

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : Technologie

DEPARTEMENT : Génie Civil

N° :



DOMAINE : Science et Technologie

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par:

SAADAOUI benaceur

OUAHAB Yamina

Intitulé

**Caractérisation des briques de terre utilisées
dans les anciennes constructions dans la zone
de Bou-Saâda**

Soutenu devant le jury composé de:

Mr. NACERI Abdelghani	Université de M'sila	Président
Mr. TALLAH Noui	Université de M'sila	Rapporteur
Mr. GUETTOUCHE Amar	Université de Sétif -1	Co-Rapporteur
Mr. BELAGRAA Larbi	Université de M'sila	Examineur
Mr. BELOUADAH Messaouda	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2018 /2019

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout-puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, Nous remercions chacun nos parents pour le soutien et les sacrifices qu'elle on fait pour que nous terminions nos étude.

nous tenons à remercier notre encadreur **Dr.Tallah.N**, et co-encadreur **Dr. Guettouche .A**, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nous tenons à remercier **Mr. NACERI Abdelghani** d'avoir accepté de présider le jury et bien voulut examiner notre travail.

Nous tenons également à remercier **Mr. BELAGRAA Larbi** et **Mr. BELOUADAH Messaouda** Alid'avoir accepté bien voulut examiner notre travail

Nos vifs remerciements vont également aux ingénieurs de laboratoire de matériaux de département du génie civil pour leurs aides et leurs patiences.

Merci aussi à tous les administrateurs, les ingénieurs et les techniciens de Laboratoire de l'unité de recherche des matériaux émergeants, à l'université de Sétif- 1.

Nous remercions également les architectes de la ville de Bou-saâda.

Nous adressons également notre profonde gratitude à tous les enseignants de l'université Mohamed Boudiaf -M'sila en particulier ceux du département du génie civil.

Enfin, nous voudrions également remercier nos collègues de l'étude pour leur esprit de coopération et tous ceux qui ont participé à ce travail de près ou de loin.

Dédicace

Je dédiece mémoire à tous ceux qui me sont chers.

À mon père, **zian**, pour tous ses sacrifices, son soutien moral et matériel,
que Dieu te garde dans son vaste paradis.

À ma mère, **aicha**, pour son amour et son soutien qui m'ont permis de
finir mes études.

À mes sœurs, **khadidja** et **mariam** et **djamila**.

À mes frères, **Omar**, **Khaled**, **Noureddine** et **saad**.

À mon très cher ami **Hodyfa Elyaman**.

SAADAOUI Benaceur

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes très chers parents : «said» et «samia».

Je leurs remercie pour leurs sacrifices, leurs patiences, leurs soutien, l'aide et les encouragements qui m'ont apporté durant toutes ces années d'étude sans eux,

je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie ce travail également :

A mes frères et soeurs: «zineb», «ahlem», «djamel».

A toute ma famille.

A mes amis.

A tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à ce travail.

ouahab yamina

ملخص

درسنا في هذا العمل استخدام الطوب الترابي في المباني في مدينة بوسعادة ، بما في ذلك تقنيات صنع هذا الطوب الترابي وخصائصه الفيزيائية والميكانيكية.

أوضحت الدراسة أن الطبيعة الجغرافية للمنطقة كانت أحد الأسباب الرئيسية لاستمرار هذه الإنشاءات لفترة طويلة. أظهرت الاختبارات العملية أن خواص المواد المكونة لهذا الطوب متشابهة مع الخصائص المعروفة في جميع أنحاء العالم ، ونوع الرمال المستخدمة عبارة عن رمل طري والخواص الميكانيكية جيدة ، وقد أظهرت الاختبارات أيضًا أن يمكن وصفه بأنه عازل حراري ومناخي جيد.

الكلمات المفتاحية: الطوب الترابي؛ الرمل الطمي ؛ العزل الحراري ؛ البيومناخي.

Résumé

Dans ce travail on a étudié l'utilisation de la brique en terre dans les constructions dans la veille médina de Bou-sâada, notamment les techniques de fabrication de ce brique en terre et ses caractéristiques physiques et mécaniques.

L'étude a montré que la nature géographique de la région a été l'une des principales raisons que ces constructions ont durées longtemps.

Les essais en laboratoire ont montré que les propriétés des matériaux composantes de ce brique sont semblables à ceux qui sont connus dans le monde entier le type de sable utilisé est le sable limoneux et les propriétés mécaniques sont bonnes, les essais ont montré aussi qu'on peut le qualifier comme un bon isolant thermique et bioclimatique.

Mots clés : Brique en terre ; Sable limoneux ; Isolant thermique ; Bioclimatique

Summary

In this work we have studied the use of earthen brick in buildings in the Bou-sâada medina, including the techniques of making this earthen brick and its physical and mechanical characteristics.

The study showed that the geographical nature of the region was one of the main reasons that these constructions lasted a long time.

Laboratory tests have shown that the properties of the component materials of this brick are similar to those known worldwide. The type of sand used is silty sand and the mechanical properties are good, the tests have also shown that can qualify it as a good thermal and bioclimatic insulator.

Keyword: Earthen brick; Loamy sand; Thermal insulation; Bioclimatic.

Table de matières

Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Etude Bibliographique.....	4
1. Rappel Historique.....	4
1.2. Mais quelle est la raison qui a mené ces civilisations à utiliser un tel matériau ?.....	5
2. Pourquoi Construire en Terre de nos Jours ?.....	6
2.1 Impact environnemental des constructions.....	6
2.2 Faible énergie grise des constructions en terre.....	7
3. Les Différentes Techniques de Construction	10
4. Adobes.....	13
5. Propriétés et Caractéristiques.....	15
5.1. Composition de la terre crue.....	16
5.2. Caractéristiques physiques de la terre crue.....	16
5.2.1. Aspect thermique	16
5.2.2. Masse volumique.....	17
5.3. Autres propriétés	17
5.4. Résistance mécanique.....	18
Chapitre 2 : Construire en Terre à Bou-saâda.....	22
1. Présentation du Site D'étude.....	22
1.1. Aperçu géographique	22
1.1.1. Localisation géographique	22
1.1.2. Développement et économie.....	22
1.1.3. Habitats et activités	24
1.1.4. Relief	24
1.1.5. Démographie.....	25
1.1.6. Répartition administrative.....	25
1.1.7. Le climat	25

1.1.8. Conclusion	25
1.2. Aperçu géologique	26
1.2.1.Éléments de Stratigraphie	28
1.3. Aperçu hydrogéologique	30
2. Construction en Terre a Bou-Saâda.....	30
2.1. Aperçu historique	30
2.2. La nature architecturale de la ville.....	31
3. Description Architecturale et Structurale D'une Maison en Brique en Terre	33
3.1. Description architecturale (architecture de brique de terre).....	33
3.2. Description structurale (Méthode de construction).....	36
3.2.1. La technique de l'adobe (matériau utilisé et étapes de fabrication).	36
3.2.2. Fondations.....	37
3.2.3. Planchers.....	39
3.2.4. Murs.....	40
 Chapitre 3 : Etude des caractéristiques physiques et d'identification.....	 42
1. Introduction	42
2. Tests D'identification de Terrain et de Laboratoire.....	43
2.1. Tests D'identification de Terrain	43
2.1.1. Examen visuel	43
2.1.2. Essai au toucher.....	43
2.2. Tests D'identification de Laboratoire.....	43
3. Les essais de mesures des caractéristiques physiques	44
3.1. Teneur en eau naturelle	44
3.2. Poids volumiques humide	44
3.3. Poids volumique sec	45
3.4. Poids volumique des particules solides	45
3.5. porosité et indice des vides	46
3.6. Teneur en fibres végétales	46
4. Les essais d'identification	47

4.1. Analyse granulométrique par tamisage	47
4.2. Analyse granulométrique par Laser.....	47
4.3. Limites d'Atterberg	48
5. Résultats et Commentaires.....	50
5.1. Les essais de mesures des caractéristiques physiques.....	50
5.1.1. Teneur en eau	50
5.1.2. Teneur en fibres végétales.....	50
5.1.3. Poids volumique humide	51
5.1.4. Poids volumique des particules solides.....	52
5.1.5. Poids volumique sec.....	52
5.1.6. porosité et indice des vides	53
5.1.7. Synthèse des résultats des essais de mesures de caractéristiques physiques.....	53
5.2. Les essais d'identification.....	54
5.2.1. Analyse granulométrique par tamisage.....	54
5.2.2. Analyse granulométrique par Laser.....	57
5.2.3. Synthèse des résultats des analyses granulométriques	59
5.2.4. Limite d'Atterberg (liquidité, plasticité).....	59
5.2.5. Synthèse des résultats des essais d'identification.....	60
Chapitre 4 : Etude des caractéristiques mécaniques et thermiques..	61
1. Les essais mécaniques	61
1.1. L'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande	61
1.2. L'essai de compression simple (uniaxiale)	62
2. Les essais thermiques	64
2.1. L'essais de conductivité thermique	64
3. Résultats et Commentaires.....	65
3.1. Les essais mécaniques.....	65
3.1.1. L'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande.....	65
3.1.2. L'essai de compression simple (uniaxiale).....	69
3.1.3. Synthèse des résultats des essais mécaniques.....	70
3.2. Les essais thermiques	72

3.2.1. L'essai de conductivité thermique.....	72
3.3. Discussion.....	79
Conclusion Générale.....	81
Bibliographie.....	84

Liste des figures

Chapitre 1

Figure.1.1. Architecture de terre dans le monde.....	6
Figure.1.2. Contribution des déchets pour les différentes étapes d'un bâtiment pour un total de 37 millions de tonnes pour l'année 1999, d'après l'ADEME.....	7
Figure.1.3. La faible énergie grise des constructions en terre.....	8
Figure.1.4. Emission de gaz à effet de serre pour différentes méthodes de construction.....	10
Figure.1.5. "Roue" des techniques de construction en terre.....	11
Figure.1.6. Etat hydrique de la terre.....	13
Figure. 1.7. La masse volumique sèche (ρ_d).....	21
Figure.1.8. La résistance à la compression.....	21
Figure.1.9. La conductivité thermique (λ).....	21

Chapitre 2

Figure.2.1. Situation géographique de la ville de Bou-saâda.....	23
Figure.2.2. Géologie de la région du Hodna, D'après Le Houerou et Claudin, 1972.....	27
Figure.2.3. Extrait de la carte géologique du Bou-saâda.....	27
Figure.2.4. Coupe géologique de la zone de Bou-saâda.....	29
Figure.2.5. Plan RDC d'une maison en brique de terre (Dessin Autocad SAADAOUI Benaceur, OUAHAB Yamina).....	35
Figure.2.6. Semelle (Dessin Autocad: SAADAOUI Benaceur, OUAHAB Yamina)	38
Figure.2.7. Schéma présentant comment les poutres en bois sont placés (Dessin Autocad: SAADAOUI Benaceur, OUAHAB Yamina).....	39
Figure.2.8. Dimensions d'un mur en brique de terre double cloison (dessin Autocad : SAADAOUI Benaceur, OUAHAB Yamina).....	40

Chapitre 3

Figure.3.1. Méthode de l'éprouvette graduée.....	45
Figure.3.2.a. courbes granulométriques par tamisage de l'échantillon 1 (ancien adobe).....	55
Figure.3.2.b. courbes granulométriques par tamisage de l'échantillon 2 (ancien adobe).....	56
Figure.3.2.c. courbe granulométrique de l'échantillon 3 (nouveau adobe)	58
Figure.3.3. Résultats d'analyse granulométrique par Laser	58
Figure.3.4. Superposition des courbes granulométriques des 3 échantillons après analyse par Laser.....	58

Chapitre 4

Figure .4.1. Boîte de Cisaillement.....	62
Figure.4.2. Courbe effort-déformation.....	62
Figure.4.3. courbe intrinsèque.....	62
Figure.4.4. exemple de série d'essais uniaxiale.....	63
Figure.4.5. Essais de cisaillement à contraintes normales constantes (ancienne brique).....	67
Figure.4.6. Essais de cisaillement à contraintes normales constantes (nouveau brique).....	68
Figure.4.7.a. Graphique d'examen de l'exécution d'essai de compression simple.(Ancien adobe).....	71
Figure.4.7.b. Graphique d'examen de l'exécution d'essai de compression simple (Nouveau adobe).....	71
Figure.4.8.a. Evolution de la température à l'entrée et la sortie de l'adobe (ancienne).....	74
Figure.4.8.b. Evolution de la température à l'entrée et la sortie de l'adobe (nouveau).....	74
Figure.4.9.a. Evolution de la différence de température avec le temps (ancien adobe).....	76

Figure.4.9.b. Evolution de la conductivité thermique avec le temps (ancien adobe).....	77
Figure.4.10.a. Evolution de la différence de température avec le temps (nouveau adobe).....	77
Figure.4.10.b. Evolution de la conductivité thermique avec le temps (nouveau adobe).....	78

Liste des photos

Chapitre 1

- Photo.1.1.** Arche de Ctésiphon ; b) Pyramide d'El-Lahoun ; c) Ziggourat d'Etemenanki ; d) Cité Chan-Chan..... 4
- Photo.1.2.** Constructions en adobe : Shibam, Yémen ; Ghadamès, Libye ; Lima, Pérou ; Oued Mzab, Algérie..... 15

Chapitre 2

- Photo.2.1.** figurations représentaient le gros gibier chassé par les occupants préhistoriques de la région de Bou-saâda..... 30
- Photo.2.2.** Dessins pariétaux du selat. Gravure représentant un bison..... 30
- Photo.2.3.** Vestiges romains dans l'aire de Bou-saâda pierre gravée retrouvée au sud-est de l'oasis dans la région de boumellal. Le terme (vixit) peut laisser croire que ce vestige appartenait à un monument consacrant une victoire..... 31
- Photo.2.4.** Vestiges de l'occupation romaine : pierre gravée marquant vraisemblablement une victoire..... 31
- Photo.2.5.** Vestiges de construction sensiblement contemporaines de la fondation de Bou-saâda soit fin 15 et début 16 siècle..... 31
- Photo.2.6.** vestiges de construction sur la plateforme du Selat. Abris de protection contre les invasions..... 31
- Photo.2.7.** Djamaa-en-nekla (Exemple de l'architecture islamique). (Photo : SAADAoui Benaceur, OUAHAB Yamina) 32
- Photo.2.8.** Aperçu général de la mosquée-mausolée de la zaouïa d'el-Hamel. (Photo : SAADAoui Benaceur, OUAHAB Yamina)..... 33
- Photo.2.9.** Plafond de la mosquée de la zaouïa. On devine la hauteur du dôme central de la mosquée..... 33
- Photo.2.10.** toits en coupoles a Bou-saâda évoquant la ville d'el-oued..... 33
- Photo.2.11.** Hôtel transatlantique de Bou-saâda. On remarquera le style néo-mauresque du bâtiment adapté au milieu écologique oasien..... 33
- Photo.2.12.** Une extrémité de la médina de Boussaâda. On observera que

l'architecture traditionnelle de ksar utilise largement le (Toub) (photo : SAADAOUI Benaceur, OUAHAB Yamina)	34
Photo.2.13. La photo de gauche est un mur séparant les vergers et à droite un immeuble résidentiel et impasse recouverte ouvrant sur une ruelle (Photo :Saadaoui Benaceur, OUAHAB Yamina_ Bou-saâda).....	38
Photo.2.14. bâtiments à Bou-saâda recouverts de bois (Photo : SAADAOUI Benaceur, OUAHAB Yamina _Bou-saâda).....	39
Photo.2.15. Mur d'un parc dans la ville de Boussaâda (Photo : SAADAOUI Benaceur, OUAHAB Yamina- Bou-saâda).....	40
 Chapitre 3	
Photo.3.1. Étuve de séchage à 105°C.....	44
Photo.3.2. Brique de terre ancien.....	46
Photo.3.3. Séparation des fibres.....	46
Photo.3.4. Table vibrante (Voie sèche)	49
Photo.3.5. l'appareil de Casagrande.....	49
Photo.3.6. Echantillon humide + paraffine	51
Photo.3.7. Détermination de volume de l'échantillon + paraffine.....	51
Photo.3.8. Masse volumique des solides par immersion dans l'eau.....	52
 Chapitre 4	
Photo.4.1. Machine universelle de type MTS (Laboratoire de l'unité de recherche des matériaux émergents, à l'université de Sétif- 1).....	63
Photo.4.2. L'essai de compression simple effectué par une machine universelle de type MTS.....	69
Photo.4.3. L'essai de mesure de température à l'entrée et la sortie de l'échantillon d'adobe.....	73

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau.1.1. Consommation énergétique de différents types de construction.....	9
Tableau.1.2. Synthèse des principales propriétés des matériaux en terre pour la construction.....	19
Tableau.1.3. Comparaison entre le BTC et d'autres matériaux de maçonnerie.....	20

Chapitre 2

Tableau.2.1. Evolution démographique de la population du Bou-saâda.....	25
Tableau.2.2. Données climatiques à Bou-saâda.....	26

Chapitre 3

Tableau.3.1. Les résultats d'essai Teneur en eau	50
Tableau.3.2. Les résultats d'essai Teneur en fibres végétales.....	50
Tableau.3.3. Les résultats d'essai Masse volumique humide	51
Tableau.3.4. Les résultats d'essai Poids volumique des particules solides...	52
Tableau.3.5. Les résultats d'essai Masse volumique sec	53
Tableau.3.6. Synthèse des résultats des essais de caractéristiques physiques	54
Tableau.3.7. granulométrie par tamisage échantillon 1 (ancien adobe).	54
Tableau.3.8. granulométrie par tamisage échantillon 2 (ancien adobe).	55
Tableau.3.9. granulométrie par tamisage échantillon (Nouveau adobe)	56
Tableau.3.10. Pourcentages de graviers, sables et fines dans les échantillons.....	57
Tableau.3.11. Synthèse des résultats des analyses granulométrique.....	59
Tableau.3.12. détermination de la limite de liquidité.....	59
Tableau.3.13. détermination de la limite de plasticité.....	60
Tableau.3.14. Synthèse des résultats des essais d'identification.....	60

Chapitre 4

Tableau.4.1. Valeurs moyennes de la conductivité thermique pour les matériaux en terre.....	64
Tableau.4.2. Résultats de l'exécution des essais de compression simple.....	70
Tableau.4.3. Synthèse des résultats des essais mécaniques.....	70
Tableau.4.4.a. Résultats des essais de mesure de température à l'entrée et la sortie de l'échantillon d'adobe (ancienne brique).....	72
Tableau.4.4.b. Résultats des essais de mesure de température à l'entrée et la sortie de l'échantillon d'adobe (nouveau brique).....	73
Tableau.4.5.a. Résultats de calcul du conductivité thermique de la brique de terre (ancienne).....	75
Tableau.4.5.b. Résultats de calcul du conductivité thermique de la brique de terre (nouveau).....	76
Tableau.4.6. Comparaison entre les résultats et la bibliographie (ancien adobe)	79
Tableau.4.7. Comparaison entre les résultats et la bibliographie (nouveau adobe)	79
Tableau.4.10. Comparaison entre les résultats (ancien et nouveau adobe)	80

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

"L'universalité de la terre en tant que matériau de construction est fascinante; on estime que plus de 30% des bâtiments de la planète sont en terre aujourd'hui" (Paulus J, 2015). Ces structures constituent un gisement de patrimoine architectural dans presque tous les pays du monde. L'utilisation intensive de la terre est due à son faible coût, à sa disponibilité et à sa faisabilité. En outre, sous le prisme de la directive moderne de durabilité dans la construction, la terre en tant que matériau de construction présente un grand intérêt.

Contrairement à ce qu'on pense généralement, bâtir en terre n'est pas si simple. Le seul fait que les autochtones de nombreux pays bâtissent leurs maisons avec de la terre depuis des milliers d'années, ne signifie pas que la technologie peut être développée et maîtrisée par tout un chacun.

En réalité, le manque de compétence conduit à la réalisation de constructions de piètre qualité, qui donnent au matériau terre une mauvaise réputation.

Partout où la construction de blocs de terre est nécessaire pour répondre aux exigences de performance réglementaires minimales, il est nécessaire de réaliser des tests de contrôle de la qualité. (Paulus J, 2015).

Sur le continent africain, la majorité des constructions rurales et même urbaines sont en terre. Certaines sont magnifiques, vivantes, elles reflètent le génie des bâtisseurs qui construisaient en harmonie avec la façon de vivre des populations. Malheureusement la terre depuis le siècle dernier est de plus en plus dépréciée au profit de nouveaux matériaux. Son emploi pour les populations locales est synonyme de pauvreté et de non durabilité.

Lorsque l'on voit ce qui s'est construit dans le passé dans la zone de Bou-saâda, au Sud-Est du Nord Algérien, ainsi que ces dernières années en utilisant des matériaux à base de terre, on peut s'interroger sur le pourquoi de l'emploi frénétique de ciment, béton et acier dans la plupart des réalisations actuelles surtout en milieu urbain. Ne pourrait-on pas construire des bâtiments

représentant la modernité et la technologie auxquelles les populations aspirent en utilisant le matériau local le plus répandu, la terre ?.

L'objectif de cette recherche est d'étudier ces matériaux locaux utilisés dans la construction en terre, dans la zone de Bou-saâda, et leur caractérisation en vue de vulgariser à vaste échelle leur utilisation.

Afin de satisfaire les conditions d'étude et de prédire les caractéristiques des matériaux étudiés et aussi de pouvoir aboutir aux différents résultats attendus au cours des différents essais, nous avons énumérer les objectifs spécifiques suivants :

- Soulignez pourquoi construire en terre de nos jours ?
- Présenté les techniques de construction et fabrication en terre.
- Construction en terre a Bou-saâda

La compréhension du sujet et l'analyse des termes de références sont des points clefs dans la conduite de cette étude.

Une recherche documentaire a été effectuée afin d'approfondir les connaissances du sujet. Elle nous a permis de collecter les références bibliographiques disponibles et de faire un recueil des données et informations existantes.

Des recherches sur Internet nous ont aussi guidés tout au long du dit travail. Nous avons également consulté des projets similaires effectués par d'autres étudiants toujours dans le même ordre d'idée en l'occurrence des projets de mémoires ou de thèses de doctorat qui traitent sur les problématiques du même sujet.

Notre mémoire de fin d'étude se devise en quatre chapitres :

- ✓ Le premier chapitre est consiste à l'étude bibliographique ou nous avons présenté les techniques de construction et fabrication en terre. Nous citons aussi tout se qui est caractéristiques de briques de terre.
- ✓ Le deuxième chapitre présente Bou-saâda, son contexte géographique, socio-économique et politique, ainsi que son architecture.
- ✓ Pour le troisième chapitre, une étude expérimentale sur les briques de terre de Bou-saâda menée par l'étude des caractéristiques physiques et d'identification.

Introduction Générale

- ✓ Pour le quatrième chapitre, une étude expérimentale menée par la caractérisation du comportement mécanique et thermique de ces briques de terre.
- ✓ En fin on termine par une conclusion générale.

Chapitre 1

Chapitre 1

Etude Bibliographique

1. RAPPEL HISTORIQUE

La terre, utilisée depuis plus de onze millénaires, est sans aucun doute un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'humanité. En effet, les fouilles archéologiques ont montré que les civilisations perses, assyriennes, égyptiennes et babyloniennes édifiaient déjà de nombreux bâtiments à l'aide de ce matériau (voir Photo .1.1).



Photo. 1.1 : a) Arche de Ctésiphon ; b) Pyramide d'El-Lahoun ; c) Ziggourat d'Etemenanki ; d) Cité Chan-Chan. (Paulus J, 2015)

Certains étaient même monumentaux tout comme l'arche de Ctésiphon en Irak (Photo. 1.1a), certaines pyramides en Égypte (pyramide d'El-Lahoun (Photo. 1.1b)

par exemple), la ziggourat d'Étemenanki à Babylone (Photo. 1. 1c), la cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou (Photo. 1.1d) et encore bien d'autres (Doat et al., 1979). Les sites archéologiques en terre crue sont donc présents sur tous les continents habités. Cela est dû au fait que « la terre est l'un des trois matériaux premiers, au même titre que la pierre et le bois ». (Paulus J, 2015).

1.2. Mais quelle est la raison qui a mené ces civilisations à utiliser un tel matériau ?

Elle est plutôt simple : en effet, il s'agissait de « construire avec ce que l'on a sous les pieds » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 9). Si on prend l'exemple de la Grande Muraille de Chine, on peut voir que celle-ci s'adapte tout au long de son parcours à la nature du sol sur laquelle elle est construite. Ainsi, on retrouve des parties construites en pierre sur la roche, en terre sur la terre et même parfois en sable dans certaines parties désertiques. En effet, vu l'ampleur des territoires traversés par cet édifice, celui-ci a été construit à l'aide des matériaux locaux afin de limiter le transport de la zone d'extraction à celle de chantier. Exploiter les matériaux locaux afin de bâtir son logement est un comportement universel. Et souvent, la terre est le seul matériau disponible (Anger & Fontaine, 2009). Des études estiment « qu'au minimum 30 % de la population mondiale vit dans des constructions en terre et 17 % des constructions inscrites sur la Liste du patrimoine mondial de l'UNESCO sont des œuvres architecturales en terre » (Anger & Fontaine, 2005 : p. 8). De plus, la terre est relativement facile à extraire et à utiliser : de simples outils comme une pelle ou des planches en bois sont largement suffisants dans la plupart des cas. (Paulus J, 2015)

Les constructions en terre crue sont majoritairement présentes dans presque toute l'Afrique, le Moyen-Orient et l'Amérique latine (Fig. 1.1). On les retrouve également en Chine et en Inde dans les habitats vernaculaires. En Europe par contre, cette façon de construire a pratiquement disparu, mais les bâtiments en terre crue restent tout de même présents dans le paysage, comme un témoignage du passé. On les retrouve au Danemark, en Suède, en Allemagne, dans les Pays de l'Est, mais également en Espagne, en France, en Grande-Bretagne et en Belgique (Doat et al., 1979). L'Europe compte tout de même plusieurs millions de

constructions en terre, mais il s'agit surtout de bâtiments anciens. Ceux-ci sont toujours habités mais nécessitent un entretien annuel relativement cher (Anger, 2011). (Paulus J, 2015)



Fig. 1.1 : Architecture de terre dans le monde (Source : <http://craterre.org>). (Paulus J, 2015)

2. POURQUOI CONSTRUIRE EN TERRE DE NOS JOURS ?

2.1. Impact environnemental des constructions

Face aux conséquences graves du changement climatique durant les dernières décennies, et aux prévisions de tarissement des ressources naturelles dans un futur proche, le développement durable est au cœur des esprits dans tous les secteurs de l'industrie. Les problèmes les plus importants sont liés à l'énergie et les déchets mais tous les secteurs travaillent à réduire l'impact environnemental de leurs activités.

D'après (Dixit et al, 2010), le secteur de la construction joue un rôle central car il compte près de 40% de la génération de gaz à effet de serre ; 44% des déchets collectés en France proviennent de l'industrie de la construction, ce qui a représenté près de 345 millions de tonnes en 2012. (Champire F, 2017).

La consommation énergétique au cours de la vie d'un bâtiment se divise en trois catégories principales :

- Construction : extraction du matériau brut, transport, fabrication du matériau de construction (ciment, armatures, charpente, etc), transport, construction sur site
- Utilisation : chauffage, ventilation, climatisation, éclairage, etc et restauration

— Démolition et traitement des déchets

Il est souvent considéré qu'un bâtiment possédant une bonne efficacité énergétique est un bâtiment ayant une faible consommation énergétique durant la phase d'utilisation. Ce postulat est basé sur plusieurs études affirmant que la phase de construction ne représente que seulement approximativement 15% de la consommation énergétique totale sur 50 ans. (Carin, 1999)

Il est cependant intéressant de remarquer que ces méthodes de prévision ne tiennent pas compte du traitement des déchets après la démolition. Or, comme le montre la Figure 1.2, ces derniers non contents de ne pas être négligeables, ils représentent la plus grande part (56%).

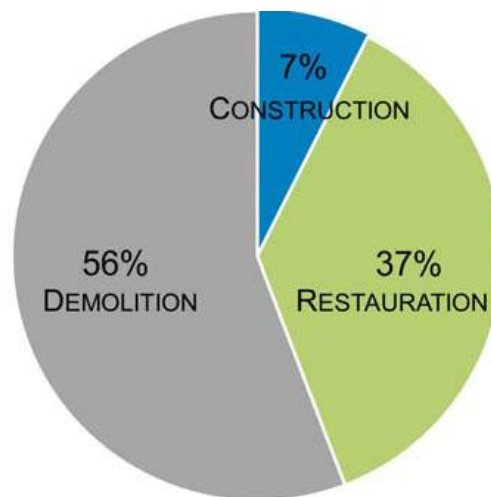


Fig. 1.2 : Contribution des déchets pour les différentes étapes d'un bâtiment pour un total de 37 millions de tonnes pour l'année 1999, d'après l'ADEME. (ADEME, 2015)

D'autre part, Thormak dans (Catarina, 2002) relie les performances thermiques d'un bâtiment (souvent liées aux matériaux isolants) aux coûts de construction associés. L'étude révèle que pour les bâtiments à basse consommation BBC (au dessous de $45 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$), l'énergie utilisée pendant la phase de construction atteignait 40% de l'énergie totale. De plus, l'étude prévoit une part de 15% de l'énergie totale pour le traitement des déchets. (Champire F, 2017)

2.2. Faible énergie grise des constructions en terre

L'énergie grise est un concept utilisé pour évaluer l'énergie nécessaire pour la production de tout bien ou service durant leur cycle de vie complet. Elle est la

somme de toutes les énergies, qu'elles soient humaines, animales, électriques, thermiques, etc.

La faible énergie grise des constructions en pisé est synthétisée dans la (Figure 1.3)

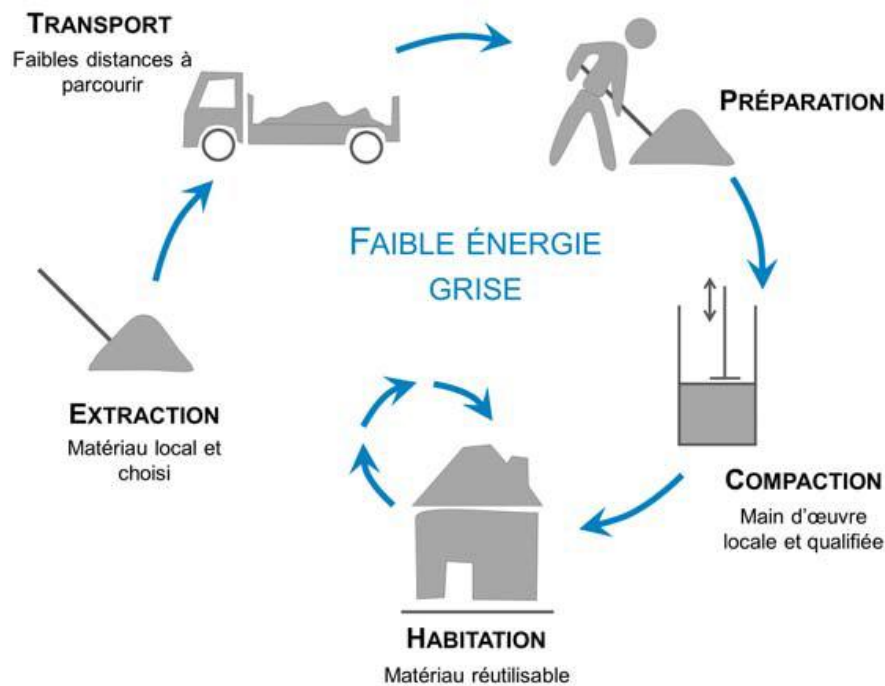


Fig. 1.3 : La faible énergie grise des constructions en terre. (Champire F, 2017).

Tout d'abord, comme mentionné précédemment, la terre crue est un matériau prélevé directement du sol et facilement préparé pour être utilisé dans la construction. Elle est extraite à seulement quelques kilomètres du chantier afin de minimiser les coûts de transport. D'après (Morel et al, 2001), dont les données sont reportées dans le Tableau 1.1, la comparaison de trois types de construction, en termes de transport en t.km, met en évidence que ce coût pour les constructions en béton est 644% plus important que pour le pisé. D'autre part, le matériau, étant composé de sol naturel, il ne dégage pas de substance nocive.

Le processus de construction en terre crue requière une main d'œuvre nombreuse et qualifiée. Depuis l'extraction de la terre, sa préparation, l'installation du coffrage, jusqu'au damage, la réalisation d'un mètre carré de mur de 50 cm d'épaisseur de pisé nécessite environ 8h alors que cette durée est divisée par 4 pour les autres méthodes classiques de construction, comme le béton armé par

exemple (Vincent Rigassi Architecte dans (Contet, 2012)). Le travail d'un maçon-piseur nécessite un savoir-faire afin de garantir la bonne réalisation et la durabilité de la construction en terre. (Champire F, 2017).

Tab. 1.1 : Consommation énergétique de différents types de construction. (Champire F, 2017)

	Maçonnerie en pierres avec mortier de terre	Pisé	Béton
Énergie totale (GJ)	97	70	239
Transport (t.km)	1390	1041	6707

Cet héritage est transmis par la formation d'apprentis, ce qui diffère grandement de l'approche de la plupart des autres matériaux de construction où l'automatisation, l'industrialisation et la mécanisation sont de mise. D'autre part, les constructions en pisé ont certes besoin d'une main d'œuvre nombreuse, mais de très peu d'énergie et utilisent le matériau brut. En revanche, les autres techniques de construction classiques sont plus coûteuses en termes de matériaux et de transport, mais moins en termes de masse salariale. En effet, d'après (Contet, 2012), la main d'œuvre représente environ 20% de l'énergie de construction pour un mur d'1m² de pisé, contre environ 0,3% pour la maçonnerie industrielle. Ces données sont confirmées dans le Tableau 1.1, où l'énergie totale nécessaire pour le béton est à 341% supérieure à celle du pisé.

La comparaison en termes d'émission de gaz à effet de serre est réalisée par (Contet, 2012) et est synthétisée dans la Figure 1.4. (Champire F, 2017).

Enfin, les constructions en pisé non stabilisées sont réutilisables. Ce processus est facilement mis en œuvre du fait de la sensibilité à l'eau du matériau : la réhumidification de la terre est suffisante. Le matériau peut être réutilisé pour un autre projet de construction dans les environs ou rejeté dans la nature sans traitement, ce qui limite considérablement l'impact environnemental.

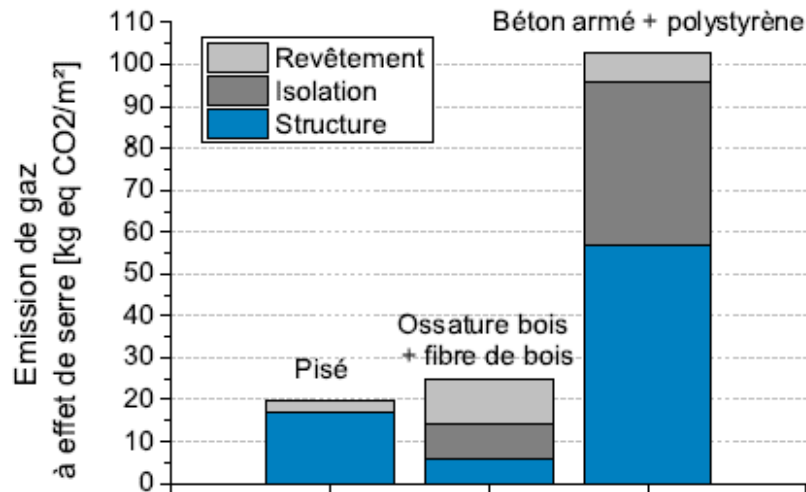


Fig.1.4: Emission de gaz à effet de serre pour différentes méthodes de construction.
(Champire F, 2017).

Pour conclure, le développement de constructions à base de terre apparaît comme une alternative durable face aux constructions conventionnelles, étant donné que l'avantage principal de la terre est lié au fait que ce soit un matériau local, qui peut être produit et utilisé immédiatement sur le chantier, et qui ne nécessite aucun processus industriel. Enfin, ce n'est pas un matériau recyclable mais réutilisable : il ne nécessite aucun traitement, ce qui diminue fortement son impact environnemental. (Champire F, 2017).

3. LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION

C'est la solidité des constructions de terre qui permet de construire des édifices durables depuis des millénaires. Si nous regardons les différents bâtiments érigés, nous pouvons voir qu'il existe une panoplie de typologies constructives. En effet, il existe différents modes de mise en œuvre de la terre crue. Chacune de ces techniques est née de contextes géographiques différents, de modes de vie particuliers, de coutumes différentes, de climats variés ou encore selon les matériaux disponibles. Les cinq techniques de construction les plus répandues sont les suivantes : le pisé, l'adobe, le torchis, la bauge et les briques de terre comprimée (BTC) mais il en existe de nombreuses autres. Chaque technique a ses spécificités et utilise une terre bien précise. En effet, chacune d'elle demande une

courbe granulométrique différente ainsi que des états hydriques et hygrométriques différents. (Paulus J, 2015).

H. Guillaud et H. Houben (1995) ont schématiquement répertorié les douze techniques principales dans une « roue » des techniques de construction en terre (Fig. 1.5), mais ils précisent tout de même qu'il en existe environ une centaine dans la réalité. En plus d'être simplificateur, ce tableau circulaire ne fait pas non plus la distinction entre les techniques traditionnelles et les techniques nouvelles.

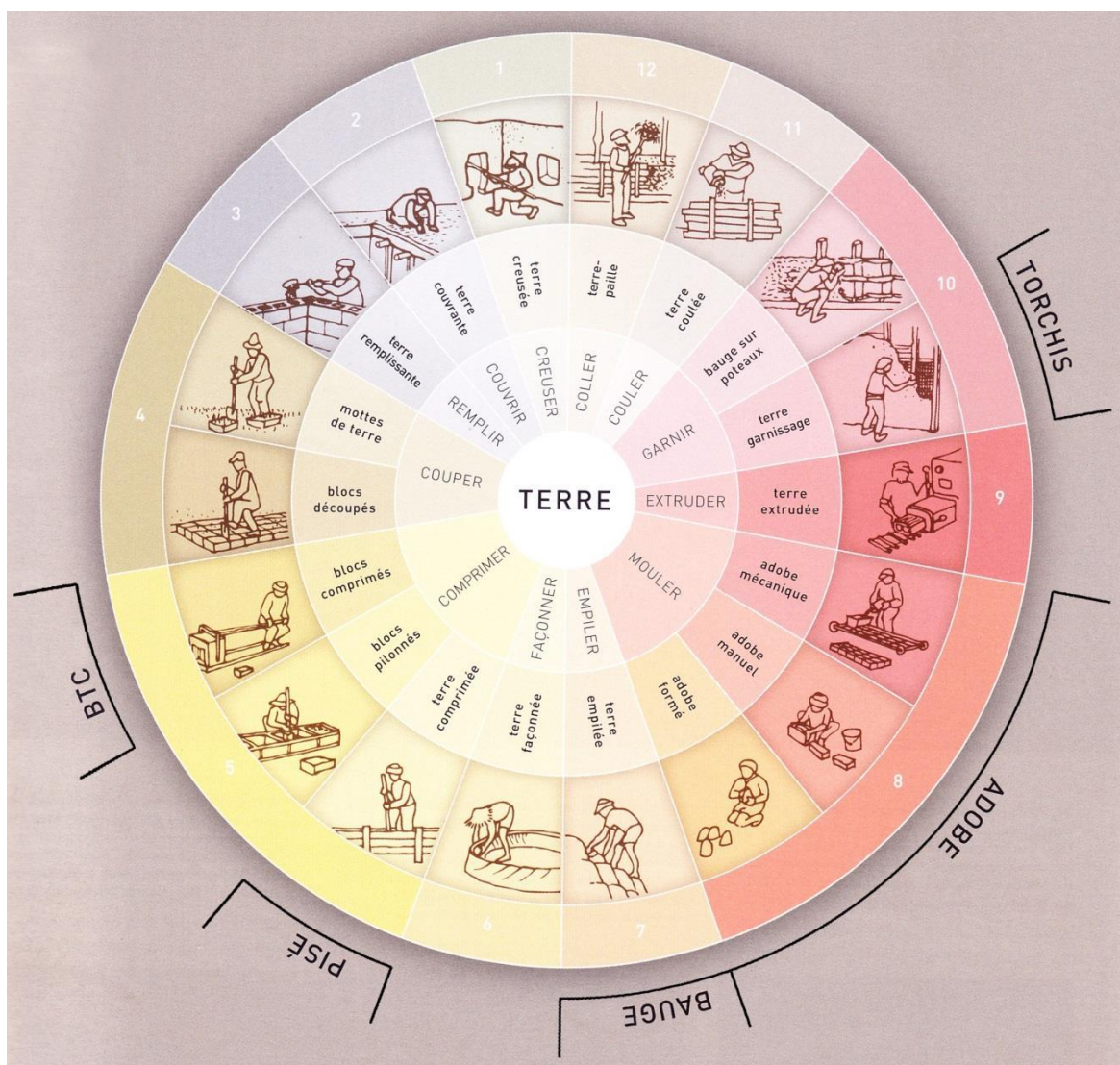


Fig.1.5 : "Roue" des techniques de construction en terre. (Paulus J, 2015).

Si l'on reprend les cinq techniques les plus répandues citées plus haut, on peut les associer au schéma (Fig. 1.6) de la façon suivante : les blocs comprimés de la technique 5 correspondent aux BTC ; la terre comprimée de la technique 5

concorde avec le pisé ; la technique 7, c'est-à-dire la terre empilée, coïncide avec la technique de la bauge ; l'adobe correspond à la technique 8, c'est-à-dire les adobes formés, manuels ou mécaniques ; le torchis est quant à lui associé à la terre de garnissage de la technique 10 (Anger & Fontaine, 2009). (Paulus J, 2015).

Les techniques 1 à 4 de ce schéma (terre creusée, terre couvrante, terre remplissant et blocs découpés) se mettent en œuvre avec une terre sèche, c'est-à-dire avec une teneur en eau allant de 0 à 5%.

Les techniques 1 à 4 peuvent également être mises en œuvre avec une terre humide, tout comme la technique 5 (terre comprimée). La teneur en eau d'une terre humide varie entre 5 et 20%.

Les techniques 6 à 10 (terre façonnée, terre empilée, adobe, terre extrudée et terre de garnissage) se mettent en œuvre à l'état plastique. Cet état a une teneur en eau s'étalant de 15 à 30%.

Les techniques 8, 9 et 10 peuvent également être réalisées avec une terre visqueuse, c'est-à-dire une terre ayant une teneur en eau comprise entre 15 et 35%.

Finalement, les techniques 11 et 12 (terre coulée et terre-paille) se mettent en œuvre avec une terre liquide (Fig. 1.6).

Ci-dessous, certaines techniques de construction en terre des plus répandues à travers le monde et les époques vont être présentées. Bien sûr, cet inventaire ne sera pas exhaustif mais il sera tout de même assez représentatif des constructions que l'on a pu ou que l'on trouve aujourd'hui encore partout dans le monde. (Paulus J, 2015).

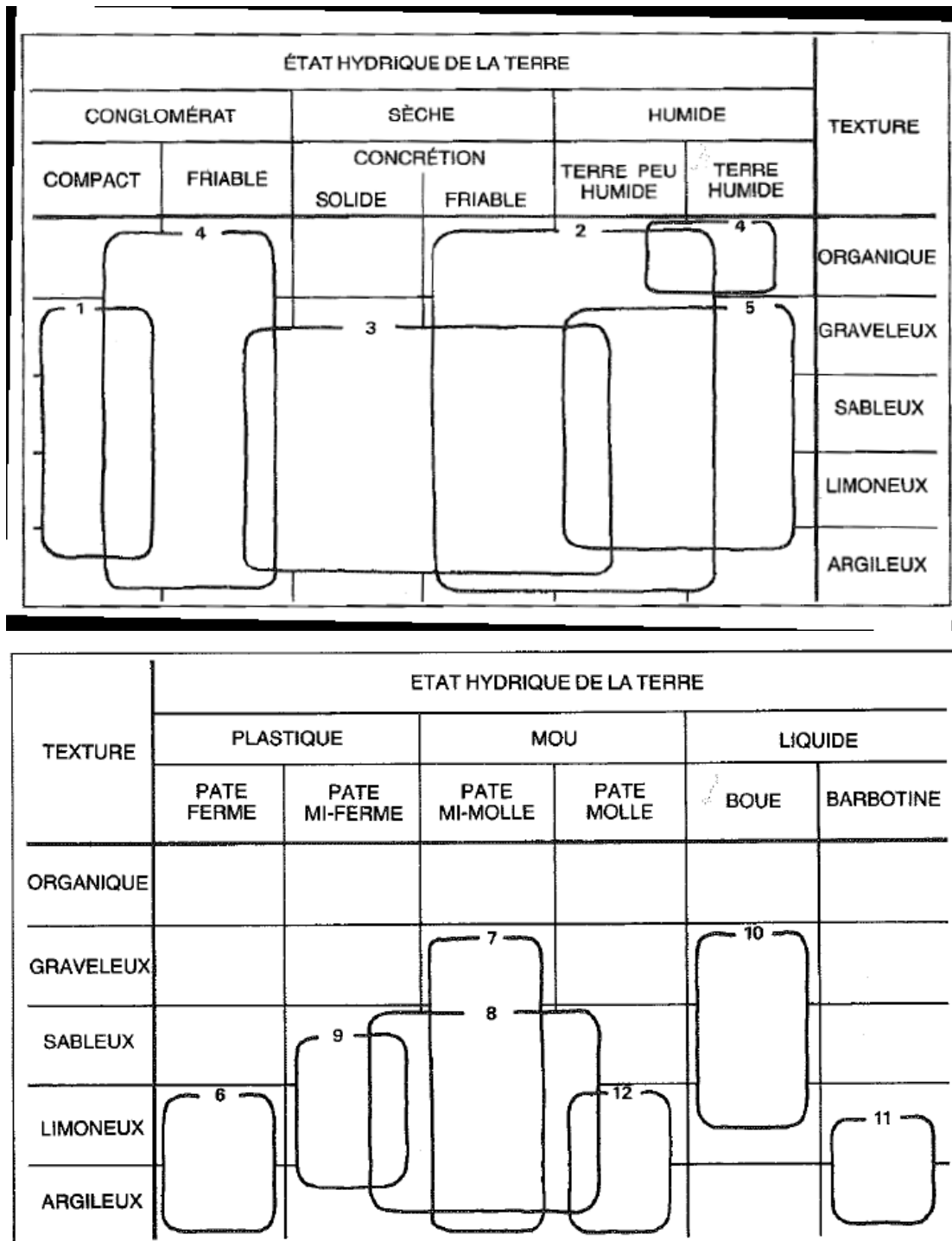


Fig. 1.6 : Etat hydrique de la terre. (Champire F, 2017)

4. ADOBES

Les adobes, également appelés banco en Afrique, sont « des briques de terre crue, façonnées à la main ou moulées à l'état plastique, puis séchées à l'air libre » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 42). La terre utilisée pour la fabrication des adobes est de granulométrie relativement fine : elle ne doit contenir ni cailloux ni

graviers étant donné les petites dimensions des moules et le travail manuel de la terre. Elle ne doit pas non plus être trop argileuse pour éviter les fissurations au séchage. Afin de minimiser ces dernières, on peut également y rajouter du sable ou des fibres végétales. (Paulus J, 2015)

Pour fabriquer des briques prismatiques, la terre est moulée à l'état plastique et est tassée à la main afin de chasser l'air. Elle peut alors être directement démoulée. On laisse sécher les briques au soleil durant quelques jours puis, dès qu'elles peuvent être manipulées sans se déformer, on les dresse sur les panneresses afin qu'elles sèchent uniformément sur les faces de pose et d'appui. Une fois sèches, les briques sont stockées puis maçonnées avec un mortier de terre extrêmement collant. Il s'agit de la technique de construction en terre la plus rapide. En effet, sa vitesse d'exécution peut être comparée à celle des matériaux industriels. On peut construire l'entièreté d'une construction avec seulement des adobes grâce aux techniques des arcs, voûtes et coupoles. La fabrication des adobes nécessite également très peu d'outillage : seul un moule en bois (ou en métal) est indispensable pour construire des briques rectangulaires. Il s'agit donc d'une méthode très économique répondant parfaitement aux besoins des pays en développement. Cette technique a connu une large évolution depuis le VIII^e millénaire ACN, époque à laquelle les premières briques de terre crue, de formes coniques, ont été façonnées à la main sans moule. La plus ancienne brique piriforme retrouvée sur un site archéologique de Jéricho date de 8000 ans ACN. La technique a ensuite évolué vers des formes cylindriques puis semi-sphériques. Les plus anciennes briques rectangulaires, plus récentes que les précédentes, ont été retrouvées en Turquie sur le site de Çatal Höyük et datent quant à elles du VI^e millénaire ACN. Aujourd'hui, ces briques prismatiques sont les plus répandues avec des formats variant de 20x11x5cm (2kg) à 60x30x10cm (30kg). La production est soit artisanale avec une production journalière variant de 100 à 600 briques par homme, soit industrielle avec une production automatisée pouvant produire plusieurs milliers de blocs par jour. Le patrimoine architectural en adobe est présent sur tous les continents, aussi bien dans l'architecture vernaculaire que dans les bâtiments publics ou les édifices monumentaux. On recense une vingtaine de centres historiques bâtis en adobes comme Shibam au

Yémen (surnommé le Manhattan du désert) (Photo. 1.2a), Ghadamès en Libye (Photo. 1.2b), Lima au Pérou (Photo. 1.2c) (Anger & Fontaine, 2009 ; Guillaud & Houben, 1995). (Paulus J, 2015). ou encore Oued Mzab en Algérie (Photo.1.2d)

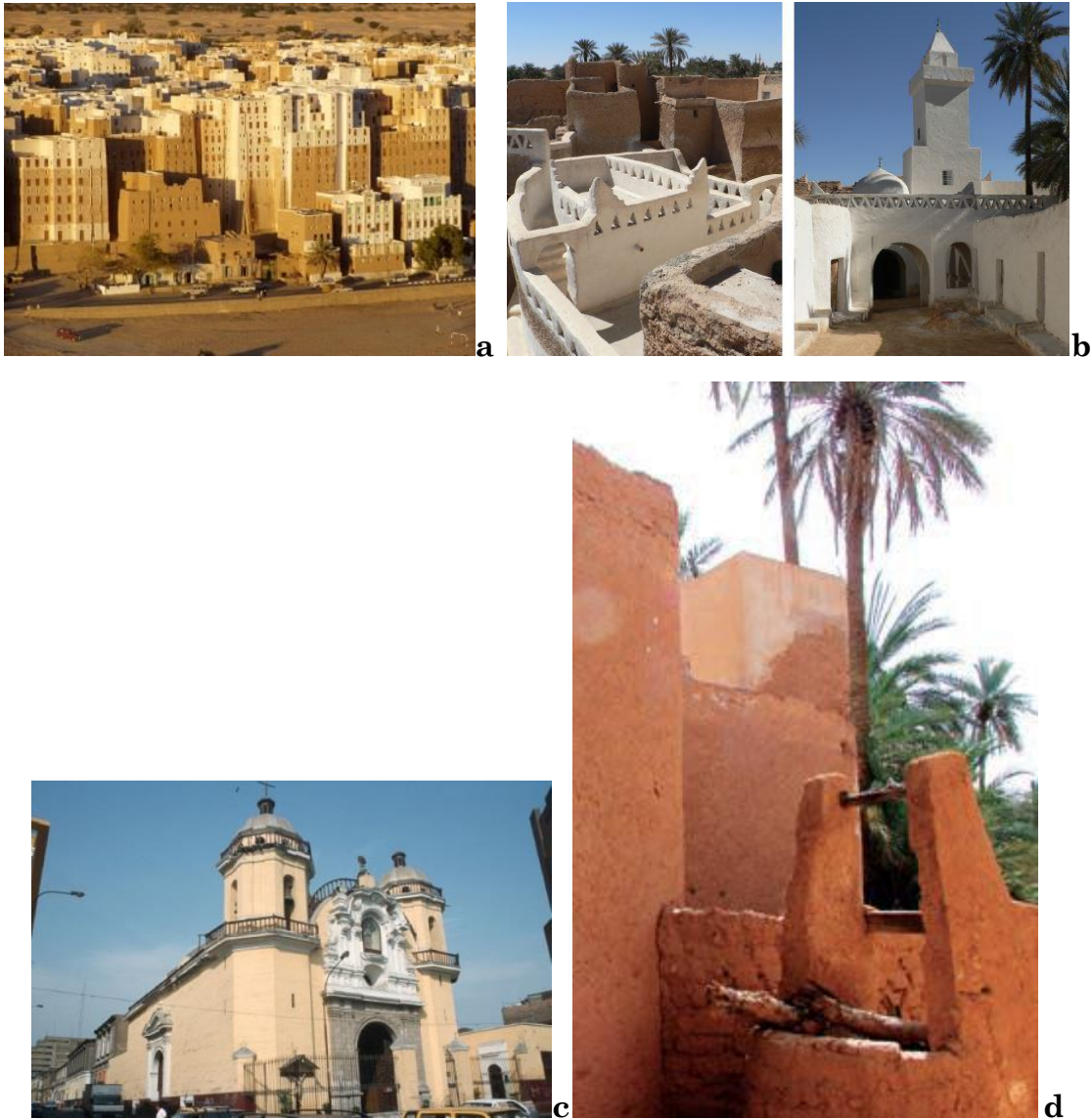


Photo. 1.2 : Constructions en adobe : Shibam, Yémen ; Ghadamès, Libye ; Lima, Pérou ; Oued Mzab, Algérie. (Paulus J, 2015)

5. PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES

Les tests de laboratoire permettent de connaître les caractéristiques de la terre disponible avec plus de précision qu’avec les tests réalisés sur chantier.

À l’heure actuelle, il existe très peu de normalisation pour l’utilisation de la terre comme matériau de construction. On retrouve seulement quelques normes pour

l'adobe et pour la terre damée stabilisée qui précisent la résistance minimale et la durabilité du matériau terre.

Des essais expérimentaux réalisés par différents organismes de pays industrialisés permettent d'avoir tout de même une idée des performances techniques du matériau terre en général. Ces caractéristiques peuvent être comparées aux résultats obtenus aux essais énoncés précédemment afin de s'assurer de la fiabilité de ceux-ci. (Paulus J, 2015).

5.1. Composition de la terre crue

La terre crue est un matériau minéral granulaire, composé de matière solide, liquide et gazeuse. La fraction solide est constituée de grains : cailloux (taille exprimée en centimètres), de graviers (de 20 mm à 5 mm), de sables (5 mm à 0,06 mm), de silts (0,06 mm à 2 μm), d'argiles, qui sont des plaquettes plutôt que des grains (taille inférieure à 2 μm) et d'oxydes métalliques qui ont des propriétés colorantes (taille également inférieure à 2 μm). La fraction liquide est constituée d'eau et de corps organiques et minéraux dissous dans cette eau. La fraction gazeuse est constituée d'azote, d'oxygène, de gaz carbonique, ainsi que de gaz issus de la vie présente dans la terre (hydrogène, méthane, etc.). Les fractions liquides et gazeuses subissant des modifications très rapides, on caractérise traditionnellement un sol par sa fraction solide, ce qui se traduit par l'étude de sa granulométrie. Lors de l'utilisation de la terre crue pour réaliser un ouvrage, la fraction liquide est à prendre en compte avec autant d'attention que la fraction solide : c'est l'état hydrique de la terre.

Au-delà de ces vitrines technologiques, prenons l'exemple plus familier d'une maison moyenne de 100 m² en béton armé: l'énergie nécessaire à sa construction représente l'équivalent de 40 années de dépense de chauffage. À titre de comparaison, avec la même énergie nous pourrions construire l'équivalent de 10 maisons en bois ou 50 maisons en terre crue de même surface, toute chose étant égale par ailleurs. (Champire F, 2017).

5.2. Caractéristiques physiques de la terre crue

5.2.1. Aspect thermique

Contrairement aux idées reçues, la terre n'est pas un matériau isolant. En revanche, elle possède une excellente inertie thermique. Ceci se traduit par une

régulation des différences de températures intérieures (pour l'été : plus frais le jour car le mur se rafraîchit la nuit, rendant cette fraîcheur le jour).

Voici quelques valeurs, pour une terre à 1 500 kg/m³ :

- conductivité : 0,75 W/m.°K ;
- chaleur spécifique : 900 J/kg.°C ;
- capacité thermique : 1 350 kJ/m³.°C
- effusivité thermique : 1,00 J/(racine carrée de la capacité thermique).m².°C.

Soit, pour du pisé à 2 000 kg/m³, une capacité thermique de 1 800 kJ/m³. °C. (Atoke R., 2013).

5.2.2. Masse volumique

La masse volumique est liée à la quantité de matière gazeuse présente dans la terre. Elle s'étale de 1 200 kg/m³ à 1 600 kg/m³ pour de la terre foisonnée (dans un tas de terre par exemple). Cette valeur augmente suite à une mise en œuvre par compactage (pisé par exemple). On obtient alors idéalement une masse volumique de 2 000 kg/m³. Les mélanges amendés en paille sont plus légers : en terre-paille, la masse volumique est de 300 kg/m³ à 1 300 kg/m³.

Pour des briques de terre crue filée (densité : 2,00) : conductivité = 1,05 W/m.°C, inférieure à celle de la brique cuite (1 à 1,35) ; capacité = 2000 KJ/m³.°C, supérieure à celle de la brique cuite (1360 à 2100). (Atoke R., 2013).

5.3. Autres propriétés

- indice de correction acoustique à 500 Hz : 50 dB pour un mur de 20 cm en briques de terre crue filée
- bonne diffusion de la vapeur d'eau, pare-vapeur ou VMC inutiles
- propriétés absorbantes des argiles (produits de dégraissage type K2R)
- protection contre les nuisances associées aux ondes électromagnétiques générées par les appareils et circuits électriques
- par sa nature, le matériau n'entre pas dans un cycle de dégénérescence.
- peut absorber jusqu'à 3% de son poids en vapeur d'eau (évolution de sa teneur en eau de 4% à 7%, ce qui permet d'avoir une inertie " hydrique " non négligeable en ce qui concerne le confort)
- évite l'excès d'humidité qui provoque des rhumatismes

- évite le manque d'humidité qui provoque des problèmes oculaires, inflammatoires et respiratoires. (Atoke R., 2013).

5.4. Résistance mécanique

La terre crue est un matériau s'apparentant aux bétons. Du point de vue mécanique, elle fonctionne comme ces derniers, uniquement en compression (les valeurs de résistance à la traction, à la flexion et au cisaillement sont très faibles). La terre mise en œuvre de manière monolithique (pisé, bauge) a généralement une résistance à la compression d'environ 20 kg/cm² (2 MPa). Les éléments de maçonnerie (adobes) ont des résistances à la compression pouvant aller de 20 kg/cm² à 50 kg/cm² (2 MPa à 5 MPa). L'adjonction d'éléments fibreux (paille par exemple) permet de conférer au mélange une certaine résistance en traction, flexion et cisaillement, mais qui reste tout de même négligeable. (Atoke R., 2013).

(Doat et al. 1979) recommandent les caractéristiques suivantes pour une construction à un seul niveau :

- Résistance à la compression : 2 kg/cm²
- La résistance à la compression humide vaut environ la moitié de la résistance à sec
- Résistance à la traction : 0
- Résistance au cisaillement : 0,3 kg/cm²
- Module d'Young : 7000 à 70 000 kg/cm²
- Perméabilité : 1x10⁻⁶ cm/sec
- Dilatation thermique : 0,012 mm/m par °C
- Coefficient de conduction thermique : 0,44 à 0,57 Kcal/h.m.°C
- Chaleur spécifique : 0,2 Kcal/kg
- Déphasage horaire pour un mur de 40 cm : 8 à 12 heures
- Amortissement phonique pour un mur de 40cm et une fréquence de 500 Hz : 56 dB. (Narcisse M, 2017).

(Moevus et al. 2012) récapitulent (voir Tableau 1.2) les principales propriétés de la terre brute mises à jour pour les trois principaux types de mise en œuvre de la terre pour la construction: terre compactée, terre de moulage et terre additionnée

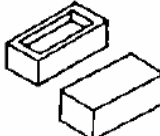
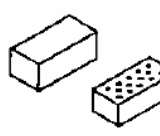
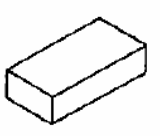
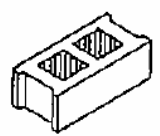
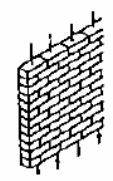
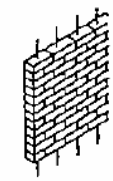
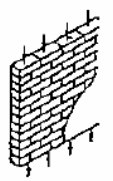
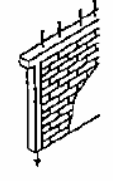
de fibres. Les valeurs indiquées dans la référence (Houben et Guillaud, 1989) sont rappelées entre parenthèses aux fins de comparaison. (Moevus M, 2012).

Tab. 1.2 : Synthèse des principales propriétés des matériaux en terre pour la construction. (Moevus M, 2012).

Propriété	Unité	Terre compactée	Terre moulée	Terre fibreuse
Teneur en argile	%	5 - 30	20 - 40	
Indice de plasticité PI	%	5 - 30	15 - 35	
Teneur en eau initiale w_{ini}	%	5 - 15	15 - 35	
Densité sèche ρ	kg/m ³	1600 - 2200 (1700 - 2200)	1200 - 2100 (1200 - 1700 pour adobe)	300 - 1200 (600 - 800)
Teneur en eau ambiante w	%	0 - 5%		
retrait de séchage	%	1 - 3 (0,02 - 0,1 pour les CEB, 0,1 - 0,2 pour les pisés)	1 - 20 (0.02 - 0.1 pour adobe)	proche de 0
Facteur de résistance à la vapeur d'eau μ		5 - 13		
Module de Young E	GPa	1.0 - 5.5 (0,7 à 7,0 pour la terre stabilisée au ciment)		<1.0
Résistance à la compression uniaxiale R_c	MPa	0,4 - 3,0 (2.0)	0.4 - 5.0	
Résistance à la traction R_t	MPa	0.1 - 0.5 (0.5 - 1.0 pour la terre et les CEB)		
Capacité thermique massique c	J/kg.K	600 - 1000 (~ 850)		
Capacité thermique volumique C	kJ/m ³ . K	960 - 2200	720 - 2100	180 - 1200
Conductivité thermique λ	W/m.K	0,5 - 1,7 (0,81 - 0,93)	0,3 - 1,5 (0,46 - 0,81)	0,1 - 0,3 (0,1 - 0,45)

CRATERre, pour sa part, a donné la comparaison suivante entre les caractéristiques de BTC, Briques cuites, Adobe et Blocs de béton léger (voir Tableau 1.3)

Tab. 1.3 : Comparaison entre le BTC et d'autres matériaux de maçonnerie. (Guillaud, 1995).

COMPARAISON ENTRE LE BTC ET D'AUTRES MATERIAUX DE MAÇONNERIE					
Caractéristiques	Unité	BTC	Briques cuites	Adobes	Blocs de béton léger
FORME ET TAILLE					
Type					
L x l x h	cm	29,5 x 14 x 9	22 x 10,5 x 6,5	40 x 20 x 10	40 x 20 x 15
ASPECT					
- Surface		lisse	rugueuse à lisse	irrégulière	rugueuse
- Intérêt esthétique		moyen à bon	bon à excellent	pauvre	moyen
PERFORMANCES					
- Résistance en compression humide	Mpa	1 à 4	0,5 à 6	0 à 5	0,7 à 5
- Dilatation thermique réversible	%	0,02 à 0,2	0 à 0,02	-	0,02 à 0,05
- Isolation thermique	W/m°C	0,81 à 1,04	0,7 à 1,3	0,4 à 0,8	1,0 à 1,7
- Masse volumique apparente	kg/m ³	1 700 à 2 200	1 400 à 2 400	1 200 à 1 700	1 700 à 2 200
- Durabilité		faible à très bonne	faible à excellente	faible	faible à très bonne
EMPLOI EN MAÇONNERIE		porteur	porteur	porteur	remplissage
					
		sans enduit	sans enduit	avec enduit	avec enduit

Le projet Béton d'Argile Environnemental a débuté par un recensement bibliographique des caractéristiques hygroscopiques, mécaniques et thermiques de la terre crue utilisée dans la construction. Seules les données fiables issues d'articles scientifiques, de rapports d'essais et d'ouvrages techniques ont été retenues. Les principaux résultats de cet état de l'art sont synthétisés dans les figure (1.10, 1.11 et 1.12).(Moevus-Dorvaux M, 2016).

A cette état des connaissances, les adobes ont des densités généralement comprises entre 1100 et 2000 kg/m³.

La résistance a la compression d'une terre mise en œuvre pour la construction peut varier entre 0,4 et 5 MPa. Pour l'adobe, les valeurs sont plus resserrées : 1 a 2 MPa.

La conductivité thermique de la terre sèche dépend en premier lieu de sa masse volumique et sa porosité. Elle est de l'ordre de 1,3 W/(m.K) pour des terres très denses (2200 kg/m³), et peut descendre à 0,10 W/(m.K) pour des mélanges terre-chanvre ou terre-paille de 500 kg/m³.

Pour un adobe, la conductivité thermique peut passer de 0,3 à 1,7 W/(m.K), la variation de conductivité est plus ou moins marquée en fonction de chaque terre : elles n'ont pas toutes la même sensibilité "thermique" à l'eau.

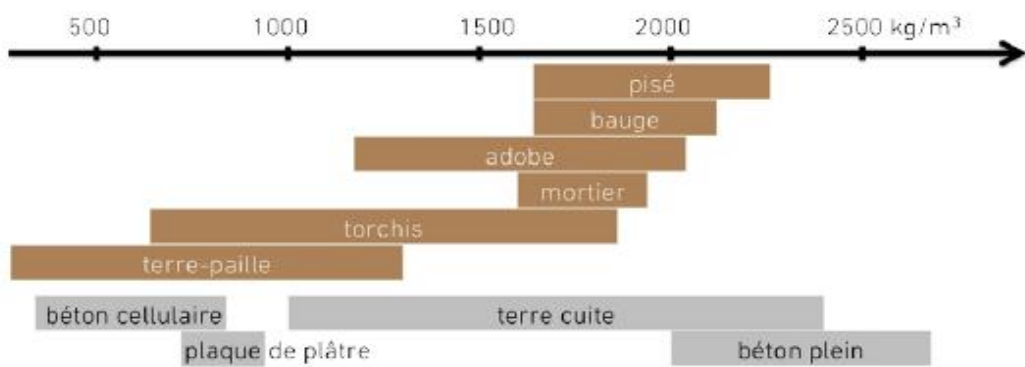


Fig. 1.7 : La masse volumique sèche (ρ_d). (Moevus-Dorvaux M, 2016).

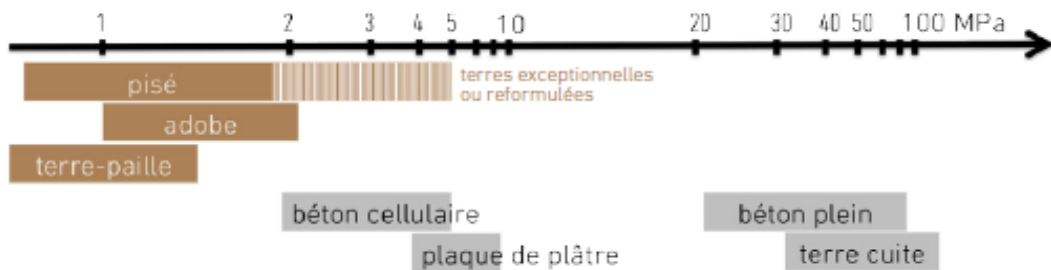


Fig. 1.8 : La résistance à la compression. (Moevus-Dorvaux M, 2016).

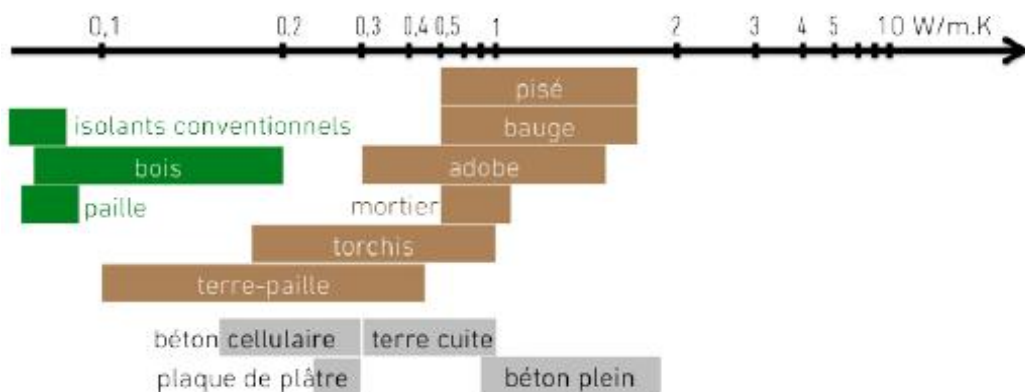


Fig. 1.9 : La conductivité thermique (λ). (Moevus-Dorvaux M, 2016).

Chapitre 2

Chapitre 2

Construire en Terre à Bou-saâda

1. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

1.1. Aperçu géographique

1.1.1. Localisation géographique

La commune de Bou-saâda située sur la partie Sud de la Wilaya de M'sila, au sud-est du nord algérien, à 250 km d'Alger et environ 200 km à vol d'oiseau de la mer (**Fig.2.1**). Elle est placée au point de rencontre des coordonnées spatiales suivantes : 4° 11' longitude et 35° 13' latitude nord, sur une altitude de 560m au-dessus du niveau de la mer, couvre une superficie de 255 km². (**Site** : https://fr.wikipedia.org/wiki/Bou_Sa%C3%A2da).

1.1.2. Développement et économie

Bou-saâda possède un bon emplacement géographique pour être important dans l'avenir pétri par les fondamentaux économiques et naturelles qui affecte directement les municipalités environnantes. Cet emplacement à la croisée des routes nationales (RN8 : Alger- Biskra, RN46 : M'sila- Djelfa) constitue un important carrefour d'échange entre la méditerranée et le Sahara, mais aussi entre les Ziban et le littoral algérois, et entre le M'Zab et Constantine. Bou-saâda c'est une zone touristique riche des Oasis et des cascades d'ailleurs on dit "oasis Bou-saâda", connue de ses palmeraies et ses plaines cultivées, irriguées à partir de la nappe phréatique ainsi que les oueds de Maiter et Boussaâda. Cette ville en plein évolution spatiale, n'a pas répondu à un plan spécifique dans son tracé, bien au contraire elle a connu plusieurs plans, à savoir : le plan linéaire, le plan en damier, le plan radioconcentrique.(Benrabia A, 2013).

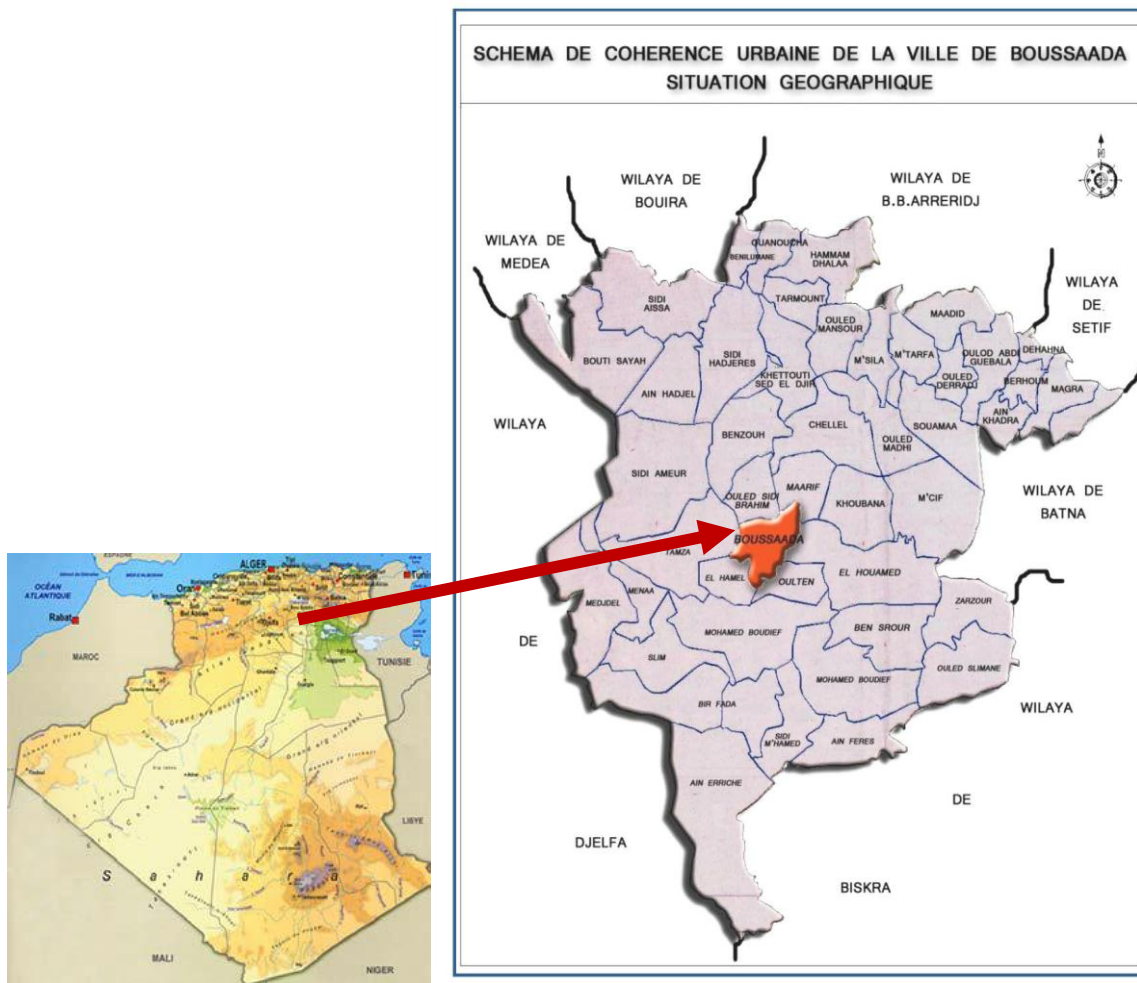


Fig.2.1 : Situation géographique de la ville de Bou-saâda. (Benrabria, 2013).

Son tissu urbain se structure autour de plusieurs axes qui sont principalement des axes routiers importants, le long desquels se répartissent les logements et les différents équipements (administratifs, scolaires etc....):

- L'axe Bou-Saada –Alger sur la RN08 : il structure la ville de Bou-Saada, notamment dans la partie Nord-Ouest, le long duquel s'allonge le pôle urbain (la ZHUN), qui contient certains équipements structurants.
- Axe Bou-Saada- Biskra RN46 : c'est un axe structurant la partie Sud- Est le long duquel se localise la zone d'activité, ainsi certains équipements.
- Axe Bou-Saada -Djelfa : représente par la RN 46 qui traverse la structure du Nord- Est vers le Sud-ouest.
- D'autres éléments naturels et technologique contribuent à la restriction de la forme actuelle de tissu bâtie de la ville et orientent son extension :
- Les Oueds ; Oued Bou-Saada et notamment oued Maiter.

- Les terrains sableuse sur les rives d'oued Maiter, situé sur le côté Ouest et côté Nord-est de la ville.(Benrabia A, 2013).

1.1.3. Habitats et activités

La plupart des agriculteurs sont concentriez au village Agricole El-Maadhar. Malgré c'est une vi000lle où l'eau jaillit abondamment grâce à la richesse de ses nappes phréatiques qui alimentent sans discontinuité les sources et les fontaines publiques. La terre est fertile et les potentialités agricoles de la ville sont énormes. Mais peu qui se mettent au travail et ose remuer à cette terre généreuse, car les résultats se font sentir au niveau des EAC (Exploitation agricole collective) où de grandes superficies verdoyantes occupent la partie sud-ouest de la ville.(Benrabia A, 2013).

1.1.4. Relief

Les reliefs de la région de Bou-saâda sont caractérisés par la présence de chaines de montagne d'orientation variée surtout au niveau de la partie Sud et Sud-ouest.

Les reliefs existants :

- Djebel Grigour côté Nord-ouest de la ville.
- Djebel Moubkhira côté Sud-ouest du chef-lieu (772 m).
- Djebel Kerdada côté Sud (947 m).
- Mont de Menkeb Sidi Brahim (718 m) côté Sud-est de la ville et djebel El MAALLEG côté Sud de la commune.
- Les terres agricoles du côté Nord–est (village agricole d'El Maadher).
- Les vallées Traversant le périmètre de Bou-saâda :
 - La vallée de l'oued Bou-saâda qui forme une sorte de couloir entre le Djebel Moubakhera et Djebel Kerdada et coule au pied de ce dernier en se jettant dans la plaine Nord.
 - La vallée de l'Oued Maiter située à l'Ouest de la ville de Bou-saâda avec une altitude de 587m à la limite Ouest de la commune et 547 m sur la RN 8, formant un couloir venteux animé par les vents Ouest et Nord, engendrant des champs de Dunes orientés Ouest-Sud-ouest / Est-Nord-est. Les formes récentes ne sont généralement pas stabilisées, ce sont parfois des dunes au pied des reliefs comme celui du Djebel Kerdada. Sur la rive Est de l'Oued MAITER on trouve

des champs de Sebkhass où les larges lits de l'Oued sont souvent à sec et sont soumis à la déflation des vents de l'Ouest.(Benrabia A, 2013).

1.1.5. Démographie

Bou-saâda est la deuxième commune la plus peuplée de la wilaya de M'Sila après la commune de M'Sila, selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2008 (152306 habitants), la population de la commune est évaluée à 152306 habitants en 2015 (**Tableau.2.1**).

Tab.2.1: Evolution démographique de la population du Bou-saâda.(Paulus J, 2015).

2015	2008	1998	1987
152306	125 573	104 029	66 688

1.1.6. Répartition administrative

La commune de Bou-saâda est limitée :

- Au nord par la commune d'Ouled Sidi Brahim.
- Au nord est par la commune de Maarif.
- A l'est par la commune d'Elhouamed.
- A l'ouest par la commune de Tamsa.
- Au sud est par la commune d'Oueltem.
- Au sud ouest par la commune d'Ehamel. (Benrabia A, 2013).

1.1.7. Le climat

Le climat de Bou-saâda est de type semi aride, d'un été sec et très chaud et hiver très froid (**Tableau.2.2**).

Les aléas du climat, la désertification, une pluviométrie faible, irrégulière et inégalement répartie. (https://fr.wikipedia.org/wiki/Bou_Sa%C3%A2da)

1.1.8. Conclusion

La région de Bou-saâda est caractérisée par un climat semi-aride, sec et très chaud en été et très froid en hiver.

Tab.2.2: Données climatiques à Bou-saâda.

Mois	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	jui.	août	sep.	oct.	nov.	déc.
Température minimale moyenne (°C)	3,7	4,6	7,4	11,7	16,2	21,1	24,7	24,1	19,4	14,7	8,7	5,4
Température moyenne (°C)	9,2	10,7	14,4	18,1	23,1	28,7	32,5	31,7	25,9	20,8	13,9	10,3
Température maximale moyenne (°C)	14,6	16,7	21,3	24,5	30	36,3	40,2	39,3	32,4	26,9	19,1	15,1
Précipitations (mm)	34	22	29	25	25	14	4	14	24	24	32	35

Source : Weather online, statistiques de 2000 à 2012.

1.2. Aperçu géologique

Les principaux traits de la zone ont été dégagés des travaux de SAVORNIN (1920) et d'EMBERGER (1964) pour la géologie et des travaux de CAPOLINI et SARI (1969) pour la géomorphologie. (Savornin J, 1920) (Emberger J, 1964) (Capollni J. 1969).

C'est la rive sud du Chott el Hodna (**Fig.2.2**) (**Fig.2.3**), caractérisée par l'absence de Miocène marin et une épaisseur de Tertiaire moins importante qu'au Nord du Chott :

- a) à l'Est et au Sud par les pointements jurassiques des Fennd et le massif du Meharga,
- b) au SW l'anticlinal du Dj Kerdala,
- c) à l'Ouest les Dj Zemra et Selat.

Par ailleurs, la ville de Bou-Saada et l'Oued Temsa-Maittar délimitent deux zones structurales distinctes:

- a) au Nord un plateau rattaché aux Hautes Plaines Algéroises.
- b) au Sud une partie plissée rattachée à l'Atlas Saharien. Une grande faille E-W sépare les deux zones.

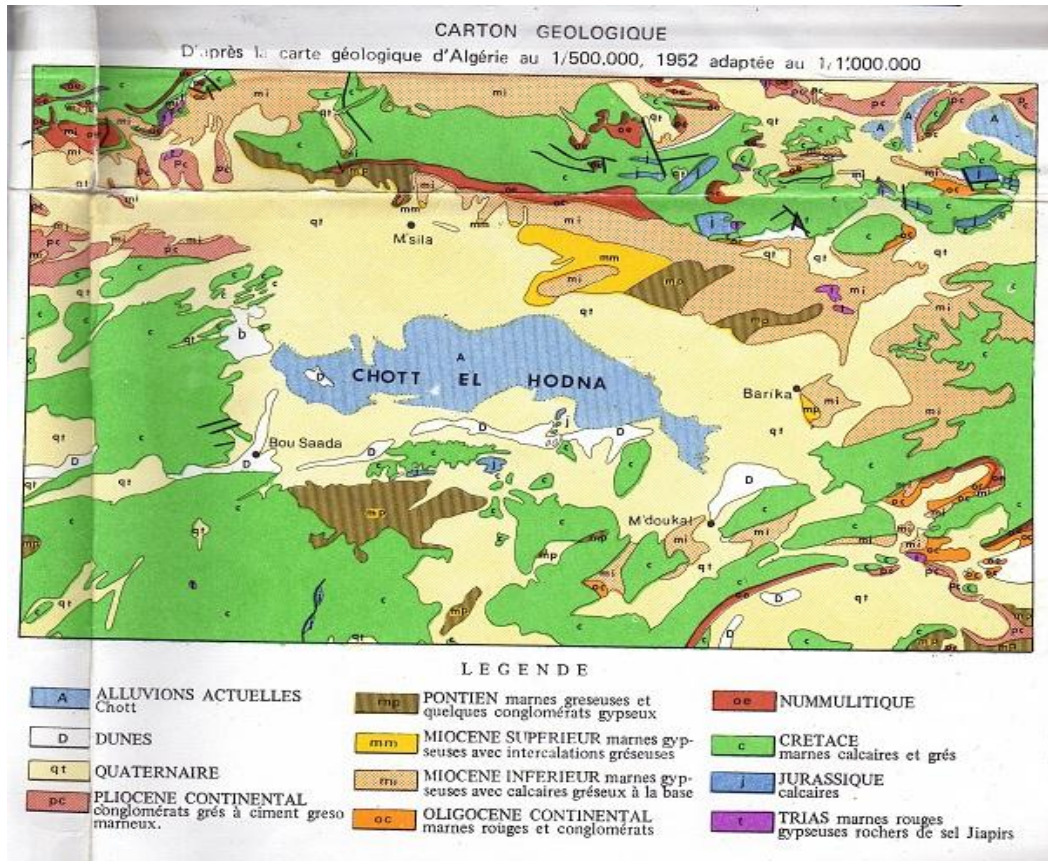


Fig.2.2 : Géologie de la région du Hodna, D'après Le Houerou et Claudin, 1972.

<http://www.blog.saeed.com/2011/03/situation-geographique-criteres-de-ramsar-et-cadre-biotique/>

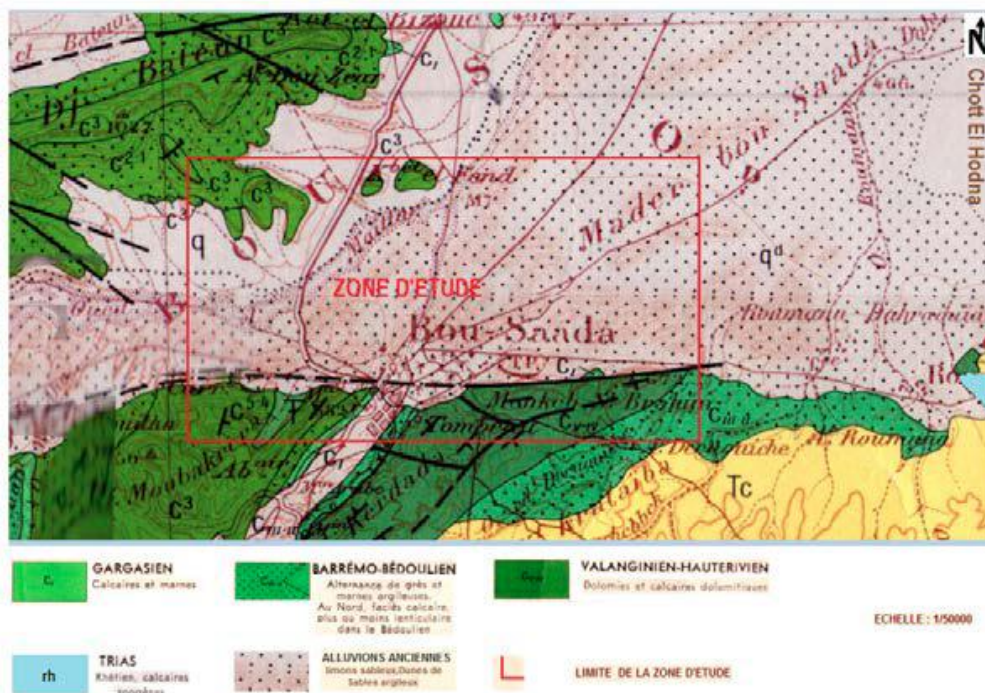


Fig. 2.3 : Extrait de la carte géologique du Bou-saâda.(Helali N, 2016).

1.2.1. Éléments de Stratigraphie

Les formations, post-triasiques, du bassin sont décrites dans l'ordre stratigraphique :

- **Alluvions anciennes et récentes :**

Des limons souvent très riches en matière sableuse, atteignant parfois une épaisseur supérieure à 10 cm.

- **Dunes :**

Localisées dans la cuvette des oueds TAMSA et MAITER, des sables souvent chargés en matière argileuse, ils proviennent de l'érosion de grès.

- **Tertiaire continental :**

Ces formations sont localisées au Sud de Boussaâda, elles sont constituées par des dépôts d'argile rouge et de sables. L'épaisseur de ces formations est très variable de 50 à 250 m.

- **Aptien supérieur :**

À une épaisseur de 200 m environ, Turonien : caractérisé par des calcaires et des marnes à intercalations calcaires.

- **Cénomaniens :**

Ces formations situées au Sud de Bou-saâda, elles sont à prédominance carbonatée, dans lesquelles les horizons gypseux sont réduits.

- **Barrémo-Bédoulien :**

Dans la région de Bou-Saada, le Barrémien est représenté par une épaisse série de grès tendres continentaux à stratification entrecroisée et d'argiles vertes ou lie de vin silteuses, avec des intercalations de bancs calcaires et dolomitiques rattachées à l'Aptien inférieur ou Bédoulien. C'est l'ensemble Barrémo-Bédoulien. Au NE du bassin, le Barrémien et l'Aptien inf. forment une épaisse série de calcaires, dolomies, marnes et grès.

- **Albien**

Dans la région de Bou-Saada : série de grès tendres à stratification entrecroisée, sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, avec intercalations d'argiles vertes silteuses et sableuses, faciès annonçant le « Continental Intercalaire » saharien, parfois surmontées par une série carbonatée alternant avec des formations

détritiques. Dans les Monts du Hodna, l'Albien est très réduit (calcaires et marnes) ou absent.

• **Cénomanién**

Sur environ 500 m on trouve : une série argileuse, puis une série de gypses et de calcaires. Au sommet, la puissante formation calcaro-dolomitique aquifère est parfois attribuée au Turonien.

• **Turonien**

Dans la région de Bou-saâda, ce sont des Calcaires bitumineux en plaquettes, marnes, et dolomies sur environ 100m. Au forage de M'doukal, les dolomies sont aquifères. Au Dj Metlili la série fait 400m d'épaisseur.

• **Sénonien Inférieur**

Série argileuse et marneuse de 100m , surmontée dans la région de Bou-Saada par d'épais calcaires et marnes. Les marnes ont 600m d'épaisseur au Dj Metlili

• **Tertiaire indéterminé**

Dans la région de Bou-Saada, le Tertiaire est formé uniquement de dépôts continentaux : argiles rouges et conglomérats d'âge indéterminé

• **Quaternaire**

Alluvions récentes et formations dunaires ; limons sableux et niveaux grossiers à galets en périphérie des formations pontiennes. (Helali N, 2016)

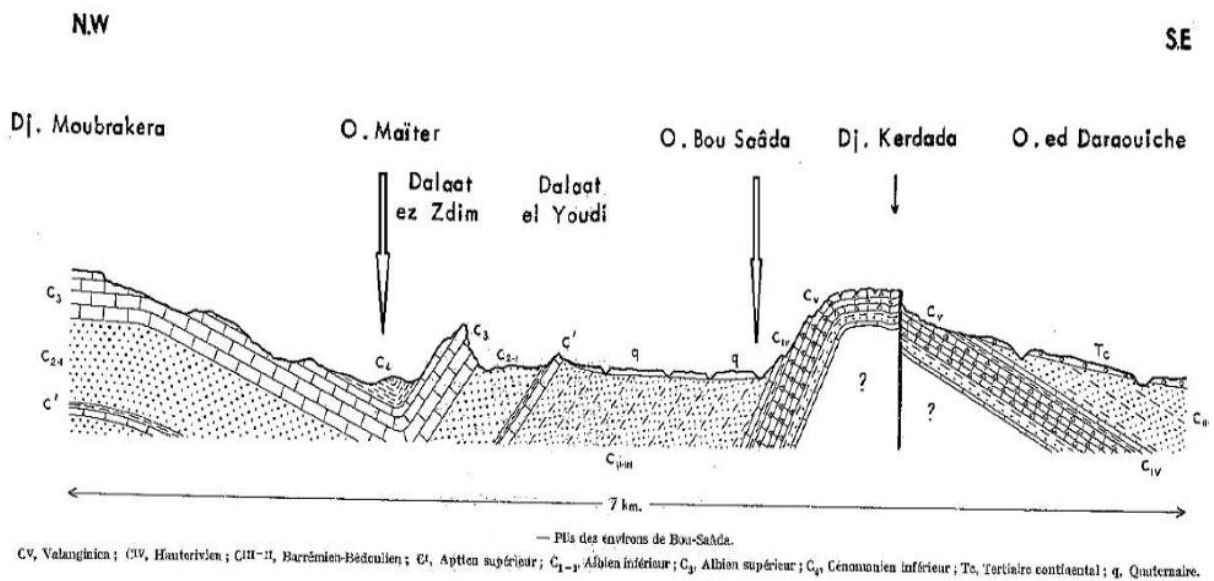


Fig. 2.4 : Coupe géologique de la zone de Bou-saâda. (Narcisse M, 2017)

1.3. Aperçu hydrogéologique

Les principaux aquifères de ce secteur sont les formations conglomératiques et sableuses du Miopliocène continental, qui communiquent avec et drainent l'ensemble des formations perméables crétacées encaissantes, dont la plus importante est l'Albien. Ce dernier possède un vaste impluvium qui s'étend à l'Ouest, où il affleure à des altitudes plus élevées où s'effectue la recharge de l'aquifère. L'Albien renferme une nappe qui s'écoule dans les formations tertiaires mais également en profondeur vers le Chott, pour alimenter des sources artésiennes, dont l'Ain Zira (20L/s) au NE de Beniane, située dans un îlot de grès Albien. Les eaux de l'Albien s'écoulent aussi au pied de falaises par des sources de débordement, telles l'Ain Koucha et l'Ain Diss. (Helali N, 2016).

2. CONSTRUCTION EN TERRE A BOU-SAADA

2.1. Aperçu historique

Le site de Bou-saâda fut habité dès les temps préhistoriques (**Photos: 2.1, 2.2, 2.3, 2.4**). On a découvert, en effet, à 4 ou 5 km au sud de la ville, de nombreux vestiges qui attestent la vie au bord de l'oued Boussaâda dès l'ibéromaurusien, c'est-à-dire il y a quelque huit à dix mille ans. (Youssef N, 2013).



Photo.2.1: figurations représentaient le gros gibier chassé par les occupants préhistoriques de la région de Bou-saâda. (Youssef N, 2013).

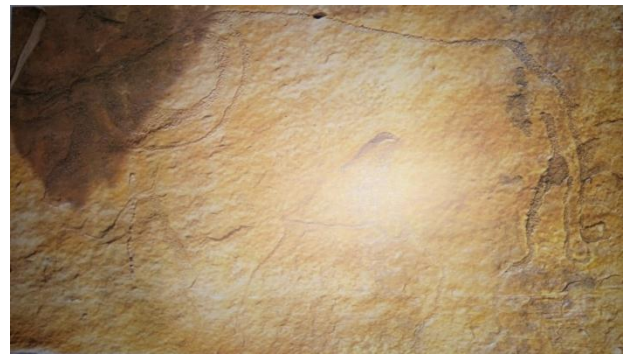


Photo.2.2. Dessins pariétaux du selat. Gravure représentant un bison. (Youssef N, 2013).

Rome était intéressée surtout par trois avantages que lui procurait l'occupation de l'Afrique du nord. La position stratégique des voies d'accès et des postes d'observation qui lui permettaient de maintenir sa domination sur la

méditerranée méridionale en disposant par la même occasion de route déterminantes pour le maintien de la puissance impériale (**Photos: 2.3 et 2.4**). (Youssef N, 2013).



Photo.2.3: Vestiges romains dans l'aire de Bou-saâda pierre gravée retrouvée au sud-est de l'oasis dans la région de boumellal. Le terme (vixit) peut laisser croire que ce vestige appartenait à un monument consacrant une victoire. (Youssef N, 2013).

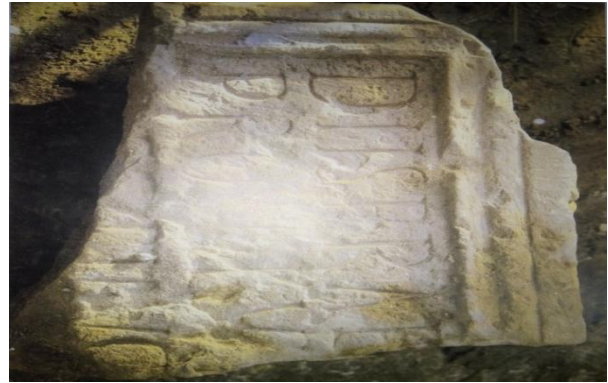


Photo.2.4: Vestiges de l'occupation romaine : pierre gravée marquant vraisemblablement une victoire. (Youssef N, 2013).



Photo.2.5: Vestiges de construction sensiblement contemporaines de la fondation de Bou-saâda soit fin 15 et début 16 siècle.(Youssef N, 2013).

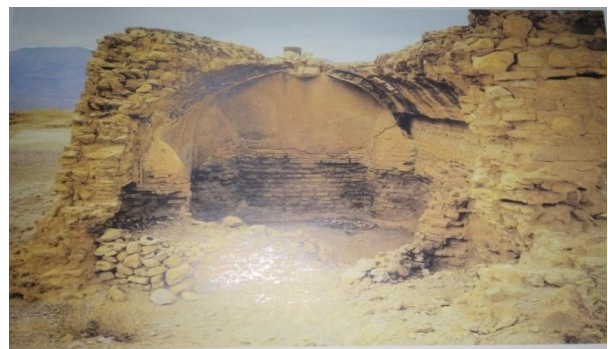


Photo.2.6: vestiges de construction sur la plateforme du Selat. Abris de protection contre les invasions.(Youssef N, 2013).

2.2. La nature architecturale de la ville

Reconnue pour son succès en tant que reste des villes algériennes historiques dans l'architecture islamique, où mosquées et bâtiments ont connu une croissance remarquable (**Photo.2.7**). L'importance de l'esprit islamique et le style

architectural luxueux de mosquées telles que Busa, construit par le monde Cheikh Sidi Thamer. (Youssef N, 2013).

Les bâtisseurs bosniaques ont utilisé des outils naturels, tels que des palmiers et des arches, pour la construction de mosquées, qui constituent le modèle idéal pour l'architecture et la construction islamiques, avec ses beaux arts, ses décorations et ses motifs, sans oublier les sciences et les arts cognitifs qui l'ont caractérisée tout au long de son histoire glorieuse. C'est un monument religieux, culturel et intellectuel qui éclaire la région de ses érudits et de ses hommes.



Photo.2.7: Djamaa-en-nekla (Exemple de l'architecture islamique). (Photo : SAADAoui Benaceur OUAHAB Yamina)

Le monastère de Hamel est toujours dans le labyrinthe du temps et se consacre à l'enseignement continu des principes coraniques depuis sa création à l'époque du prince Abdul Qadir al-Jazairi et le dôme qui représente la tombe du fondateur. (Youssef N, 2013).



Photo.2.8: Aperçu général de la mosquée-mausolée de la zaouïa d'el-Hamel. (Photo : SAADAoui Benaceur OUAHAB Yamina).



Photo.2.9: Plafond de la mosquée de la zaouïa. On devine la hauteur du dôme central de la mosquée. (Youssef N, 2013).

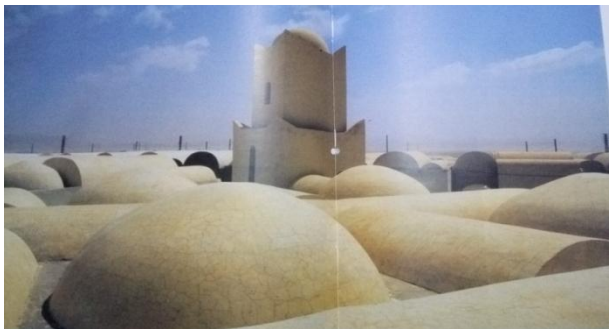


Photo.2.10: toits en coupoles a Bou-saâda évoquant la ville d'el-oued. (Youssef N, 2013).



Photo.2.11: Hôtel transatlantique de Bou-saâda. On remarquera le style néo-mauresque du bâtiment adapté au milieu écologique oasien (Youssef N, 2013).

3. DESCRIPTION ARCHITECTURALE ET STRUCTURALE D'UNE MAISON EN BRIQUE EN TERRE

Lors de nos sorties, notre outil d'approche s'est basé sur l'observation in situ où les prises photographiques étaient indispensables ainsi que les témoignages des personnes âgées qui nous ont apporté des informations précieuses concernant les méthodes de constructions, le matériel et les matériaux utilisés. Ces sorties nous ont permis également de faire un connaissance sur les constructions en terre traditionnelles dans la zone de Bou-saâda.

3.1. Description architecturale (architecture de brique de terre)

Boussaâda est réputé pour ses richesses architecturales, nombreux sont ses sites classés au patrimoine de l'humanité par l'UNESCO. L'architecture Bousaadiene est très variée, elle a évolué au cours des siècles en fonction de facteurs historiques, géographiques et sociologiques. Elle s'est développée et enrichie lors des différentes conquêtes et invasions qu'a connues la région.

De nombreuses influences extérieures telles que l'architecture musulmane et celle des pays alentours ainsi que plus récemment l'architecture coloniale ont participé à la création des différents types architecturaux que l'on trouve dans le pays.

La terre crue a toujours été l'un des matériaux les plus utilisés dans les constructions (**Photo.2.12**), les savoirs faire des maçons se sont transmis de génération en génération.

Les anciens bâtiments de Bou-saâda, ou même les nouvelles maisons construites dans les dernières années en brique de terre, présentent un avantage particulier dans la fabrication des briques et leur mode d'utilisation, ce qui leur permet de conserver leur forme et leur durabilité malgré le long délai (voir photo). (Corpus, 2015).



Photo.2.12: Une extrémité de la médina de Boussaâda. On observera que l'architecture traditionnelle de ksar utilise largement le (Toub) (Photo : SAADAoui Benaceur OUAHAB Yamina)

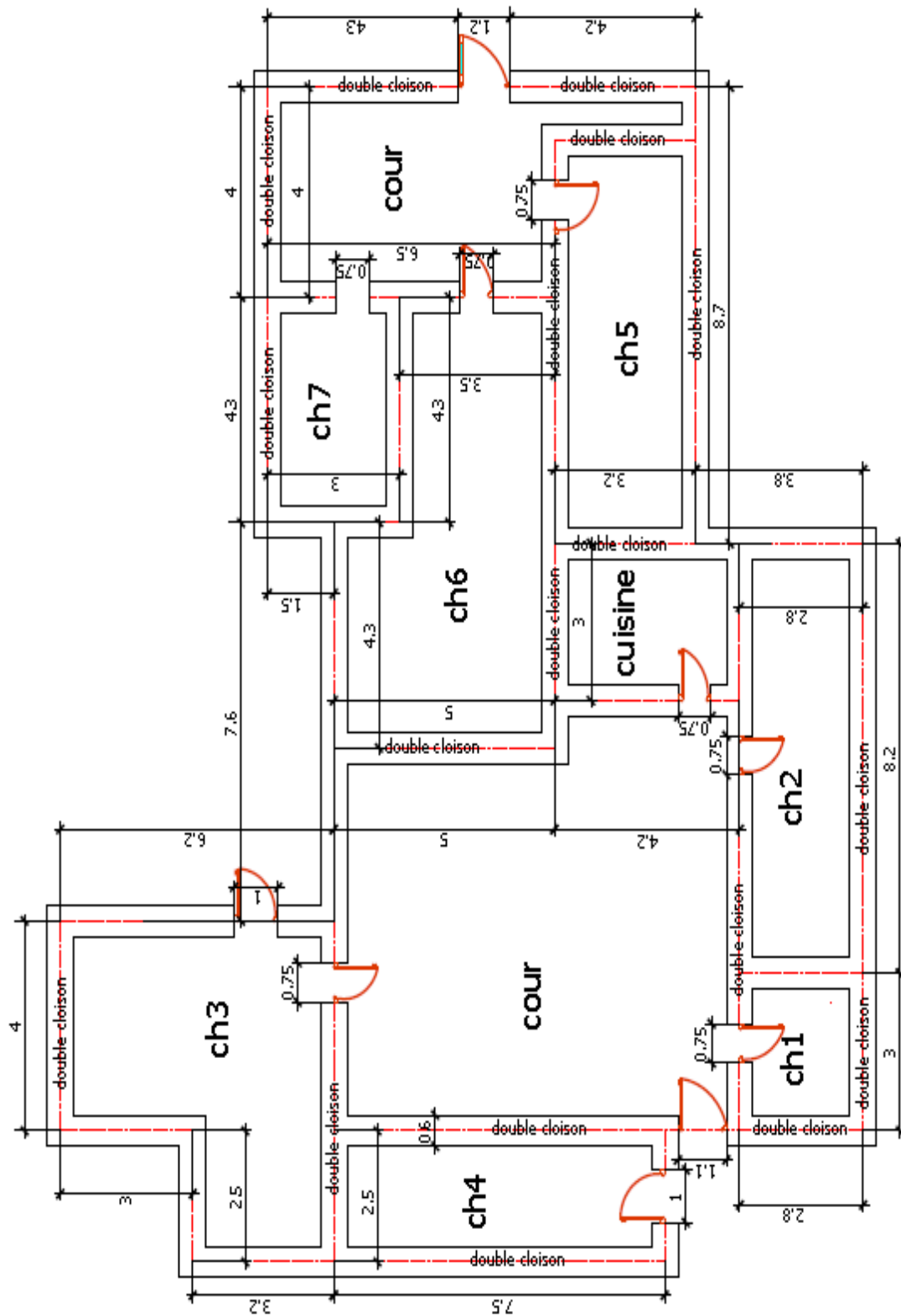


Fig.2.5 : Plan RDC d'une maison en brique de terre (Dessin Autocad SAADAoui Benaceur, OUAHAB Yamina).

3.2. Description structurale (Méthode de construction)

3.2.1. La technique de l'adobe (matériau utilisé et étapes de fabrication)

La technique de l'adobe consiste à mouler sans compactage des briques avec de la terre argileuse, qu'on laisse sécher au soleil. Le terme « Adobe » vient de l'égyptien « Thobe » signifiant brique. (Doat P, 1979).

C'est le matériau le plus utilisé dans la construction traditionnelle a Bou-saâda. Cette brique peut être de différentes formes et dimensions. On peut utiliser des moules en bois ou en acier pour la confectionner. La terre appropriée à la fabrication de l'adobe doit être le plus près possible du lieu de la construction et à proximité d'un point d'eau. Il faut un sol constitué de 55 à 75 % de sable, 10 à 28 % de limon et 15 à 18 % d'argile pour obtenir le meilleur résultat (Doat P, 1979). Avec les briques d'adobe on peut réaliser différentes parties d'un ouvrage. On peut construire les murs extérieurs et intérieurs et aussi la couverture si on choisit de faire une toiture voutée. Selon l'emploi de la brique elle variera de dimension et de composition. Par exemple, les briques utilisées pour les voûtes sont plus petites et stabilisées à la paille pour être plus légères. Ces briques ont l'inconvénient d'être peu solides mais on peut toutefois faire des édifices à un étage. Elles s'érodent facilement au contact de l'eau, il faut donc les recouvrir d'un enduit qu'il faut entretenir régulièrement et refaire au bout de plusieurs années. Elles ont l'avantage d'être très économiques car leur fabrication se fait près du site de construction. Il n'y a donc généralement pas ou peu de frais de transport. Seule la paille a une valeur monétaire ainsi que la main d'œuvre qui n'a pas besoin d'être qualifiée.

Les différentes étapes nécessaires pour la fabrication des briques sont les suivantes :

1. Il faut enlever les pierres de la terre.
2. Il faut hydrater la terre. Cette étape appelée « pourrissage » permet de saturer d'eau les particules d'argile ce qui améliore la qualité des briques et diminue les fissures de retrait. La quantité d'eau nécessaire est importante, elle représente 1/3 du mélange. Souvent dans les villages la

terre est directement extraite de sites boueux ou marécageux, il n'y a donc pas besoin de l'hydrater d'avantage.

3. Le but étant d'obtenir un mélange homogène, il faut malaxer l'ensemble.
4. Pour stabiliser la matière on ajoute un mélange de fibres végétales ou animales, généralement de la paille.
5. L'ensemble doit macérer assez longtemps pour que les matériaux non fibreux se décomposent. Cette étape n'est pas toujours nécessaire, cela dépend de la composition de la terre ainsi que de l'usage fait des briques. Les murs protégés de la pluie à l'intérieur ou enduits n'ont pas besoin d'être stabilisés.
6. Pour donner le gabarit et la forme aux briques on peut utiliser des moules en bois ou en métal.
7. Après le démoulage, il faut faire sécher les briques trois semaines sur une aire de stockage couverte de sable et les retourner régulièrement. L'idéal est de les laisser sécher individuellement à l'ombre les deux premiers jours, période de retrait de la brique.
8. Bien que moins pérenne que d'autres matériaux à base de terre, l'adobe me semble avoir un potentiel intéressant. C'est le matériau le mieux maîtrisé par les maçons avec le bloc de parpaing. De plus, à l'heure actuelle, elle constitue l'unique matériau viable économiquement en milieu rural. Sa pérennité peut être nettement améliorée avec l'utilisation d'enduits appropriés. (Doat P, 1979).

3.2.2. Fondations

Les constructions en terre crue en murs massifs à éléments (briques d'adobe, blocs comprimés) ou monolithiques (bauge, pisé) sont assimilables à de la maçonnerie classique. Ce sont des ouvrages lourds qui sont bâtis sur des fondations superficielles (semelles) ou semi-profondes (longrines, puits) dont la conception répond aux règles de calcul connues. Les systèmes de fondations classiques ainsi que les matériaux qui les composent conviennent assez bien.

Il est utilisé dans les fondations de roche où le mur est placé directement (**Fig.2.6**) (**Photo.2.13**).

Les fondations doivent être suffisamment profondes pour :

- être construites sur le bon sol. Faire particulièrement attention aux sols expansifs ou à fort tassement ;
- être protégées de l'eau de surface et de l'humidité ;
- être mises hors gel ;
- être protégées de l'érosion éolienne qui peut affouiller les fondations (dans le cas de fortes tempêtes) ;
- être protégées de travaux dans leur voisinage (voirie, jardinage, agriculture) ;
- être protégées des rongeurs et insectes (termites). (Doat P, 1979).



Photo.2.13 : La photo de gauche est un mur séparant les vergers et à droite un immeuble résidentiel et impasse recouverte ouvrant sur une ruelle (Photo : SAADAOUI Benaceur OUAHAB Yamina)

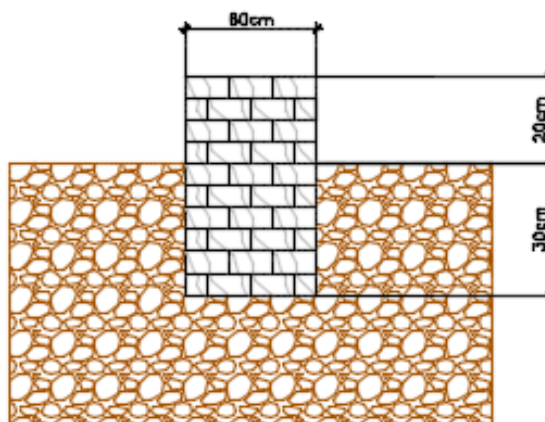


Fig.2.6 : Semelle (Dessin Autocad: SAADAOUI Benaceur OUAHAB Yamina).

3.2.3. Planchers

La plupart des bâtiments de Bou-saâda sont recouverts de bois (**Fig.2.7**) (**Photo.2.14**)



Photo.2.14: bâtiments à Bou-saâda recouverts de bois (Photo :SAADAOUI Benaceur OUAHAB Yamina _ el-Hamel_ Bou-saâda).

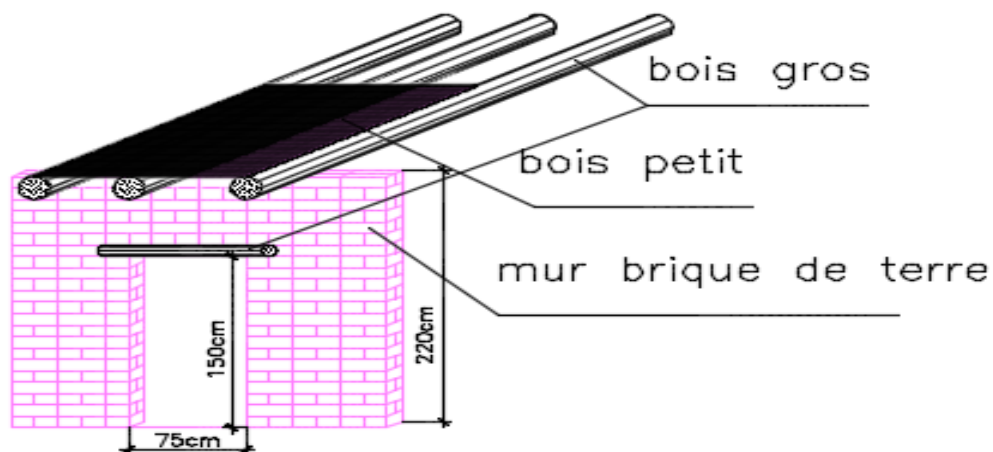


Fig.2.7 : Schéma présentant comment les poutres en bois sont placés (Dessin Autocad: SAADAOUI Benaceur OUAHAB Yamina).

Il existe généralement deux systèmes de remplissage connus dans la zone de Boussaâda. Ces systèmes sont souvent employés pour améliorer l'isolation acoustique:

- **Terre en vrac :** de nombreux planchers à poutres et parquets en bois, avec sous-face en planches ou cannisses de roseaux, sont bourrés ou remplis de terre en vrac. La terre employée doit être parfaitement sèche.

- **Panneaux préfabriqués** : ils sont le plus souvent réalisés en torchis ou en terre-paille et servent à remplir la sous-face du plancher sans participer à la portance du plancher. De ce fait, la trame des poutres peut être assez large (80 à 90 cm) et les éléments peuvent être préfabriqués en courte ou grande longueur : 0,40 à 1,20 m, pour une épaisseur de 15 cm et pesant de 35kg à 120kg par élément. La forme en entrevous permet d'alléger le plancher.

3.2.4. Murs

Moyennement de 30 à 60cm, le principe d'édification consiste à poser des briques côte à côte, en variant leur disposition d'une rangée à une autre. Notez également la taille des grosses briques due à la présence de granulats (**Photo.2.15**)(**Fig.2.8**).



Photo.2.15: Mur d'un parc dans la ville de Bou-saâda (Photo : SAADAOUI Benaceur OUAHAB Yamina).

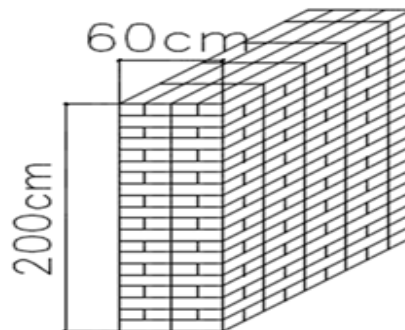


Fig.2.8 : Dimensions d'un mur en brique de terre double cloison (dessin Autocad : SAADAOU Benaceur OUAHAB Yamina).

L'expérience des bâtisseurs a établi un rapport d'épaisseur minimale des murs égal au 1/10 de la hauteur du bâtiment, pour les murs en brique de terre. On admet aussi une épaisseur minimale de 30 cm pour des murs en pisé d'une maison de plain-pied et de 45 cm avec un étage. De même, on ne doit pas dépasser une distance maximale de 5 à 6 m entre murs de refends ou renforts ou entre joints de dilatation (joints secs prévus par avance et intégrés aux ouvertures ou résolument séparés des ouvertures).

La dimension des murs est aussi fonction de chaque technique de construction et des contraintes propres du projet : charges propres et d'occupation, contraintes thermiques. (Doat P, 1979).

Chapitre 3

Chapitre 3

Etude des caractéristiques physiques et d'identification

1. INTRODUCTION

La reconnaissance, géomorphologique, géologique et hydrogéologique, permet de localiser les "matériaux appropriés" pour la construction en terre.

La reconnaissance géotechnique est une étude qui permet d'abord l'identification des sols par des dénominations et la détermination des caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques, dans le but de savoir leur comportement, leur degré de stabilité ou pour les utiliser comme des matériaux de construction. (Jean-Louis D, 1996).

Cette étude était destinée à être une étude initiale de brique en terre typiques de Boussaâda, et non une étude approfondie de la conception de brique en terre.

Cette étude expérimentale à pour objectif d'étudier plusieurs propriétés géotechnique de briques en terre (anciennes et nouveaux) de Bou-saâda. Celle-ci comprenait les propriétés des matériaux constitutifs (granulométrie, plasticité, ...) et des mélanges (poids unitaire, teneur en eau, résistance...).

Comme de nombreux bâtiments en brique de terre ont déjà été construits dans la zone d'étude, il a été jugé important d'établir de manière rétroactive la solidité structurelle de ces bâtiments et définir des valeurs de base pour la conception future en brique de terre.

2. TESTS D'IDENTIFICATION DE TERRAIN ET DE LABORATOIRE

2.1. Test d'identification de terrain

Les deux premiers essais sont l'examen visuel et l'essai au toucher. Ils permettent d'identifier la granulométrie du sol en examinant à l'œil nu et au toucher la terre susceptible d'être employée.

2.1.1. Examen visuel

L'examen visuel permet d'identifier les graviers et les gros sables tandis que tous les grains d'un diamètre inférieur à 0,08mm seront associés à la fraction fine et seront identifiés au toucher. En effet, la limite de visibilité à l'œil nu correspond à cette dimension. (Horsch B, 2014) (Guillaud, H, 1995).

2.1.2. Essai au toucher

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

2.2. Tests d'identification de laboratoire

Les essais de laboratoires se divisent en quatre grandes catégories :

- **Les essais de mesures des caractéristiques physiques :**
 - Teneur en eau.
 - Poids volumique humide.
 - Poids volumique sec.
 - Poids volumique des particules solides.
 - Teneur en fibres végétales
- **Les essais d'identification :**
 - Analyse granulométrique par tamisage.

- Analyse granulométrique par Laser
- Limite d'Atterberg (liquidité, plasticité).
- **Les essais mécaniques :**
 - L'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande.
 - L'essai de compression simple (uniaxiale). (Khadija B, 2011).
- **Les essais thermique :**
 - Mesure en laboratoire de la conductivité thermique

3. LES ESSAIS DE MESURES DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

3.1. Teneur en eau naturelle

C'est le rapport entre le poids d'eau et le poids de la partie solide pour un volume de sol donné, ce paramètre permet de quantifier l'eau dans un sol, elle est notée (ω) sachant que: $\omega = [W_w/W_s]*100$ et $W_w = W_h - W_s$.

Selon la norme **NFP 94-050**, une masse (M) de matériau est placée dans une coupelle ou un bac propre et sec de masse connue (M_1). La prise d'essai et son contenant sont pesés immédiatement ($M_2 = M + M_1$). Puis, ils sont introduits dans l'étuve à 105°C.

Deux pesées, séparées par un étuvage d'un intervalle de temps t , sont effectuées sur la prise d'essai après chacun des passages à l'étuve, ou m_3 est la masse du matériau plus le bac après passage à l'étuve.



Photo.3.1: Étuve de séchage à 105°C

L'intervalle t est au minimum de 4 h dans le cas d'un étuvage à 105 °C.

La teneur en eau est déterminée par la formule suivante : $w = Mw /Md$

$$\text{Avec : } Mw = M_2 - M_1 \text{ et } Md = M_3 - M_1 \text{ [30]}$$

3.2. Poids volumiques humide

Selon la norme **NF P 94-053**, il faut déterminer la masse m et le volume total V de l'échantillon.

Pour déterminer ce dernier on utilise la Méthode par immersion dans l'eau : Un échantillon de forme simple, de masse compris entre 0,1 et 0,5 kg est pesé (m)

puis recouvert d'une couche de paraffine ($\rho_{\text{paraffine}} = 0,9 \text{ g/cm}^3$). Une deuxième pesée (m_p) permet de déterminer la masse de la couche de paraffine et de calculer son volume. Une troisième pesée, hydrostatique, de l'échantillon recouvert de paraffine (m'_p) permet de calculer le volume de l'échantillon recouvert de paraffine. Le volume de paraffine étant connu, on en déduit le volume V de l'échantillon :

$$V = V_{\text{sol+paraffine}} - V_{\text{paraffine}} = [(m_p - m'_p)/\rho_w] - [(m_p - m)/\rho_p]$$

L'échantillon de sol n'est pas remanié, il est à l'état naturel.

3.3. Poids volumique sec

Selon la norme **NF P 94-053**, un échantillon à l'état naturel, de forme simple, de masse compris entre 0,1 et 0,5 kg est pesé (m_s), après passage à l'étuve, puis recouvert d'une couche de paraffine ($\rho_{\text{paraffine}} = 0,9 \text{ g/cm}^3$). Une deuxième pesée (m_p) permet de déterminer la masse de la couche de paraffine et de calculer son volume. Une troisième pesée, hydrostatique, de l'échantillon recouvert de paraffine (m'_p) permet de calculer le volume de l'échantillon recouvert de paraffine. Le volume de paraffine étant connu, on en déduit le volume V de l'échantillon :

$$V = V_{\text{sol+paraffine}} - V_{\text{paraffine}} = [(m_p - m'_p)/\rho_w] - [(m_p - m_s)/\rho_p]$$

3.4. Poids volumique des particules solides :

Le problème est de mesurer le volume des grains solides, V_r , constituant l'échantillon de sol. Cette mesure est effectuée généralement par la méthode de l'éprouvette graduée (Fig. 3.1) (MAZA M., 2016). Cette méthode est très simple et très rapide.

Toutefois sa précision est faible.

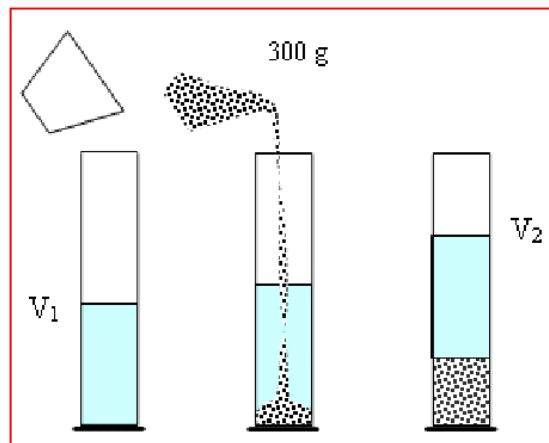


Fig.3.1: Méthode de l'éprouvette graduée

Selon cette méthode une masse connue M_s de sol séché (par passage à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante) est introduite dans une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau. Après s'être assuré qu'aucune bulle d'air n'est piégée entre

les particules solides, on détermine avec un très grand soin le volume d'eau déplacée par les particules solides V_2 .

La masse volumique absolue (par l'éprouvette graduée) est : $\rho_s = M_s/(V_2 - V_1)$

Alors: $\gamma_s = \rho_s \cdot g$. (Maza M., 2016).

3.5. Porosité et indice des vides

La porosité, notée n , permet de connaître l'importance des vides c'est à dire de savoir si le sol est dans un état lâche ou serré. La porosité est définie par la relation suivante:

$$n = 1 - (\gamma_d / \gamma_s)$$

La porosité est toujours inférieure à 1. Elle peut aussi être exprimée en pour-cent. L'indice des vides, noté e , dont la signification est analogue à celle de la porosité, est défini par la relation:

$$e = n / (1 - n)$$

3.6. Teneur en fibres végétales

On désigne par teneur en fibres végétales la quantité de fibres végétales contenue dans un échantillon de matière, par exemple un échantillon de sol, de roche ou de céramique, la quantité étant évaluée par un rapport pondéral (poids) ou volumétrique.



Photo.3.2 : Brique de terre ancien



Photo.3.3 : Séparation des fibres

Cette séparation devra se faire, en agitant le sol dans l'eau. Le sable grossier se séparera généralement alors dans une minute, et le plus fin en deux ou trois minutes, tandis, que les parties terreuses, très-tenuës, la matière animale ou végétale, resterons pendant beaucoup plus longtemps en état de suspension mécanique; de sorte, qu'en décantant l'eau avec précaution, au bout d'une, de

deux ou trois minutes, le sable sera principalement séparé des autres substances; l'eau, qui les tient en suspension, étant mise sur un filtre, elles s'y trouveront déposées, après que l'eau l'aura traversé; on pourra alors rassembler ces substances, les sécher, et les peser; le sable sera également pesé, et il sera pris note du poids des quantités respectives.

L'eau qui a filtré doit être conservé, parce qu'elle se trouvera contenir la matière saline, et les matières animales et végétales solubles, s'il en existe dans le sol. (Accum, 1819).

4. LES ESSAIS D'IDENTIFICATION

4.1. Analyse granulométrique par tamisage

Elle s'effectue pour les grains d'un diamètre supérieur à 80 μm .

Selon la norme **NFP 94-056**, L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

La masse de l'échantillon m (kg) est choisie entre 0.2 et 0.6 fois la taille du plus gros élément D (mm). **$0.2D < m < 0.6D$** . On pèse le refus (matériaux qui restent sur le tamis) et le passant passe **Courbe granulométrique**).

Deux paramètres sont utilisés pour caractériser l'allure de la courbe granulométrique d'un matériau : C_c et C_u .

4.2. Analyse granulométrique par Laser

La granulométrie laser est une technique créée dans les années 1970. De façon générale la granulométrie permet la mesure de la taille des particules, ou plus exactement de leurs rayons. La granulométrie laser, permet la mesure de tailles comprises entre 0,05 et 900 μm , ce qui est bien plus précis qu'avec la technique par tamis. Elle convient donc particulièrement aux suspensions de polymères, à tout type de poudre (minérale ou non).

Principe: La granulométrie laser est une technique basée sur la diffraction de la lumière. D'après la théorie de Fraunhofer:

- On considère des particules sphériques non poreuses et opaques

- Ces particules ont un diamètre supérieur à la longueur d'onde
- Les particules sont suffisamment éloignées les unes des autres
- Les particules sont animées d'un mouvement aléatoire
- Les particules diffractent la lumière avec la même efficacité quelle que soit leur taille

Lorsqu'un faisceau laser éclaire une particule, on peut observer des franges de diffraction. Selon Fraunhofer, l'intensité du rayonnement diffracté et l'angle de diffraction sont fonction de la taille des particules. Plus la particule est petite, plus l'angle de diffraction est grand.

La théorie de Mie complète et remplace la théorie de Fraunhofer pour les particules inférieures à 10 μm .

La **norme ISO 13320**, précise la théorie et les bonnes conditions d'utilisation des granulomètres laser.

Mise en œuvre: Il faut tout d'abord disperser l'échantillon. En général on utilise de l'eau comme dispersant mais l'eau comme tout autre dispersant provoque un phénomène de diffraction que l'on peut considérer comme un bruit de fond. Il faut donc dans une première étape mesurer ce bruit seul pour comparer par la suite les différences de diffraction. Les mesures sont très rapides, il faut quelques secondes pour lire 2000 à 4000 fois la lumière diffusée par des milliers de particules présentes en même temps dans le faisceau laser.

Il est également possible de faire des mesures en voie sèche, une plus grande quantité de particules est mesurée. La mesure en continu et en ligne donne une réponse instantanée. (https://fr.wikipedia.org/wiki/Granulom%C3%A9trie_laser).

4.3. Limites d'Atterberg

Sont des teneurs en eau pondérables correspondant à des états particuliers d'un sol. Selon la norme **NFP 94-051**, ces limites sont mesurées avec un appareillage normalisé, sur le mortier, c'est -à- dire la fraction de sol qui passe au tamis de 400 μm , il est défini trois limites :

- ✚ La limite de liquidité W_L : qui sépare l'état liquide de l'état plastique.
- ✚ La limite de plasticité W_P : qui sépare l'état plastique de l'état solide.
- ✚ La limite de retrait W_S : qui sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait.

- La différence entre les limites de liquidité et de plasticité définit l'indice de plasticité I_p , cet indice définit l'étendue du domaine plastique.
- L'indice de consistance c'est le rapport défini par la formule suivante :

$$I_c = (\omega_L - \omega) / I_p.$$

- Pour déterminer la limite de liquidité on étend sur une coupelle une couche du matériau dans lequel on trace un rainure au moyen d'un instrument en forme de V, on imprime à la coupelle des chocs semblables , en comptant le nombre de chocs nécessaire pour fermer la rainure sur 1cm , on mesure alors la teneur en eau de la pâte avec la courbe représentative de la relation entre $\log n$ et W qui représente une droite et on peut déterminer la limite de liquidité qui est la teneur en eau qui correspond à une fermeture en 25 chocs si $15 < n < 35$

$$\omega_L = \omega \left(\frac{n}{25} \right)^{0,121}$$

- Pour déterminer la limite de plasticité on forme une boulette à partir de la pâte préparée, puis on roule la boulette sur une plaque lisse, à la main de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre et 10 cm de longueur, la limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre lorsqu'il se fissure. **(NFP 94-051)**.



Photo.3.4: Table vibrante (Voie sèche)



Photo.3.5: l'appareil de Casagrande

5. RESULTATS ET COMMENTAIRES

5.1. Les essais de mesures des caractéristiques physiques

5.1.1. Teneur en eau

Soit : M_h : La masse de l'échantillon humide (naturelle)

M_s : La masse de l'échantillon sec (après étuvage à 105°C)

ω = teneur en eau (%) avec : $\omega(\%) = [(M_h - M_s) / M_s] \times 100$

Les résultats de cette essai sont donnés dans le tableau suivant (Tab.3.1):

Tab.3.1: Résultats d'essai de mesure de la teneur en eau .

Essai	Ancien adobe			Nouveau adobe		
	1	2	3	1	2	3
M_h (g)	133.7	513.8	210.6	59,16	63,87	50
M_s (g)	130.5	502	205	57,744	62,062	48,632
M_w	3.2	11.8	5.6	1,416	1,808	1,368
$\omega(\%)$	2,45	2,35	2,73	2,45	2,91	2,81
ω_{moy} (%)	2,51			2,72		

5.1.2. Teneur en fibres végétales

Soit : M_t : La masse totale de l'échantillon

M_h : La masse échantillon humide sans fibres végétales

M_s : La masse échantillon sec sans fibres végétales

M_f : La masse de fibres végétales (après séchage)

T_f (%) : Tenure en fibres végétales = $(M_f/M_t) \times 100$

Les résultats de cet essai sont donnés dans le tableau suivant (Tab.3.2):

Tab.3.2: Résultats d'essai de mesure de la teneur en fibres végétales (ancien adobe).

Essais	1	2	3
M_t (Kg)	1.733	2.176	2.069
M_f (g)	7.3	6	6.5
M_h (Kg)	1.719	2.092	2.189
M_{sec} (Kg)	1.278	1.518	1.581
T_f (%)	0.4212	0.2757	0.3142
$T_{f moy}$ (%)	0.337		

La teneur en fibre végétale pour les nouveaux briques de terre est de même pourcentage que l'ancienne.

5.1.3. Poids volumique humide

Soit : M_1 : La masse de l'échantillon humide (naturelle)

M_2 : La masse de l'échantillon humide + paraffine

M_3 : La masse du paraffine ($M_3 = M_2 - M_1$)

V_1 : Volume de l'eau avant la mise de l'échantillon

V_2 : Volume de l'échantillon + paraffine

V_3 : Volume du paraffine : $\rho = M_3 / V_3 \Rightarrow V_3 = M_3 / \rho$

V_4 : Volume de l'échantillon : $V_4 = V_2 - V_3$

ρ_h : Masse volumique sec : $\rho_h = M_1 / V_4$

γ_h : Poids volumique sec : $\gamma_h = M_1 * 9.81 / V_4$



Photo.3.6. Echantillon humide + paraffine



Photo.3.7. Détermination de volume de l'échantillon + paraffine

Les résultats de cet essai sont donnés dans le tableau suivant :

Tab.3.3: Résultats d'essai de mesure de poids volumique humide.

Essais	Unité	Ancien adobe			Nouveau adobe		
		1	2	3	1	2	3
M_1	g	53,562	34,700	36,289	22,8	30,9	22,5
M_2	g	63,728	42,631	42,343	24,998	33,8	26,45
M_3	g	10,166	7,931	6,054	5,597	6,05	7,26
V_1	ml	345	325	330	169	174	170
V_2	ml	45	25	30	19	24	20
V_3	ml	11,295	8,812	6,726	6,22	6,73	8,06
V_4	ml	33,705	16,188	23,274	12,78	17,27	11,94
ρ_h	g/ml	1,589	2,143	1,559	1,78	1,79	1,88

ρ_h (moyenne)	g/ml	1,76	1,82
γ_h (moyenne)	kN/m ³	17,3	17,84

5.1.4. Poids volumique des particules solides

Soit :

M_s : La masse de l'échantillon sec (après étuvage à 105°C)

V_1 : Volume de l'eau avant la mise de l'échantillon

V_2 : Volume de l'eau après la mise de l'échantillon

V_s : Volume de l'échantillon : $V_s = V_2 - V_1$

ρ_s : Masse volumique des solides : $\rho_s = M_s/V_s$

γ_s : Poids volumique des solides : $\gamma_s = M_s \cdot 9.81 / V_s$

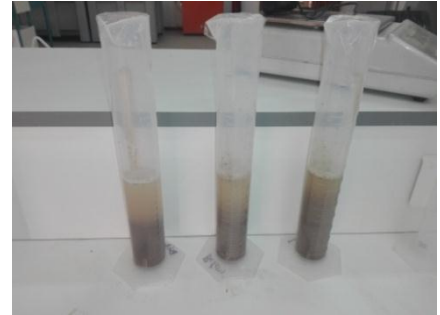


Photo.3.8. Masse volumique des solides par immersion dans l'eau.

Les résultats de cet essai sont donnés dans les tableaux suivants:

Tab.3.4.: Résultats d'essai de mesure de poids volumique des particules solides.

Essai	Unité	Ancien adobe			Nouveau adobe		
		1	2	3	1	2	3
M_s	g	90	90	90	90	90	90
V_1	ml	100	100	100	100	100	100
V_2	ml	140	140	140	140	140	140
V_s	ml	40	40	40	40	40	40
ρ_s	g/ml	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25
ρ_s moyenne	g/ml	2.25			2.25		
γ_s moyenne	kN/m ³	22.1			22.1		

5.1.5. Poids volumique sec

Soit : M_1 : La masse de l'échantillon sec (après étuvage à 105°C)

M_2 : La masse de l'échantillon sec + paraffine

M_3 : La masse du paraffine ($M_3 = M_2 - M_1$)

V_1 : Volume de l'eau avant la mise de l'échantillon

V_2 : Volume échantillon + paraffine

V_3 : Volume du paraffine : $\rho = M_3 / V_3 \Rightarrow V_3 = M_3 / \rho$

V_4 : Volume de l'échantillon : $V_4 = V_2 - V_3$

ρ_d : Masse volumique sec : $\rho_d = M_1 / V_4$

γ_d : Poids volumique sec : $\gamma_d = M_1 * 9.81 / V_4$

Les résultats de cette essai sont donnés dans le tableau suivant :

Tab.3.5 : Résultats d'essai de mesure de poids volumique sec.

Essai	Unité	Ancien adobe			Nouveau adobe		
		1	2	3	1	2	3
M_1	g	53,8	46,3	44,3	22,6	38,9	42,6
M_2	g	63,6	51,3	50,7	30	48,3	51,8
M_3	g	9,8	5	6,4	7,4	9,4	9,2
V_1	ml	343	332	333	335	335	325
V_2	ml	43	32	33	35	35	25
V_3	ml	10,89	5,56	7,1	8,222	10,444	10,222
V_4	ml	32,11	26,44	25,9	26,778	24,556	14,778
ρ_d	g/ml	1,68	1,75	1,71	0,844	1,584	2,883
ρ_d (moyenne)	g/ml	1,71			1,76		
γ_d (moyenne)	kN/m ³	16,81			17,36		

5.1.6. Porosité et indice des vides

Ancienne adobe : $n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} = 1 - \frac{16,81}{22,1} = 0,239$; $e = \frac{n}{1-n} = \frac{0,239}{1-0,239} = 0,314$.

Nouveau adobe : $n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} = 1 - \frac{17,366}{22,1} = 0,214$; $e = \frac{n}{1-n} = \frac{0,214}{1-0,214} = 0,272$.

5.1.7. Synthèse des résultats des essais de mesures de caractéristiques physiques

Dans le tableau 3.6, nous présentons la synthèse des résultats obtenus.

Il est remarquable que les résultats des essais des caractéristiques physiques pour l'ancien adobe sont de même ordre que le nouveau adobe.

Tab.3.6 : Synthèse des résultats des caractéristiques physiques.

Caractéristiques	Symbole	Unité	Résultats obtenus	
			Ancien	Nouveau
Teneur en eau	w	%	2,51	2,72
Teneur en fibres végétales	Tf	%	0.337	0.337
Poids volumique humide	γ_h	KN/m ³	17,3	17,84
Poids volumique des particules solides	γ_s	KN/m ³	22.1	22.1
Poids volumique sec	γ_d	KN/m ³	16,81	17,36
Porosité	n		0.239	0.214
Indice des vides	e		0.314	0.272

5.2. Les essais d'identification

5.2.1. Analyse granulométrique par tamisage

Les résultats de cette analyse sont donnés dans les tableaux suivants :

Tab.3.7 : Granulométrie par tamisage de l'échantillon 1 (ancien adobe).

Ouverture des Tamis (mm)	Refus partielles (g)	Refus cumulée (g)	Refus cumulée (%)	Tamisât cumulée (%)
8	46	46	3,599	96.401
6.3	14	60	4,695	95.305
5	11	71	5,556	94.444
3.15	27	98	7,668	92.332
2	23	121	9,468	90.532
1.6	8	129	10,094	89.906
1	23	152	11,894	88.106
0.5	44	196	15,336	84.664
0.16	280	476	37,246	62.754
0.08	481	957	74,883	25.117
BAC	321	1278	100	0
total	1278			

Tab.3.8 : Granulométrie par tamisage de l'échantillon 2 (ancien adobe).

Ouverture des Tamis (mm)	Refus partielles (g)	Refus cumulée (g)	Refus cumulée (%)	Tamisât cumulée (%)
8	51	51	3,261	96.739
6.3	14	65	4,156	95.844
5	14	79	5,051	94.949
3.15	24	103	6,586	93.414
2	29	132	8,440	91.560
1.6	10	142	9,079	90.921
1	33	175	11,189	88.811
0.5	60	235	15,026	84.974
0.16	319	554	35,422	64.578
0.08	623	1177	75,256	24.744
BAC	387	1564	100	0
total	1564			

Les courbes granulométriques pour l'ancien adobe sont présentée dans les figures suivantes (Figure.3.2.a et 3.2.b):

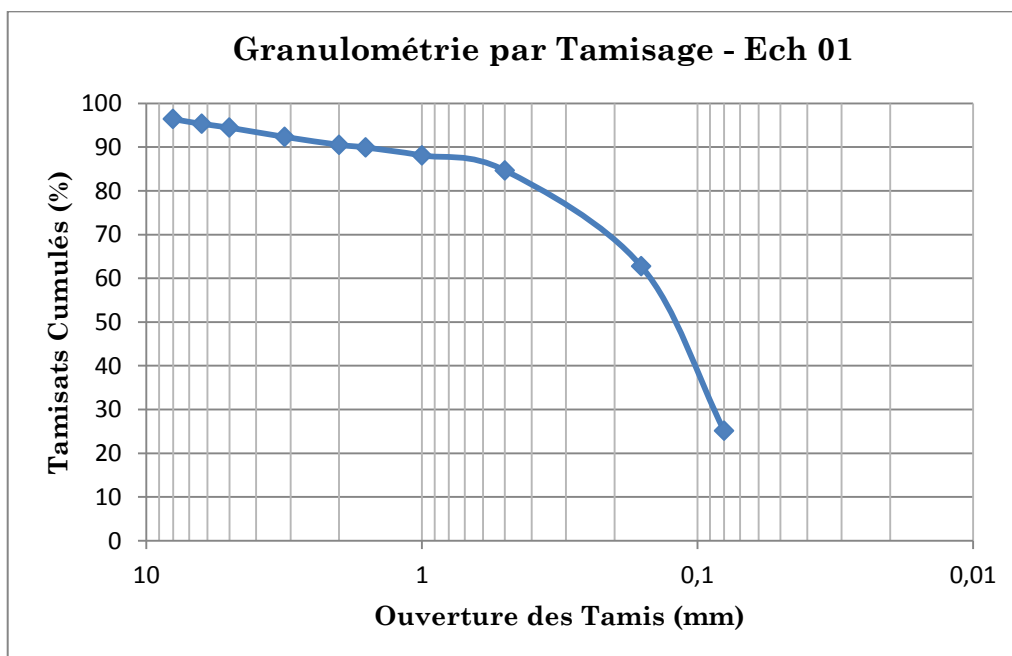


Fig.3.2.a : courbes granulométriques par tamisage de l'échantillon 1 (ancien adobe)

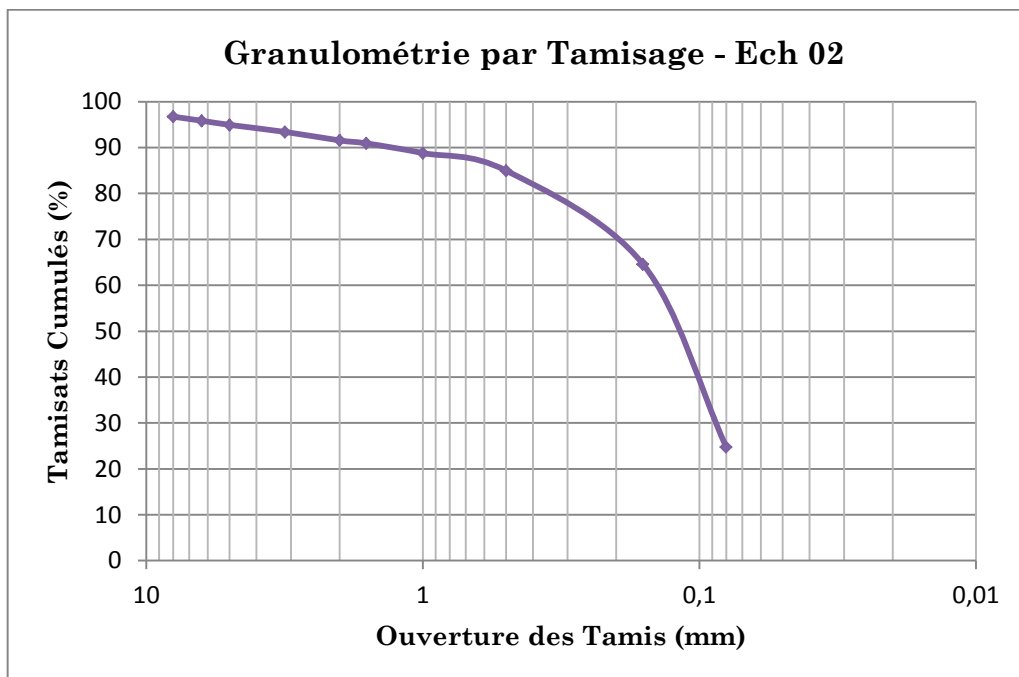


Fig.3.2.b : courbes granulométriques par tamisage de l'échantillon 2 (ancien adobe)

Tab.3.9: Granulométrie par tamisage de l'échantillon (Nouveau adobe).

Ouverture des Tamis (mm)	Refus partielles (g)	Refus cumulée (g)	Refus cumulée (%)	Tamisât cumulée (%)
8	86	86	4,7098	95,2902
6.3	20	106	5,8051	94,1949
5	13	119	6,5187	93,4830
3.15	34	153	8,3790	91,6210
2	33	186	10,1862	89,8138
1.6	12	198	10,8434	89,1566
1	34	232	12,7054	87,2946
0.5	64	296	16,2103	83,7897
0.16	467	763	41,7853	58,2147
0.08	741	1504	82,3658	17,6342
BAC	322	1826	100	0
total	1826			

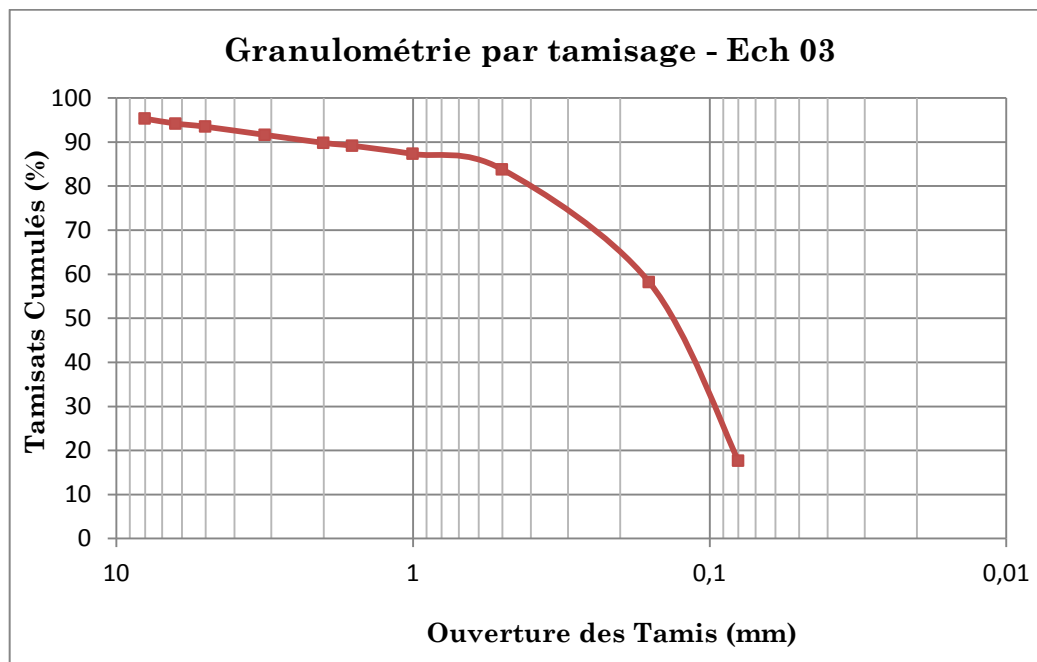


Fig.3.2.c : courbe granulométrique de l'échantillon 3 (nouveau adobe)

Tab.3.10: Pourcentages de graviers, sables et fines dans les échantillons.

Echantillon	Graviers %	Sables %	Fines %
1 (ancien)	9,47	65,41	25.12
2 (ancien)	12,86	66.25	20.89
3 (nouveau)	10.2	72.2	17.6
Moyenne	10.84	67.95	21.20

5.2.2. Analyse granulométrique par Laser.

A partir des résultats des analyses granulométriques par tamisage effectuées sur les trois échantillons de l'ancien adobe, nous n'avons pas la possibilité de calculer les diamètres efficaces (D_{10}). Pour cela nous avons complété l'information par une analyse granulométrique par Laser effectué par une machine HORIBA LA-960, dans le laboratoire de l'unité de recherche des matériaux émergents, à l'université de Sétif- 1, qui permet la mesure des tailles des particules, ou plus exactement, de leurs rayons. Elle, permet la mesure de tailles comprises entre 0,05 et 900 μm , ce qui est bien plus précis qu'avec la technique par tamis.

Les résultats d'analyse granulométrique par Laser sont présenter dans la figure.3.3.

Soit pour l'ancien ou le nouveau adobe, le rattachement des deux courbes est assuré, on prenant l'intervalle entre 0.059 mm et 0.023 mm, sachant que le pourcentage de tamisât cumulés de tamis 0.08 mm pour chaque essai présente le 100% dans les passants de l'essai par laser.

Les nouveaux résultats de tamisage sont présentés dans la courbe de superposition de la figure.3.4.

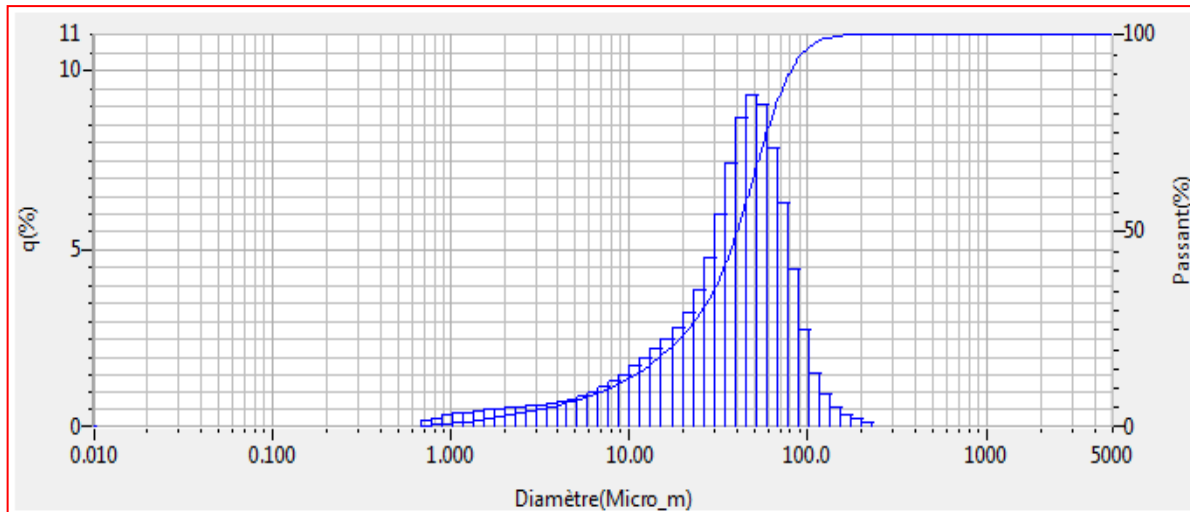


Fig.3.3: Résultats d'analyse granulométrique par Laser.

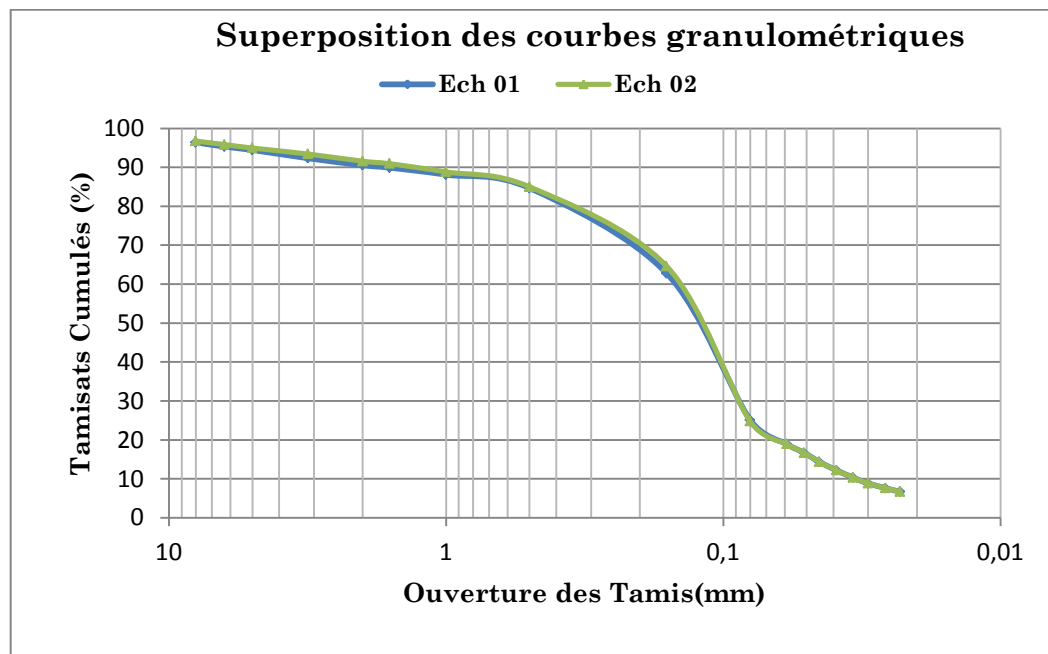


Fig.3.4 : Superposition des courbes granulométriques des 3 échantillons (ancien adobe) après analyse par Laser.

Il est remarquable que les résultats d'analyse granulométrique par Laser sont les mêmes pour l'ancien ou le nouveau adobe.

5.2.3. Synthèse des résultats des analyses granulométriques

Dans le tableau 3.11, nous présentons la synthèse des résultats obtenus :

Tab.3.11: Synthèse des résultats des analyses granulométriques.

Caract. Ech.	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Cu ($\frac{D_{60}}{D_{10}}$)	Cc ($\frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$)	Appréciation
Ech 01 (A)	0.035	0.085	0.15	4.286	1.376	sol mal gradué de granulométrie serrée
Ech 02 (A)	0.035	0.085	0.15	4.286	1.376	
Moyenne	0.035	0.085	0.15	4.286	1.376	
Ech 03 (N)	0.035	0.095	0.16	4.571	1.612	

Il est remarquable que les résultats des analyses granulométriques pour l'ancien adobe sont de même ordre que le nouveau adobe. Ainsi les deux adobes (ancien et nouveau) sont considérés comme des sols mal gradués de granulométrie serrée.

5.2.4. Limite d'Atterberg (liquidité, plasticité)

a) Détermination de la limite de liquidité (norme NF P94-051)

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant (Tab.3.12) :

Tab.3.12 : Détermination de la limite de liquidité.

Nombre de coups	15		24		31		35	
N° de la tare	T23	T13	T6	T17	T10	T2	T9	T14
Masse de la tare (g)	20.65	21.29	21.51	21.48	16.17	16.72	17.22	21.04
Masse du sol humide + la tare (g)	23	23.23	23.56	23.82	19.75	19.62	20.44	24.41
Masse du sol humide (g)	2.35	1.94	2.05	2.34	3.58	2.9	3.22	3.37
Masse du sol sec + la tare	22.1	22.76	23.02	23.26	18.92	18.95	19.7	23.64
Masse du sol sec (g)	1.45	1.47	1.51	1.78	2.75	2.23	2.48	2.6
Masse d'eau (g)	0.9	0.47	0.54	0.56	0.83	0.67	0.74	0.77
Teneur en eau	38.29	24.22	26.34	23.93	23.18	23.10	22.98	22.84
Moyenne	31.25		25.13		23.14		22.91	
W _L	25.60							

b) Détermination de la limite de plasticité (norme NF P94-051)

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant:

Tab.3.13: Détermination de la limite de plasticité.

N° d'essai	1	2	3
Masse de la tare	15.76	19.29	15.63
Masse du sol humide + la tare	16.04	19.66	16.27
Masse du sol humide	0.28	0.37	0.64
Masse du sol sec + la tare	15.97	19.59	16.13
Masse du sol sec	0.21	0.3	0.5
Masse d'eau	0.07	0.07	0.14
Teneur en eau	25	18.91	21.87
W _P	21.92		

On rappelle que les valeurs limites exigées par le règlement sont :

$$20\% < W_L < 50\% \text{ et } 10\% < W_P < 25\% \text{ (Moevus M, 2012)}$$

D'une manière générale on peut dire que les limites d'ATTERBERG sont voisines aux valeurs données par le règlement pour obtenir un bon briquet de terre.

c) Détermination de l'indice de plasticité et de liquidité

✓ L'indice de plasticité : $I_p = W_L - W_P = 3.68$

✓ L'indice de liquidité : $I_L = (W - W_p) / I_p = -5,29 < 0$

Commentaire: $W_n = 2,51\% < W_P = 21.92\%$ et $I_L < 0 \Rightarrow$ le sol est à l'état solide.

Rem : Les limites de liquidité, de plasticité et l'indice de plasticité pour le nouveau briquet de terre sont les mêmes que l'ancien.

5.2.5. Synthèse des résultats des essais d'identification

Dans le tableau 3.14, nous présentons la synthèse des résultats obtenus :

Tab.3.14: Synthèse des résultats des essais d'identification.

Caractéristiques	Symbole	Unité	Résultats obtenus	
			Ancien adobe	Nouveau adobe
limite de liquidité	W _L	%	25.60	25.60
limite de plasticité	W _P	%	21.92	21.92
L'indice de plasticité	I _p	/	3.68	3.68
Coefficient d'uniformité	C _u	/	4.286	4.571
Coefficient de courbure	C _c	/	1.376	1.612
Classification LPC	SL		Sable Limoneux	Sable Limoneux

Chapitre 4

Etude des caractéristiques mécaniques et thermiques

1. LES ESSAIS MECANIQUES

1.1. L'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande

L'appareil utilisé pour l'essai, appelé boîte de cisaillement ou boîte de Casagrande, est constitué de deux châssis métalliques indépendants, séparés par le plan de cisaillement :

- un bâti supérieur fixe
- un bâti inférieur mobile, entraîné par la force de cisaillement.

L'éprouvette de sol, de forme carrée (6 cm de côté sur 3 cm d'épaisseur) dans les modèles couramment utilisés est placée à l'intérieur des châssis métalliques et repose, à sa partie inférieure sur une pierre poreuse dont la perméabilité est grande vis-à-vis de celle du sol de l'éprouvette. On place sur la face supérieure de l'éprouvette un piston métallique muni également d'une pierre poreuse, on applique à l'éprouvette :

- une force normale constante N sur sa face supérieure au moyen d'un système de poids et de leviers et par l'intermédiaire du piston ;
- une force de cisaillement horizontale T .

L'essai est en général effectué en imposant le déplacement relatif des deux demi-boîtes. (Magnan, 1991).

Un dispositif mécanique approprié entraîne à vitesse constante le châssis inférieur et la force de cisaillement est mesurée sur le châssis supérieur au moyen d'un anneau dynamométrique.

Au cours de l'essai, on mesure :

- l'effort normal N ;
- l'effort de cisaillement T ;
- le déplacement horizontal du châssis mobile, de l'ordre du centimètre dans les essais courants ;
- le déplacement vertical du piston dans le châssis supérieur. Les déplacements sont mesurés au moyen de comparateurs à cadran ou de capteurs de déplacements.

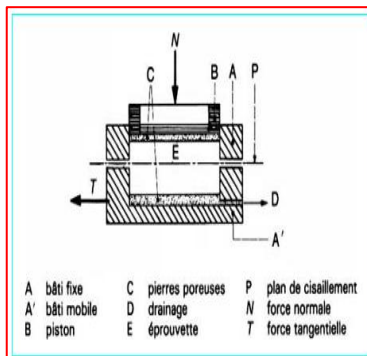


Fig.4.1. Boîte de Cisaillement (Magnan, 1991)

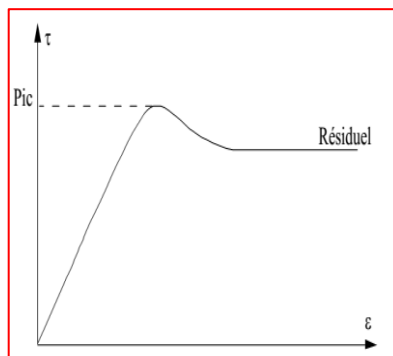


Fig.4.2. Courbe effort-déformation (Véronique M, 2006).

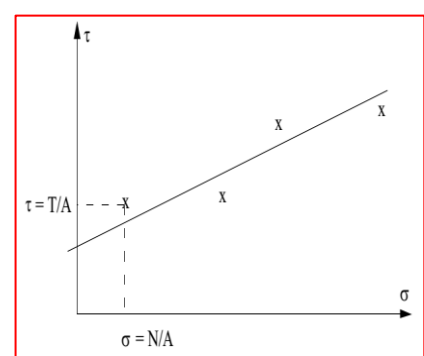


Fig.4.3. courbe intrinsèque (Véronique M, 2006)

Afin d'exécuter tout ce qui est indiqué ci-dessus, il faut tracer la courbe « effort de cisaillement-déplacement relatif des demi-boîtes », calculer la contrainte normale σ , supposée uniforme : $\sigma = N/A$ avec A aire de la section de l'éprouvette et calculer la contrainte tangentielle τ , supposée uniforme : $\tau = T/A$, en reproduisant l'essai sur plusieurs éprouvettes, pour différentes valeurs de la contrainte normale σ , on peut construire point par point la courbe intrinsèque. (Magnan, 1991).

1.2. L'essai de compression simple (uniaxiale)

L'essai de compression simple a été effectué par une machine universelle de type MTS (Photo 4.1). Elle est similaire de l'essai triaxial sans confinement. (<http://www.directindustry.fr/prod/mts-systems-china-co-ltd/product-54100-1158099.html>)

L'essai est exécuté sur des éprouvettes de sols à cohésion. L'éprouvette est posée sur un plateau de presse et on impose une vitesse de déformation axiale constante, on mesure l'effort et la déformation axiale et on construit une courbe

effort-déformation. Si l'on suppose que le sol est purement cohérent, on obtient avec R_c résistance en compression simple.



Photo.4.1. Machine universelle de type MTS (Laboratoire de l'unité de recherche des matériaux émergents, à l'université de Sétif- 1)

On peut évaluer sur cette courbe la pente qui donne une valeur de module de déformation (module de Young) (voir par exemple la série d'essais figure 4.4).

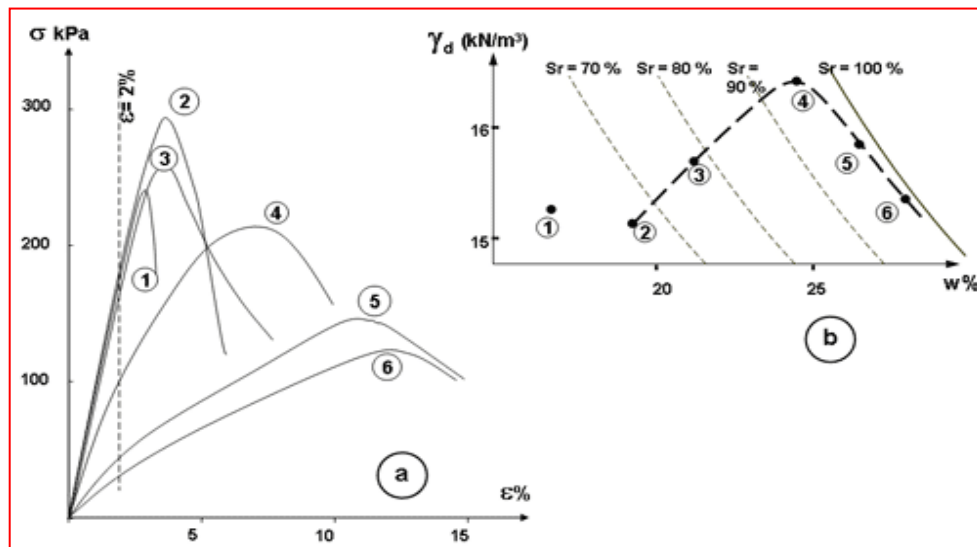


Fig.4.4. Exemple de série d'essais uniaxiale. ([http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap9/compression.html](http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap9/compression.html))

2. LES ESSAIS THERMIQUES

2.1. L'essai de conductivité thermique

La conductivité thermique ou conductibilité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Notée λ ou K voire k , cette grandeur apparaît notamment dans la loi de Fourier. Elle représente l'énergie (quantité de chaleur) transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 kelvin ou 1 degré Celsius par mètre.

La conductivité équivalente est la valeur de conductivité d'un matériau homogène équivalente au matériau considéré, qui aurait le même comportement thermique macroscopique.

Tab.4.1: Valeurs moyennes de la conductivité thermique pour les matériaux en terre. (Moevus M, 2012)

ρ (kg/m ³)	500	1000	1500	1800	2000	2200
λ (W/mK)	0.2	0.3	0.6	1	1.2	1.5

Le principe de la détermination de la conductivité thermique d'un matériau repose sur le lien entre le flux de chaleur qui traverse ce matériau et le gradient de température qu'il génère.

Plus la conductivité thermique est élevée, plus le matériau est conducteur de chaleur. Plus elle est faible, plus le produit est isolant.

(https://fr.wikipedia.org/wiki/Conductivit%C3%A9_thermique)

Les matériaux avec $\lambda < 0,065$ W/m.K sont considérés comme isolants. (Moevus M, 2012).

Mise en œuvre: Des thermomètres, scindés aux extrémités de l'échantillon, mesurent la différence de température de rentrée et de sortie de l'échantillon chaque cinq minutes. La conductivité thermique est alors donnée par :

$$\lambda = \frac{QL}{S \cdot \Delta T}$$

Avec: Q: puissance électrique; L: longueur de l'échantillon; S: section de l'échantillon; ΔT : différence de température.

Le principe de la mesure repose sur l'hypothèse que la totalité du flux de chaleur passe par l'échantillon. (Moevus M, 2012).

Chapitre 4

3. RESULTATS ET COMMENTAIRES

3.1. Les essais mécaniques

3.1.1. L'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande

L'essai de cisaillement direct réalisé à la boîte s'applique sur tous les types de sols naturels, reconstitués ou artificiels. L'essai a pour but de déterminer les caractéristiques mécaniques intrinsèques d'un sol donné à savoir la cohésion et l'angle de frottement interne (C , Φ).

L'essai de cisaillement direct a été effectué par une machine universelle de type IGM, dans le laboratoire de mécanique des sols, à l'université Mohamed Boudiaf de M'sila. L'essai de cisaillement direct emploie une éprouvette carrée de dimensions 60x60mm et une hauteur de 2.5 cm.

Des essais ont été effectués à différentes valeurs de la contrainte normale initiale ($\sigma_{no} = 25, 50$ et 100 kPa).

Les résultats de ces essais pour les anciennes et nouvelles briques de terre sont illustrés dans les figures 4.5 et 4.6.

Pour l'ancienne brique de terre on constate que la contrainte tangentielle croît au début du chargement pour atteindre un palier, puis, elle diminue légèrement à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 1.2mm pour la contrainte normale 25kPa, 3mm pour la contrainte normale 50kPa et de l'ordre de 3.5mm pour la contrainte 100 kPa (Figure.4.5a).

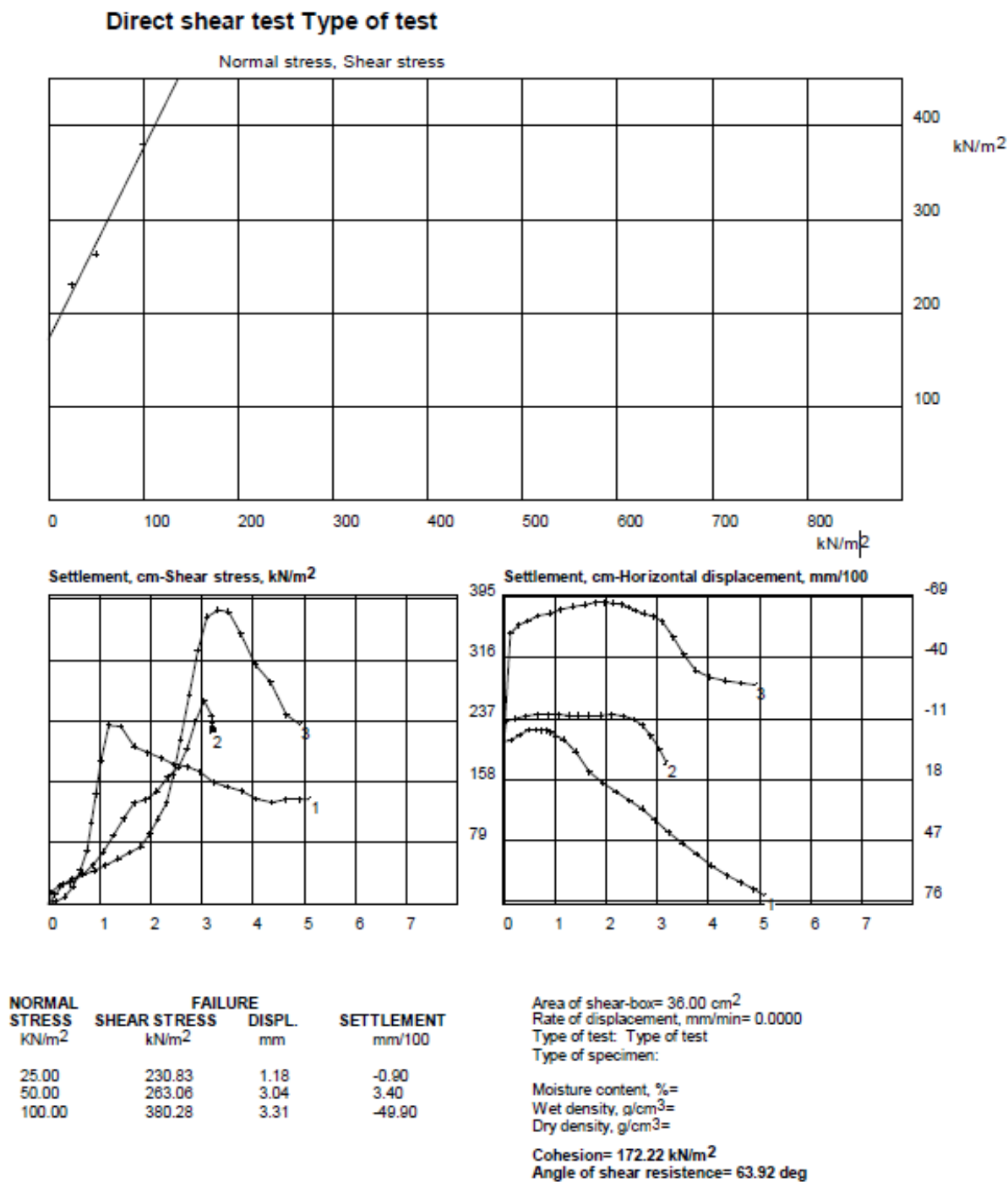
En ce qui concerne l'évolution du déplacement normal, on note que le comportement est contractant au début de chargement jusqu'à un déplacement tangentiel de l'ordre de 0,5mm et 1.2mm pour les contraintes 25kPa et 50kPa respectivement et de l'ordre de 2,1mm pour la contrainte 100kPa, puis on remarque une diminution de ce déplacement, jusqu'à la fin de chargement (Figure.4.5b).

Pour la nouvelle brique de terre on constate que la contrainte tangentielle croît au début du chargement pour atteindre un palier, puis, elle diminue légèrement à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 5mm pour la contrainte normale 25kPa, 4.5mm pour la contrainte normale 50kPa et de l'ordre de 3.5mm pour la contrainte 100kPa (Figure.4.6a).

En ce qui concerne l'évolution du déplacement normal, on note que le comportement est contractant au début de chargement jusqu'à un déplacement tangentiel de l'ordre de 3,9mm pour les contraintes 25kPa et 50kPa respectivement et de l'ordre de 1mm pour la contrainte 100kPa, puis on remarque une diminution de ce déplacement, jusqu'à la fin de chargement (Figure.4.6b).

La cohésion et l'angle de frottement interne (C, Φ) sont respectivement 172,22kPa et 63.92° pour l'ancien adobe et 68,06kPa et 57.29° pour le nouveau adobe.

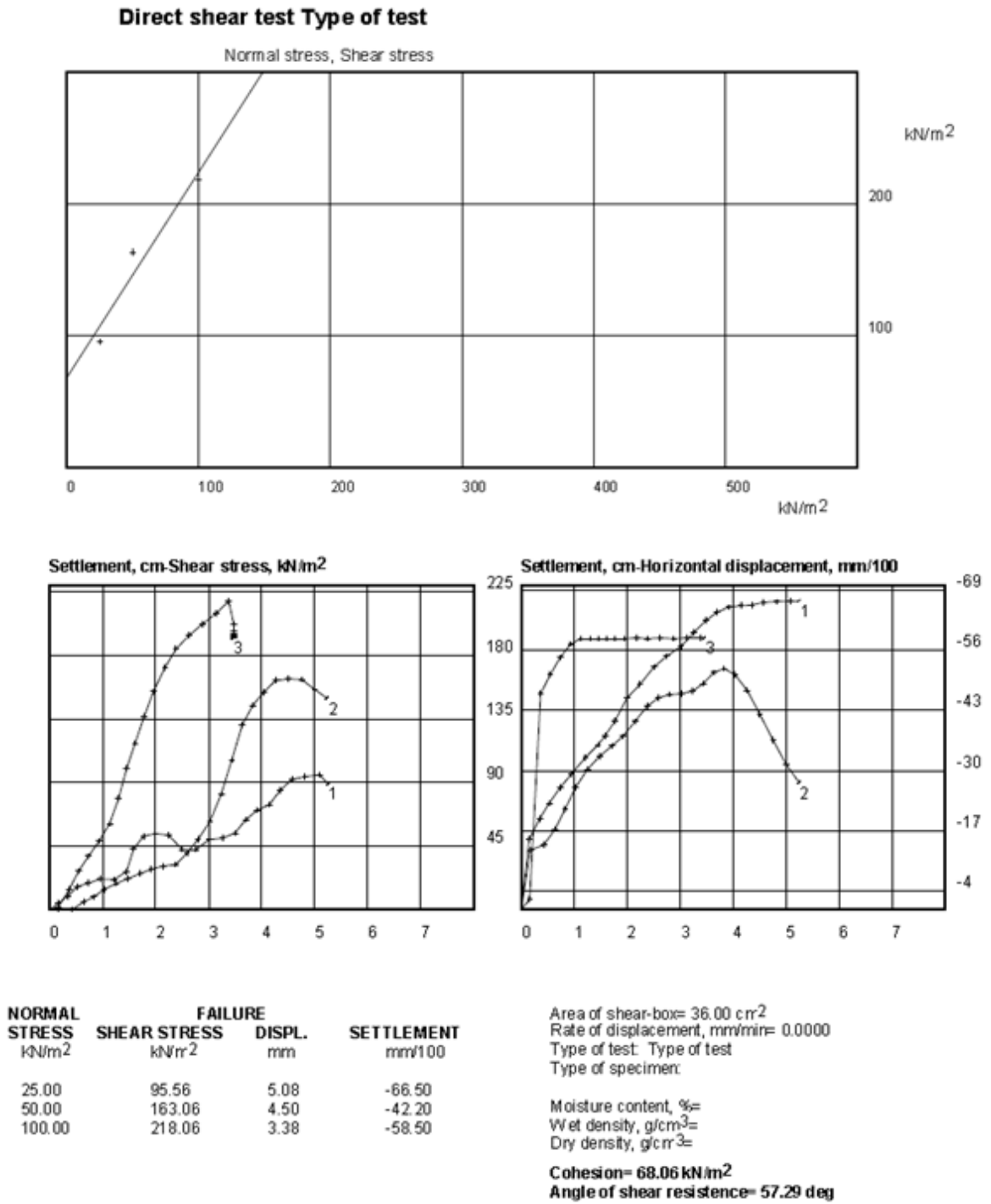
L'analyse de ces résultats montre que la résistance au cisaillement de l'ancien adobe est supérieure à celle de l'adobe nouveau.



(a) Évolution de la contrainte tangentielle

(b) Évolution du déplacement normal

Fig.4.5 : Essais de cisaillement à contraintes normales constantes (ancienne brique)



(a) Évolution de la contrainte tangentielle

(b) Évolution du déplacement normal

Fig.4.6 : Essais de cisaillement à contraintes normales constantes (nouveau brique)

3.1.2. L'essai de compression simple (uniaxiale)

L'essai de compression simple a été effectué par une machine universelle de type MTS, dans le laboratoire de l'unité de recherche des matériaux émergents, à l'université de Sétif-1.

L'essai de compression simple emploie une éprouvette de dimensions 106 mm par 124 mm pour l'ancienne brique et une éprouvette de dimensions 55 mm par 125 mm pour la nouvelle brique.



(a) Dispositif de l'essai



(b) Echantillon de "adobe"

Photo.4.2 : L'essai de compression simple effectué par une machine universelle de type MTS.

L'allure générale de la courbe force – allongement est donnée par les figures.4.7.a. et 4.7.b pour l'ancienne et la nouvelle brique respectivement.

Dans ces figures (figure.4.7.a ; figure.4.7.b), on observe principalement que la réponse est presque linéaire jusqu'à une force de 1000N et un allongement de 0.5mm pour l'ancienne adobe et une force de 900N et un allongement de 1.5mm pour la nouvelle adobe. Suite au régime élastique, la force continue à augmenter, cependant l'augmentation de l'allongement devient plus importante. Au-delà, le niveau de force s'approche de la limite de rupture (F_{pic}), le volume de l'éprouvette augmente par le développement de déformations dilatantes dans la direction transversale de l'effort. Ces déformations deviennent plus importantes que celles mesurées dans la direction de la charge avec l'observation d'une fissuration notable. Des fissures apparaissent alors et se propagent

parallèlement à la direction de l'effort. La résistance limite est ensuite atteinte très rapidement.

Dès l'apparition des premières fissures visuelles, la courbe change d'allure (figure.4.7). Ce changement d'allure peut s'expliquer par un phénomène d'endommagement au sein du briquet de terre même.

La partie post pic ne doit pas avoir une signification mécanique car l'arrêt de l'essai se fait d'une manière précipitée et survient lorsque la ruine totale de l'adobe est imminente.

Une analyse de ces résultats montre que la résistance à la compression simple de l'ancienne adobe est deux fois supérieure à celle de l'adobe nouveau.

Les résultats de l'exécution des essais de compression simple sont présentés comme suivant (Tab.4.2) :

Tab.4.2: Résultats de l'exécution des essais de compression simple.

Nom d'affichage	Unité	Valeurs	
		ancien adobe	nouveau adobe
Motif de fin d'exécution de l'essai		Rupture détectée	Rupture détectée
Largeur	mm	106.000	55.000
longueur	mm	124.000	125.000
Pic de contrainte	MPa	0.2	0.1
Force maximale	kN	2.899	0.972

3.1.3. Synthèse des résultats des essais mécaniques

Dans le tableau 3.17, nous présentons la synthèse des résultats obtenus :

Tab.4.3: Synthèse des résultats des essais mécaniques.

Caractéristiques	Symbole	Unité	Résultats obtenus	
			ancienne	nouveau
Résistance au cisaillement à la boîte	C	kPa	220	68,06kPa
	Φ	degré	34.32°	57.29°.
Résistance à la compression simple	Rc	MPa	0.2	0.1

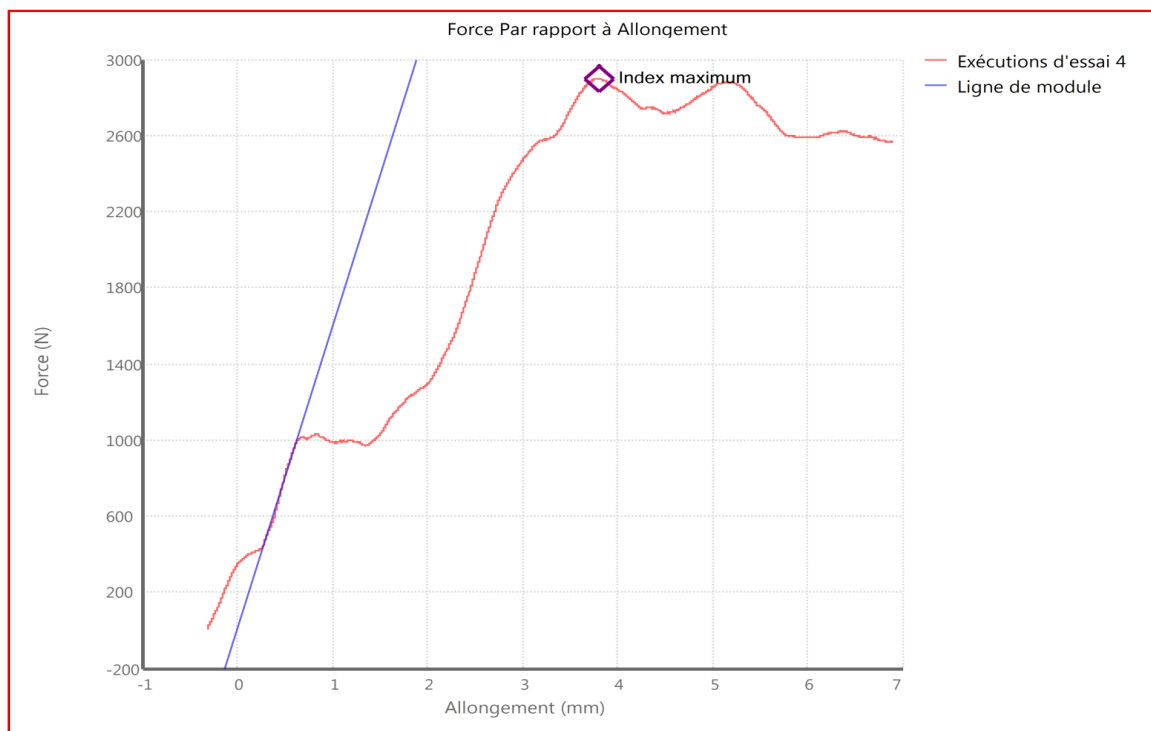


Fig.4.7.a: Graphique d'examen de l'exécution d'essai de compression simple (ancien adobe).

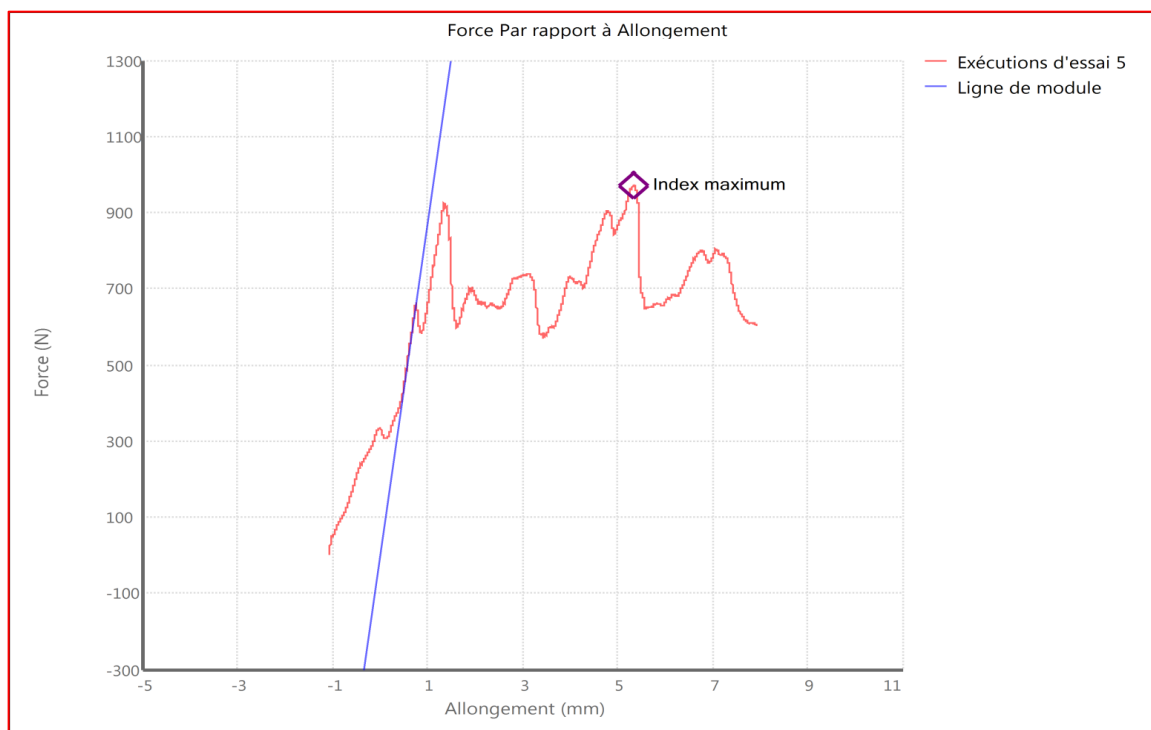


Fig.4.7.b: Graphique d'examen de l'exécution d'essai de compression simple (nouveau adobe).

3.2. Les essais thermiques

3.2.1. L'essai de conductivité thermique

a) température à l'entrée et la sortie de l'échantillon

Les résultats des essais de mesure de température à l'entrée et la sortie des échantillons, chaque cinq minutes, sont résumé dans le tableau 3.18.a pour l'ancienne brique et 3.18.b pour le nouveau brique :

Tab.4.4.a : Résultats des essais de mesure de température à l'entrée et la sortie de l'échantillon d'adobe (ancienne brique).

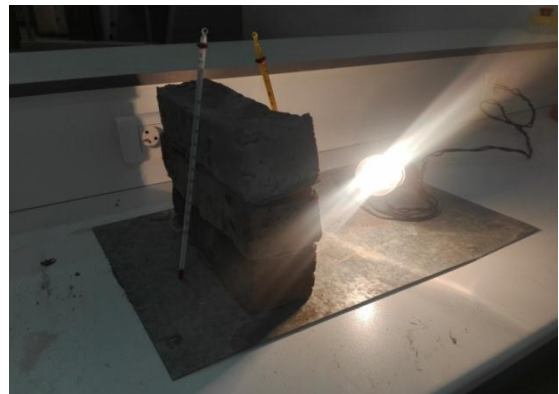
Temps (min)	T° entrée	T° sortie	Temps (min)	T° entrée	T° sortie	Temps (min)	T° entrée	T° sortie
5	25	20	80	31	21	155	32	21
10	28	20	85	31	21	160	32	21
15	28	20	90	31	21	165	32	21
20	29	20	95	31	21	170	32	21
25	29	20	100	31	21	175	32	21
30	29	20	105	32	21	180	32	21
35	30	20	110	32	21	185	32	21
40	30	20	115	32	21	190	32	21
45	31	21	120	32	21	195	32	21
50	31	21	125	32	21	200	32	21
55	31	21	130	32	21	205	32	21
60	31	21	135	32	21	210	32	21
65	31	21	140	32	21	215	33	21
70	31	21	145	32	21	220	34	21
75	31	21	150	32	21			

Tab.4.4.b : Résultats des essais de mesure de température à l'entrée et la sortie de l'échantillon d'adobe (nouveau brique).

Temps (min)	T° entrée	T° sortie	Temps (min)	T° entrée	T° sortie	Temps (min)	T° entrée	T° sortie
5	22	22	45	48	24	85	53	26
10	31	22	50	49	24	90	53	27
15	39	22	55	50	25	95	53.5	27
20	42	22	60	50	25	100	54	27
25	43	22	65	51	25	105	54	27
30	45	23	70	51	26	110	55	27.5
35	46	23	75	52	26	115	55	28
40	47	24	80	52	26			



(a) Ancienne brique



(b) Nouvelle brique

Photo.4.3 : L'essai de mesure de température à l'entrée et la sortie de l'échantillon d'adobe.

La figure 4.8.a présente l'évolution de la température à l'entrée et la sortie de l'échantillon d'adobe de l'ancienne brique sur une période de 250 minutes. Ainsi la figure 4.8.b présente l'évolution de la température à l'entrée et la sortie de l'échantillon d'adobe de nouvelle brique sur une période de 115 minutes.

Nous remarquons une progression de température au niveau de l'entrée de l'échantillon d'adobe (ancien ou nouveau) tandis qu'aucune évolution de température significative n'apparaît au niveau du sortie. Ainsi la température à l'entrée augmente progressivement, alors que celle de la sortie est pratiquement stable.

Ces résultats confirment que l'adobe de terre possède aussi de bonnes performances d'isolation thermique.

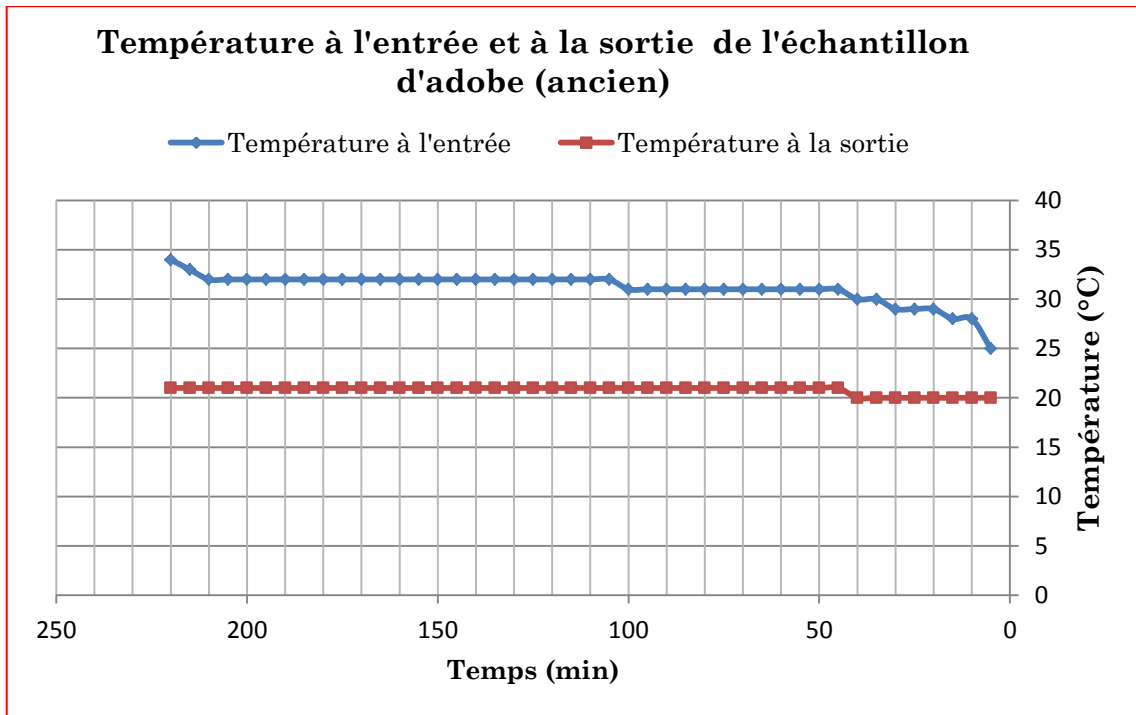


Fig.4.8.a: Evolution de la température à l'entrée et la sortie de l'adobe (ancienne)

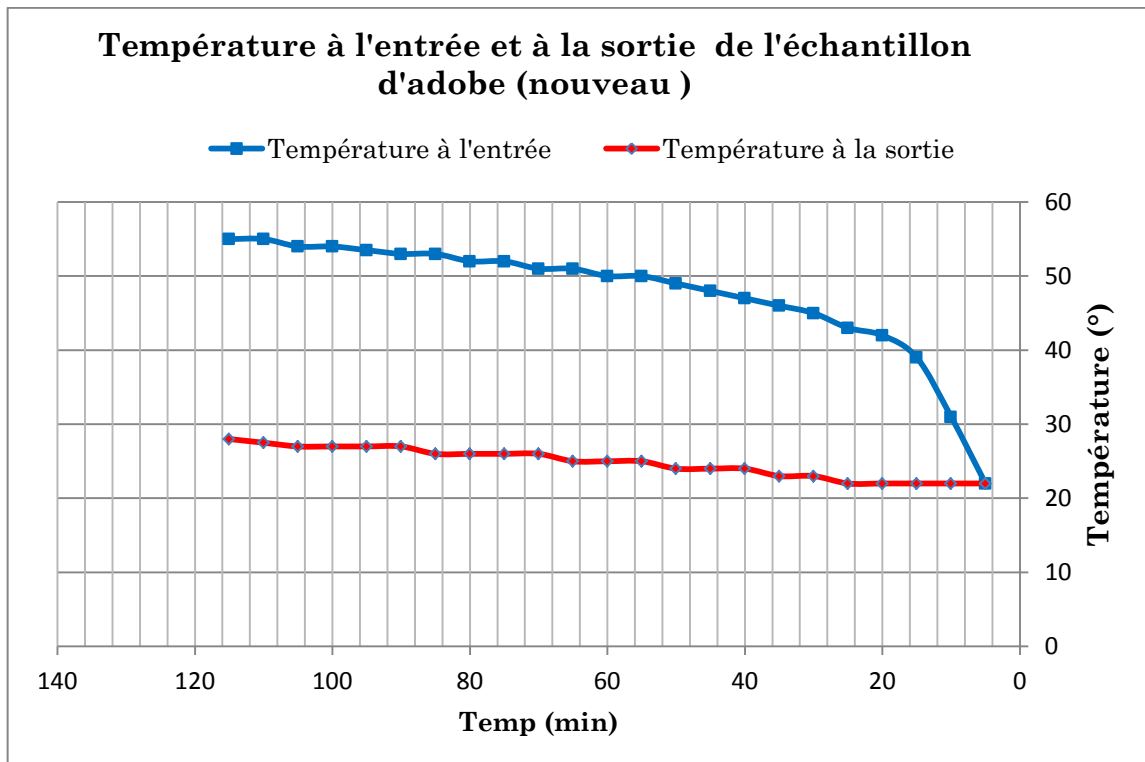


Fig.4.8.b: Evolution de la température à l'entrée et la sortie de l'adobe (nouveau)

b) calcul de la conductivité thermique

Soit: $Q = 100 \text{ W}$;

$$S_1 = 23.5 \times 17.5 = 411,25 \text{ cm}^2 = 0,041125 \text{ m}^2 \text{ (ancienne brique)}$$

$$S_2 = 27.0 \times 19.5 = 526,5 \text{ cm}^2 = 0,05265 \text{ m}^2 \text{ (nouveau brique)}$$

$$L_1 = 8.5 \text{ cm} = 0.085 \text{ m} \text{ (ancienne brique)}$$

$$L_2 = 7 \text{ cm} = 0.07 \text{ m} \text{ (nouveau brique)}$$

$$T(\text{K}) = T(\text{C}^\circ) + 273.15$$

$$\lambda = QL/(S.\Delta T)$$

Les résultats de calcul de la conductivité thermique de la brique de terre est donnée dans les tableaux suivants (Tab.4.5.a ,b):

Tab.4.5.a : Résultats de calcul de la conductivité thermique de l'ancien adobe.

Temps (min)	ΔT (°)	ΔT (k)	λ (W/m.k)	Temps (min)	ΔT (°)	ΔT (k)	λ (W/m.k)
5	5	278.15	0.7431	115	11	284.15	0.7274
10	8	281.15	0.7351	120	11	284.15	0.7274
15	8	281.15	0.7351	125	11	284.15	0.7274
20	9	282.15	0.7325	130	11	284.15	0.7274
25	9	282.15	0.7325	135	11	284.15	0.7274
30	9	282.15	0.7325	140	11	284.15	0.7274
35	10	283.15	0.7300	145	11	284.15	0.7274
40	10	283.15	0.7300	150	11	284.15	0.7274
45	10	283.15	0.7300	155	11	284.15	0.7274
50	10	283.15	0.7300	160	11	284.15	0.7274
55	10	283.15	0.7300	165	11	284.15	0.7274
60	10	283.15	0.7300	170	11	284.15	0.7274
65	10	283.15	0.7300	175	11	284.15	0.7274
70	10	283.15	0.7300	180	11	284.15	0.7274
75	10	283.15	0.7300	185	11	284.15	0.7274
80	10	283.15	0.7300	190	11	284.15	0.7274
85	10	283.15	0.7300	195	11	284.15	0.7274
90	10	283.15	0.7300	200	11	284.15	0.7274
95	10	283.15	0.7300	205	11	284.15	0.7274

100	10	283.15	0.7300	210	11	284.15	0.7274
105	11	284.15	0.7274	215	12	285.15	0.7248
110	11	284.15	0.7274	220	13	286.15	0.7223

Tab.4.5.b : Résultats de calcul du conductivité thermique de la nouveau adobe.

Temps (min)	ΔT (°)	ΔT (k)	λ (W/m.k)	Temps (min)	ΔT (°)	ΔT (k)	λ (W/m.k)
5	0	273.15	0.48674	65	26	299.15	0.44444
10	9	282.15	0.47122	70	25	298.15	0.44593
15	17	290.15	0.45822	75	26	299.15	0.44444
20	20	293.15	0.45353	80	26	299.15	0.44444
25	21	294.15	0.45199	85	27	300.15	0.44296
30	22	295.15	0.45046	90	26	299.15	0.44444
35	23	296.15	0.44894	95	26.5	299.65	0.4437
40	23	296.15	0.44894	100	27	300.15	0.44296
45	24	297.15	0.44743	105	27	300.15	0.44296
50	25	298.15	0.44593	110	27.5	300.65	0.44222
55	25	298.15	0.44593	115	27	300.15	0.44296
60	25	298.15	0.44593				

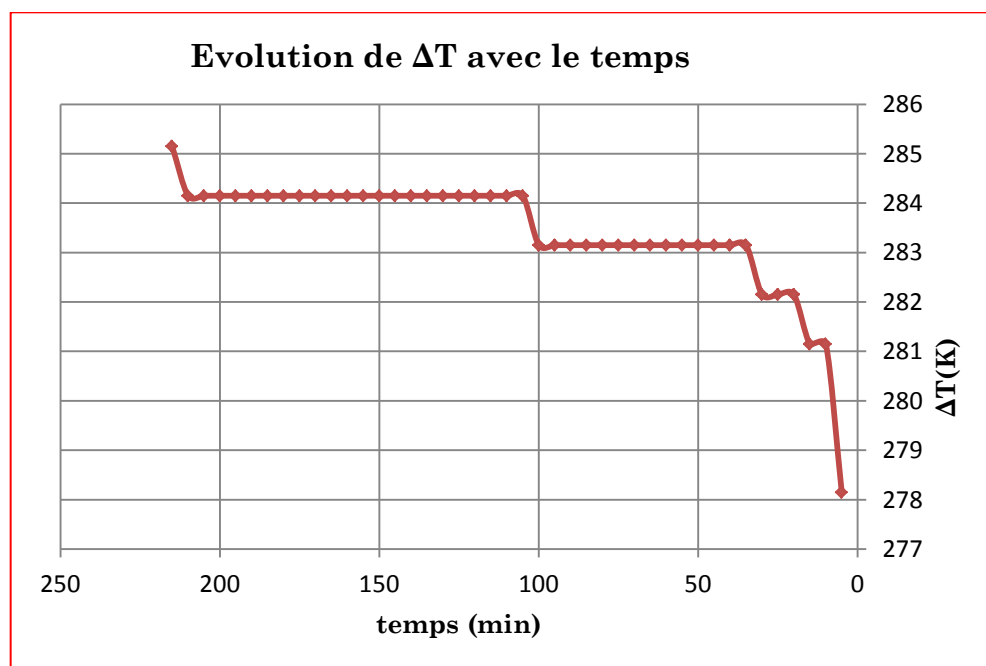


Fig.4.9.a: Evolution de la différence de température avec le temps (ancien adobe).

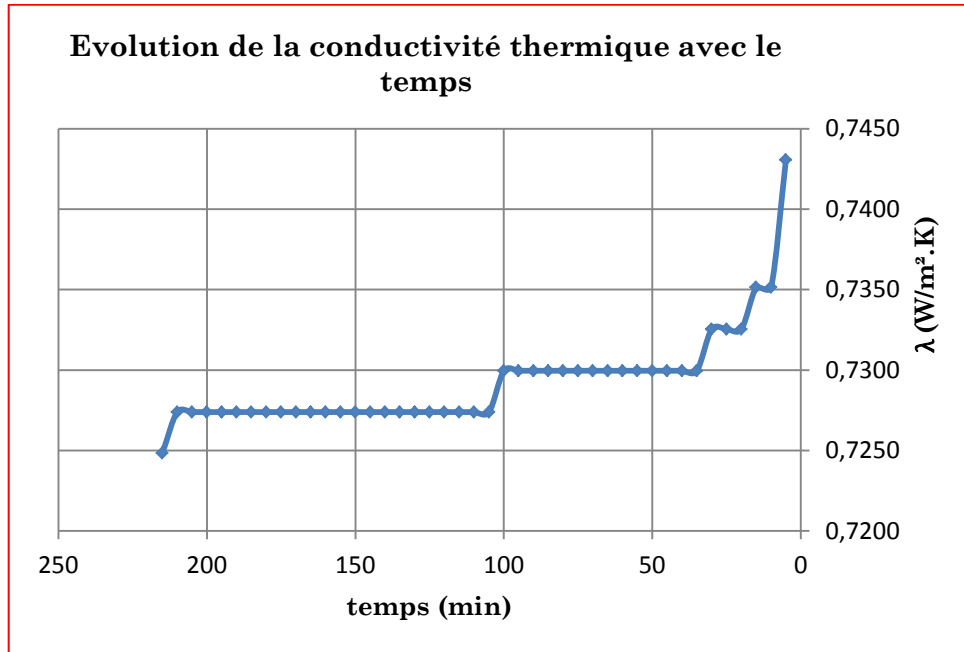


Fig.4.9.b: Evolution de la conductivité thermique avec le temps (ancien adobe).

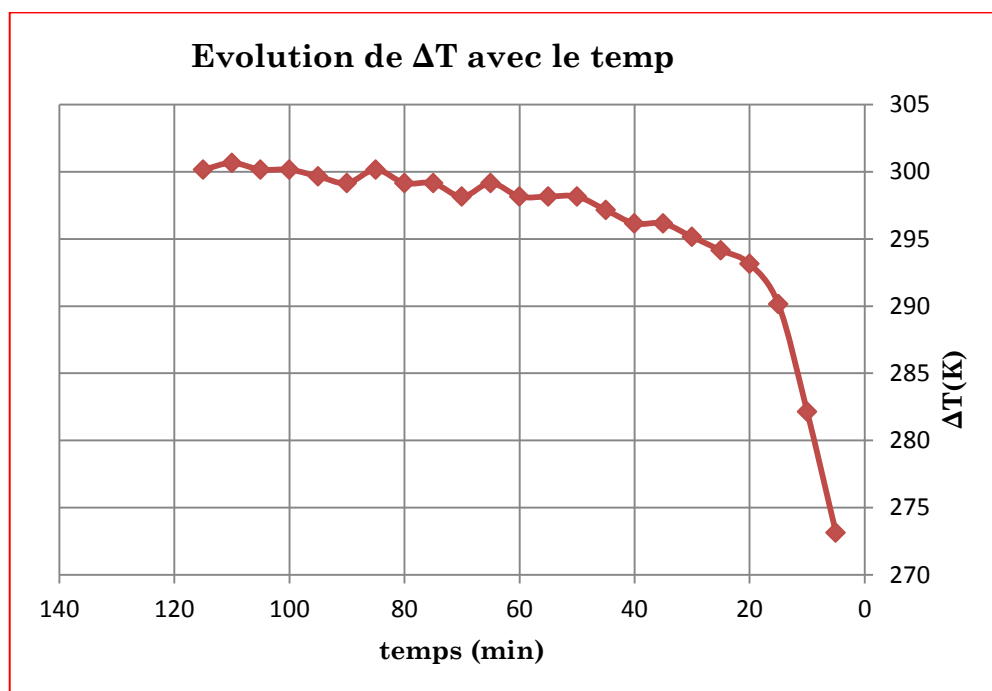


Fig.4.10.a: Evolution de la différence de température avec le temps (nouveau adobe).

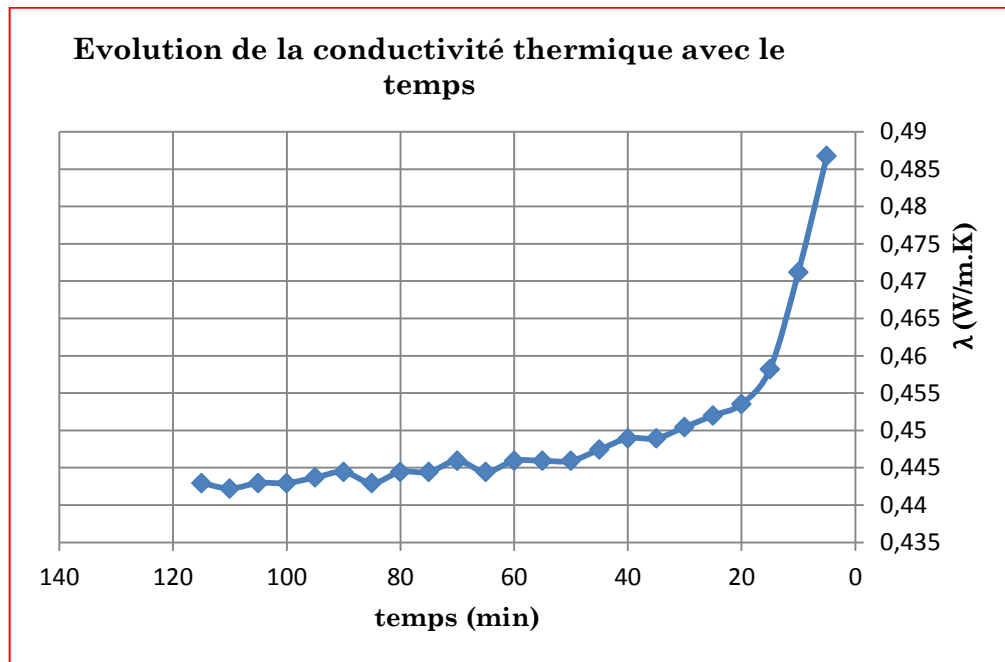


Fig.4.10.b: Evolution de la conductivité thermique avec le temps (nouveau adobe).

Pour l'ancien adobe de Bou-saâda, les figures 3.9.a et 3.9.b montrent que l'augmentation de la différence de température est compensée par une diminution de la conductibilité thermique.

Les valeurs de λ en fonction de temps sont données sur la figure 3.9.b. Toutes ces mesures montrent que la conductibilité thermique de l'adobe diminue progressivement avec le temps.

La valeur moyenne de λ dans cet intervalle de température est de 0.7291 W/m.K, ce qui correspond au bon isolant thermique.

Ainsi pour le nouveau adobe les figures 3.10.a et 3.10.b ont les mêmes allures que celles des figures 3.9a et 3.9b.

La valeur moyenne de λ dans cet intervalle de température est de 0.4494 W/m.K, ce qui correspond au bon isolant thermique.

L'analyse de ces résultats des essais thermiques, montre que la conductivité thermique de l'ancien adobe est supérieure à celle de l'adobe nouveau.

3.3. Discussion

Les résultats obtenus révèlent des performances mécaniques intéressantes. Il ressort que les valeurs de conductivité thermique et de poids volumiques obtenues apparaissent comme optimales.

Cependant, Nous pouvons noter que nos résultats (voir Tab.3.20 et Tab.3.21) sont conformes par rapport au travaux rapportés par; (Atoke, 2013); (Malanda & al, 2017); (Moevus, 2012); (Guillaud & al, 1995) et parfois sont meilleurs.

Par contre, pour le nouveau adobe, la résistance à la compression simple montre une valeur inférieures que ceux obtenus par (Atoke, 2013); (Malanda & al, 2017); (Moevus, 2012), mais significativement conformes par rapport à la norme édictée par (Guillaud & al, 1995).

Pour l'ancien adobe, la résistance à la compression simple est non conforme seulement avec (Moevus, 2012).

Tab.4.6 : Comparaison entre les résultats et la bibliographie (ancien adobe).

Paramètre	Unité	Résultats	Atoke, 2013	Malanda & al, 2017	(Moevus, 2012)	(Guillaud & al, 1995)
Rc	MPa	0.2	0.2 – 0.5	0.2	0.4 - 5	0 - 5
λ	W/m.K	0.7291	0.75	0.44 – 0.75	0.46– 0.81	0.4 – 0.8
γ_h	kN/m ³	17.3	15			12 - 17
γ_d	kN/m ³	16.81			12 - 17	
w	%	2.51			0 - 5	

Tab.4.7 : Comparaison entre les résultats et la bibliographie (nouveau adobe).

Paramètre	Unité	Résultats	Atoke, 2013	Malanda & al, 2017	(Moevus, 2012)	(Guillaud & al, 1995)
Rc	MPa	0.1	0.2 – 0.5	0.2	0.4 - 5	0 - 5
λ	W/m.K	0.4494	0.75	0.44 – 0.75	0.46– 0.81	0.4 – 0.8
γ_h	kN/m ³		15			12 - 17
γ_d	kN/m ³				12 - 17	
w	%				0 - 5	

Tab.4.8 : Comparaison entre les résultats (ancien et nouveau adobe).

Paramètre	Unité	ancien adobe	nouveau adobe
Rc	MPa	0.2	0.1
λ	W/m.K	0.7291	0.4494
γ_h	kN/m ³	17.3	15.473
γ_d	kN/m ³	16.81	17.366
w	%	2.51	2.72

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Partout dans le monde et à travers les siècles, les matériaux de construction directement disponibles ont été utilisés pour construire des maisons et des abris. Dans les climats chauds-arides et tempérés, le matériau de construction le plus répandu a été la terre. De nos jours, près d'un tiers de la population mondiale vit dans des maisons en terre et ce nombre atteint même plus de la moitié dans les pays en voie de développement.

Des exemples d'architectures remarquables en terre sont présents sur tous les continents.

Les constructions en terre sont diverses: la terre fournit des matériaux de compositions différentes suivant les régions, et les techniques de construction ont évoluées pendant des milliers d'années. Chaque technique diffère en fonction de la composition de la terre utilisée, de la méthode de compactage, de la teneur en eau de fabrication, et du processus de séchage.

"Contrairement aux autres matériaux traditionnels ; ciment, béton, bois et acier, la terre à l'état naturel peut être utilisée dans la construction sans trop de dépense d'énergie. Aussi, elle présente de nombreux avantages environnementaux, sociaux, culturels, mais aussi économiques. Elle possède aussi de bonnes performances d'isolation thermique une fois stabilisée dans les conditions idéales.

Cependant, l'inconvénient est que, à l'état cru, ce matériau ne résiste pas toujours aux intempéries. Ainsi, la durabilité des ouvrages construits est redoutée. Beaucoup de bâtisses en terre crue (adobe et torchis) et particulièrement celles construites avec des matériaux sans aucun traitement associé sont vouées à des sérieux problèmes de stabilité, d'usure progressive et voire d'émiettement en présence d'un taux d'humidité important, surtout dans les pays à forte pluviométrie". **[04]**

Nous avons menée l'étude sur une portion de l'Algérie, la zone de Bou-saâda. A cette échelle, Bou-saâda a été édifiée sur un site accidenté présentant ainsi une variété de paysages géographiques, urbanistiques et architecturaux.

C'est une ville à aspect saharien de climat semi aride, choisie au pied des montagnes; elle est entourée au Nord et à l'Est par des larges dunes de sables, au Sud et à l'Ouest par le Djebel Kardada.

Bâtie sur une hauteur, Bou-saâda est traversée par deux rivières: l'Oued Maitar, qui sépare l'ancienne ville de la nouvelle, et l'Oued Bou-saâda qui la sépare à l'est des jardins de palmiers adossés à la montagne.

Sa structure urbaine est composée de plusieurs quartiers de types traditionnels, facilement identifiables grâce à leur structure urbaine et leurs types de construction distincts, composé de maisons de briques de terre crue séchées au soleil (*Toub*) encloses de hauts murs.

La détermination des différents endroits favorables à la fabrication des adobes en terre est basée sur une bonne connaissance de la géologie locale et des formations géologiques susceptibles d'être de la zone d'étude. Les formations prédominantes sont celles du Quaternaire et celles du Crétacé représentées par l'Aptien et le Barrémien. Cependant les argiles et les marnes gréseuses localisées dans la partie Sud de la Zone d'étude et les formations de calcaires sont assez peu représentées à Djebel Kerdada.

Le matériau composant l'adobe (brique de terre) traditionnel de Bou-saâda apparaît comme hétérogène et donc difficile à étudier.

Cependant, les propriétés obtenues, même que les bâtiments couvrent plus de 500 ans, suggèrent que l'adobe traditionnel de Bou-saâda pourrait être un matériau de construction brut intéressant. Les nombreuses similitudes trouvées entre l'adobe traditionnel de Bou-saâda et autres travaux sur les briques de terre renforcent cette idée.

L'adobe traditionnel de Bou-saâda peut être utilisé comme matière d'isolation thermique, de murs de cloisons et de revêtements de plafond.

Soit pour l'ancien ou le nouveau adobe de Bou-saâda, les résultats obtenus révèlent des performances mécaniques intéressantes. Il ressort que les valeurs des résistances en compression et en cisaillement obtenues apparaissent comme optimales. Ainsi, cette composition pourra être retenue pour la confection des briques de qualité.

Conclusion Générale

Des travaux ultérieurs sur la durabilité et autres traitements de dite brique permettront d'apprécier quant à sa production et son utilisation dans l'industrie de la construction et aussi dans la restauration de bâtiments anciens.

BIBLIOGRAPHIE

ACCUM F-C.,(1819). Traité pratique sur l'usage et le mode d'application des réactifs chimiques fondé sur des expériences: suivi d'instructions, pour l'analyse, des mines métalliques, des métaux, des sols, des engrais, et des eaux minérales. MEQUIGNON-MARVIS, Paris, 1819, p15.

ADEME., (2015). Déchets. Edition 2015. Technical report, 2015.

ADALBERTH K., (1999). Energy use in four multi-family houses during their life cycle. International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings, 1:1–20, 1999.

ANGER, R., & FONTAINE, L. (2005). Grains de bâtisseurs. La matière en grains, de la géologie à l'architecture. Villefontaine, CRATerre Edition.

ANGER, R., & FONTAINE, L. (2009). Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture. Paris, Belin / Cité des sciences et de l'industrie.

ATOKE R., (2013). La terre crue en architecture, mieux connaitre le matériau pour mieux l'adapter et l'utiliser, 2013 - Global Archiconsult. pp. 14.

BAHDI K., et BENAMMI M., (2011). Les instabilités de terrain. Edition universitaires européennes, 2011. pp 45.

BENRABIA A., (2013). Etude de la qualité des eaux souterraines de la région de Boussaâda. Wilaya de M'Sila. Mémoire de Master en Hydraulique. Université de M'sila (2012/2013).

BUI Q-B., (2008). Stabilité des structures en pisé : durabilité, caractéristiques mécaniques-Thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées, Lyon .PhD thesis, 2008.

CAPOLINI J. et SARI M., (1969). Etude géomorphologique du Hodna : zone Nord et zone Sud. S.E.S., D.E.M.R.E.H., Alger.

CATARINA T., (2002). A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. *Building and Environment*, 37 : 429–435, 2002.

CHAMPIRE F., (2017). Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction. Génie civil. Université de Lyon, 2017. France. pp.189.

CHAMPIRE F, SOUDANI L, FABBRI A, MOREL J-C, WOLOSZYN M, WONG H, GRILLET A-C, and COINTET S., (2014). Le pisé, un atout pour la transition énergétique dans le bâtiment. In *Forum franco-suisse sur la transition énergétique dans le bâtiment*, page1, Lyon, France, 2014. Université de Lausanne.

CONTET B., (2012). Caractérisation du comportement hygrothermique du pisé - Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Vaulx-en-Velin. Technical report, 2012.

CORPUS (2015). *Architecture Traditionnelle Méditerranéenne. Maison de la médina de Bou Saada*. pp.146

DIXIT M-K, FERNANDEZ-SOLIS J-L, LAVY S, and CULP C-H., (2010). Identification of parameters for embodied energy measurement : A literature review. *Energy and Buildings*, (42) : 1238–1247, 2010.

DOAT P., HAYS A., HOUBEN H., MATUK S. ET VITOUX F., (1979). *Construire en terre*. CRATerre, Collection AnArchitecture, 1979,.France. pp.265.

DURVILLE J-L., et SÈVE G., (1996). Glissements en terrain meuble. C 254. *Techniques de l'Ingénieur, traité Construction*. 1996. pp.1-7.

EMBERGER J., (1964). Notice explicative de la carte géologique au 1/200.000 7me. Boussaâda, Serv. Géol. de l'Algérie. Alger.

GUILLAUD H., JOFFROY T., ODUL P., CRATerre-EAG., (1995). *Blocs de terre comprimée. Volume II : Manuel de conception et de construction*. Friedrich Vieweg & Sohn, 1995. P9.

GUILLAUD H., & HOUBEN H. (1995). *Traité de construction en terre* (2ème édition). Marseille, Editions Parenthèses.

HELALI N. et GHODBANE M., (2016). *Analyse statistique multi variée des eaux souterraines de la région de Boussaâda*. Mémoire de Master en Hydraulique Urbaine. Université de M'sila. pp. 4 – 32.

HORSCH B., & DE PAOLI R. (2014). Cours UE82 "Construire en terre crue", Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.

MAGNAN J-P., (1991). *Résistance au cisaillement*. C216. Techniques de l'Ingénieur, traité Construction. 1991. pp.1-7.25P.

MAZA M., (2016) : Fascicule de travaux pratique, matériaux de constructions. Université Mohamed Boudiaf de M'sila. 2016/2017. pp. 8-10.

MOEVUS-DORVAUX M., COUVREUR L., CLOQUET B., FONTAINE L., ANGER R., DOAT P., (2016): *Béton d'Argile Environnemental*. CRAterre éditions, Villefontaine. juillet 2016. pp. 10-19.

MOEVUS M., ANGER R., FONTAINE L., (2012). *Hygro-thermo-mechanical properties of earthen materials for construction : a literature review*. Terra 2012, Apr 2012, Lima, Peru. <hal-01005948>

MOREL J-C, MESBAH A, OGGERO M, and WALKER P., (2001). *Building houses with local materials : means to drastically reduce the environmental impact of construction*. Building and Environment, 36 : 1119–1126, 2001.

NACIB Y., (2013). *Cultures oasiennes (Bou-Saada essai d'histoire sociale)*. Editions Zyriab. Algérie. pp.118

NARCISSE M, PAUL L-K, YANNICK D, TAMBA-NSEMI (2017). *Etude des caractéristiques mécaniques d'une brique en terre stabilisée à l'aide de la mélasse de canne à sucre*. Revue Cames – Sci. Appl. & de l'Ing., Vol. 2(2), pp. 1-9. ISSN 2312-8712.

Norme Française P 94-050., (1995). *Détermination de la teneur en eau pondérable des matériaux*, paris, 1995.

Norme Française P 94-051., (1993). *Détermination des limites d'Atterberg*, paris, 1993.

Bibliographie

Norme Française P 94-053., (1991). Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire, paris, 1991.

Norme Française P 94-054., (1991). Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau, paris, 1991.

Norme Française P 94-056., (1996). Analyse granulométrique par tamisage, paris, 1996

Norme Internationale ISO 13320., (2009). Analyse granulométrique - Méthodes par diffraction laser : principes généraux. AFNOR. Octobre 2009. pp 51.

PAULUS J., (2015). Construction en terre crue: dispositions qualitatives, constructives et architecturales – Application à un cas pratique : Ouagadougou. Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master en Ingénieur Civil Architecte. Université de Liège – 2014/2015. pp.227.

SAVORNIN J., (1920). Etude géologique de la région du Hodna et du plateau sétifien. Bull. Serv. Carte. Géol. Algér., 2ème sér., 7, 499 p.

VERONIQUE M-S., (2006). GEOTECHNIQUE. Cours de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines, Nancy. 2006/2007.193P.

Site internet:

https://fr.wikipedia.org/wiki/Bou_Sa%C3%A2da

<http://www.blog.saeed.com/2011/03/situation-geographique-criteres-de-ramsar-et-cadre-biotique/>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Granulom%C3%A9trie_laser

<http://www.directindustry.fr/prod/mts-systems-china-co-ltd/product-54100-1158099.html>

http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap9/compression.html

https://fr.wikipedia.org/wiki/Conductivité_thermique