., (1981), "The biaxial compressive strength for brick masonry", Pro. Inst., Civ. Eng., part 2, Sept.
- Paulay T. et Priestley M.J.N., (1992), "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Building", John Wiley & Son, New York, United States. Doi: <https://doi.org/10.1002/9780470172841>
- Philkyprou M., (2005), « La dégradation des matériaux de construction (pierre, terre, bois) », Méthode RehabiMed pour la réhabilitation de l'architecture traditionnelle méditerranéenne, RehabiMed, P 239
- Portal L. M. et al, (2013), « Le mur en adobes », dossier de restitution.
- Quagliarini E., Lenci S., (2009), "The influence of natural stabilizers and natural fibers on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks", Journal of Cultural Heritage, 2010, In Press, doi:10.1016/j.culher.
- Sathiparan N., Rumeskumar U., (2018), « Effect of moisture condition on mechanical behavior of low strength brick masonry », Journal of Building Engineering, Vol 17, p.23-31,
- Semcha A., (2006), « Valorisation des sédiments de dragage , Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug », Thèse de Doctorat, université de Reims Champagne-Ardenne, p 167.
- Shaan R., (1987), « Etude du comportement mécanique de la maçonnerie en briques », Thèse de doctorat de l'Université des sciences et techniques LSLLe, Flandres Artois.
- Shen Y.X., Chen W-W, Du W-F., (2017), "Effects of salts on earthen materials deterioration after humidity cycling", Journal of Central South University, 24, 796-806, 2017.
- Shukla A., G.N. Tiwari, M.S. Sodha, (2009), "Embodied energy analysis of adobehouse", Renewable Energy", www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148108001729.
- Tarque N. et Pancca-Calsin E., (2022), "Building constructions characteristics and mechanical properties of confined masonry walls in San Miguel (Puno-Peru)", Journal of Building Engineering, Vol 45, doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103540

Références bibliographiques

- Tibbets J.M., (2001), “Emphasis on rammed earth-The rational”, *Interaméricas Adobe Builder*, , 9, 4-33
- Traoré L.B., Quellet-Plamondon C., Fabbri A., McGeror F., (2020), « Experimental assessment of freezing – thawing resistance of rammed earth building », *Construction et matériaux de construction* 274, doi:10.1016/j.conbuimat.2020.121917.
- Turkmen I., Ekinçi E., Kantarci F., Sarici T., (2017), “The mechanical and physical properties of unfired earth bricks stabilized with gypsum and Elazığ Ferrochrome slag”, *International Journal of Sustainable Built Environment*, volume 6, Pp 565-573.
- UBC « Uniform Building Code », (1997), *International Conference of Building Officials*, Vol 2.
- Varum H., Costa A., Pereira A., Almeida J., Silveira D., (2007), “Mechanical characterization of adobe masonry walls”, *Proceedings of the 13th conference of Sociedade portuguesa de materiais and IV international materials symposium- a materials science forum [CD-ROM]*, Porto, Portugal.
- Varum H., Costa A., Fonseca J., Furtado A., (2015), “Behavior characterization and rehabilitation of adobe construction”, *Procedia Engineering* 114(2015) 714-721, doi: 10.1016/j.proing.2015.08.015
- Walker P., (2002), “Standards Australia, The Australian Earth Building Handbook”, Sydney, Australia.
- Xiao Ma, (2018), « Deterioration of earthen building materials », doi : 10.1002/9781119188230.saseas0171
- Xinlei Y. et Hailiang W., (2019), «Strength of Hollow Compressed Stabilized Earth-Block Masonry Prisms », *Advances in Civil Engineering*, Vol 2019.
- Zak P., Ashour T., Korjenic A., Korjenic S., (2016), «The influence of natural reinforcement fibers , gypsum and cement on compressive strength of earth brick materials», *Const. Built. Mater.* 106, 179-188.=
- Zami M. S.et Lee A., (2009), « Use of stabilised earth in the construction of low cost sustainable housing in africa ; an energy solution in the area of climate change », *International Journal of Architectural Research*, Vol 3, Issue 2.

Annexes

Annexe 1 : Les sites web utilisés :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Panth%C3%A9on_\(Rome\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Panth%C3%A9on_(Rome))

<https://doi.org/10.1155/2019/7854721>

http://www.vitamedz.org/le-palais-de-dar-aziza-alger/Articles_288_205948_16_1.html

<http://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.01.015>.

<http://www.researchgate.net/publication/331683590>

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148108001729>.

<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00303>

Annexe 2 : Devis de la maison illustrée dans la figure II.8, avec un système poteau poutre en béton armé et une maçonnerie en brique de terre cuite

Tableau A2. 1: Exemple d'un devis quantitatif et qualitatif d'une maison en brique de terre cuite (ASPECT : Atelier Saharienne Pluridisciplinaire d'Etude et Conseil, Touat)

Désignations Des Ouvrages (Gros Œuvre)	Unité	Quantité	Prix unitaire	Montant
Fouilles en puits	m ³	27,000	300,00	8 100,00
Béton de propreté au ciment CRS dosé à 150 kg/m ³ (semelles)	m ³	2,250	3 500,00	7 875,00
Béton armé au ciment CRS dosé à 400 kg/m ³ (semelles et amorces)	m ³	8,000	15 000,00	120 000,00
Remblais en terre bien compactée des vides	m ³	16,000	400,00	6 400,00
Béton armé pour longrines dosé a 350 kg/m ³	m ³	7,500	15 000,00	112 500,00
Sable bien compacté de 20 cm	m ²	59,70	300,00	17 910,00
Forme de sol en béton armé de 10 cm	m ²	83,35	700,00	58 345,00
			15 000,00	103 500,00
Béton armé en élévation pour poteaux	m ³	6,900	15 000,00	103 500,00
Béton armé en élévation pour poutre, chaînage et acrotère	m ³	12,550	15 000,00	188 250,00
Béton armé pour arcade	m ³	1,350	15 000,00	20 250,00
Plancher semi préfabriqué : 16 + 4 cm	m ²	59,70	1 300,00	77 610,00
Béton armé pour linteaux	m ³	0,350	10 000,00	3 500,00
Maçonnerie triple parois en brique rouge de 45 cm (15+5+10+15)	m ²	115,00	1 700,00	195 500,00
Maçonnerie double parois en brique rouge 30 cm d'épais (15+15)	m ²	27,50	1 200,00	33 000,00
Maçonnerie simple parois en brique rouge 10 cm d'épais	m ²	12,00	800,00	9 600,00
Enduit sur murs extérieurs au mortier mouchetis	m ²	131,00	500,00	65 500,00
Enduit au mortier de ciment s/ plafonds	m ²	57,00	500,00	28 500,00
	m ²	69,00	500,00	34 500,00
Enduit au mortier de ciment surs murs intérieurs				
Étanchéité terrasse accessible avec isolation en sable	m ²	65,00	1 500,00	97 500,00
Relevé d'étanchéité	ml	40,00	250,00	10 000,00
Gueulard en béton préfabriqué	U	2	900,00	1 800,00
				1 200 140,00

Annexe 3 : Maison de terre à Timimoune :

Tableau A3. 1 : Descente de charge d’une maison en adobe, Timimoune, Algérie.

Élément	L (m)	l (m)	e(m)	ρ (kg/m ³)	M (kg)	G (MN.10 ⁻⁶)
Etanchéité multicouche	15	5	0,05	10	37,5	367,875
La couche d’argile	15	5	0,15	1474	16582,5	162674,325
Bois de palmier	15	5	0,1	309	2317,5	22734,675
Charge du muret	40	2,5	0,45	1474	66330	650697,3
Soubassement	40	0,5	0,45	1300	11700	114777
Total						951251,175

Où :

- L, l, e : sont la longueur, la largeur et l’épaisseur des éléments constituant la construction, exprimés en mètre ;
- ρ : la masse volumique des éléments constituant la construction, exprimés en kg/m³ ;
- M : la masse des éléments constituant la construction, exprimés en kg ;
- G : la charge permanente des éléments constituant la construction, exprimés en MN . 10⁻⁶

On a :
$$N_s = G + Q \dots \dots \dots (A3.1)$$

Avec :

- N_s : La charge totale de la construction ;
- Q : La charge d’exploitation, Q= q x L x l x g ;
- q : la charge d’exploitation pour une terrasse inaccessible, égale à 100 kg/m² ;
- g : la pesanteur, égale à 9,81 m/s²;

Donc : N_s = 1,025MN

Aussi :
$$\sigma = \frac{N_s}{S} \dots \dots \dots (A3.2)$$

S = 40 x 0,45 m²

Alors : $\sigma = 0,06\text{MPa} (< \sigma_{sol})$

Résumé

La terre crue est un matériau de construction utilisé depuis des millénaires. Son aspect thermique est caractérisé par une inertie thermique permettant à la fois l'accumulation et la restitution de la chaleur. La maçonnerie en terre crue présente l'élément essentiel qui enveloppe la structure. Elle offre l'isolation thermique, hygrométrique et phonique de la structure et une résistance mécanique qui, avec un entretien régulier, peut résister aux intempéries, et au vent. Aussi, elle répond aux concepts du développement durable, du bio habitat, et des critères des bâtiments à basse consommation (BBC).

Dans ce travail, nous nous intéressons à la valorisation et la modernisation de la maçonnerie en terre crue, particulièrement en adobe, dans la région d'étude Adrar, qui est située dans une zone aride caractérisée par un climat sec et chaud. Dans un premier temps nous faisons une identification des matériaux locaux, sable de dune et argile, disponibles en quantité inépuisable à Adrar. Ensuite, nous réalisons un chantier à l'air libre où nous fabriquons manuellement plus de 120 briques d'adobe divisées en trois types : a, b et c pour la réalisation de modèles en maçonnerie en terre. Après, la campagne expérimentale comprend deux axes : le premier axe est destiné aux essais mécaniques de résistance à la compression sur les adobes et les éprouvettes de mortier en terre, pour définir leurs propriétés mécaniques avant assemblage, alors que le deuxième axe se base sur la construction de neuf murets A, B et C (trois murets pour chaque type d'adobe : a, b et c), et l'expérimentation sur ces derniers pour définir leur comportement: modes de rupture, module de Young, résistance à la compression, déformations, etc. A la fin, nous fournirons une nouvelle formule analytique donnant le module de Young d'une maçonnerie en adobe en fonction des propriétés mécaniques de ses constituants (brique et mortier) déterminés avant assemblage.

Mots clés : matériaux locaux, adobe, mortier, muret, résistance à la compression, module de Young.