



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة قاصدي مرباح - ورقلة
UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA



FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL ET D'HYDRAULIQUE

MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION D'UN **DIPLÔME DE MASTER (LMD)**

Spécialité : GENIE CIVIL
Option : VOA et Travaux Public

THEME

Etude des Caractéristiques Thermomécaniques du Pisé.
(Cas de la région de Ouargla)

Présentée et Soutenue publiquement

Par : Mr SAADA Rabie
Mr OTHMANI Abdelhamid

Le : 27/06/2019

Devant le jury composé de :

| | | | |
|--------------------------|------|----------------|--------------|
| - Mr. CHAHED Ali Haider | MAA | U.K.M. Ouargla | Président |
| - Mr. HAFSI Abdellatif | LTPS | LTPS. Ouargla | Examineur |
| - Mr. CHAIB Hachem | MCB | U.K.M. Ouargla | Encadreur |
| - Mr. KRIKER Abdelouahed | Pr | U.K.M. Ouargla | Co-Encadreur |

Dédicace

À nos mères

À nos pères

À nos familles

À mes frères et ma sœur

À tous les amis

Remerciements

Je tiens à exprimer notre gratitude et remerciement à **ALLAH** qui nous a donné la force et le pouvoir pour effectuer ce modeste travail.

Je tiens à exprimer tous mes remerciements à mon directeur de recherche **Mr CHAIB Hachem** pour son suivi, sa disponibilité, son soutien, sa patience et ses orientations durant l'élaboration de cette recherche et le Professeur **KRIKER Abdelouahed** pour son suivi de cette recherche. Mes remerciements vont aussi à **Mr KCHIRED Ali** pour ses encouragements, ses conseils et son aide.

Mes vives gratitude vont au **Mr HAFSI Abdellatif** d'avoir honoré en président ce mémoire. J'adresse mes remerciements aussi à **Mr CHAHED Ali Haider** d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

J'tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Je exprime mes remerciements aux cadres et agents des laboratoires **LTPS** Ouargla, **LNHC** Ouargla.

J'adresse mes vifs remerciements à tous mes enseignants, qui ont contribué à ma formation.

Enfin je remercie mes amies **SAIDI Boubakeur** et **ACILA Abdelhamid** et tous les amies pour leur soutien moral et leur aide, ainsi que tous ceux qui m'ont soutenu et aidé tout au long de cette étude.

Sommaire

DEDICACE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES NOTATIONS

| | |
|-----------------------------|---|
| RÉSUMÉ | 1 |
| INTRODUCTION GENERALE | 2 |

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

| | |
|---|----|
| I.1. INTRODUCTION | 4 |
| I.2. TERRE CUITE | 4 |
| I.3. PRODUITS DE BRIQUE EN TERRE CUITE | 4 |
| I.3.1. BRIQUES ORDINAIRES | 4 |
| I.3.2. BRIQUES POREUSES | 5 |
| I.3.3. BRIQUES SILICO-CALCAIRES | 6 |
| I.4. LA TERRE CRUE | 8 |
| I.4.1. HISTOIRE DE LA CONSTRUCTION EN TERRE CRUE | 8 |
| I.5. LES TYPES DE CONSTRUCTIONS EN TERRE CRUE | 9 |
| I.5.1. L'ADOBE | 9 |
| I.5.2. LA BRIQUE DE TERRE CRUE COMPRESSEE (BTC)..... | 12 |
| I.5.3. LE PISE | 14 |
| I.5.3.1. PISE TRADITIONNEL | 14 |
| I.5.3.2. PISE MODERNE | 17 |
| I.6. LES CARACTERISTIQUES DES BRIQUES EN TERRE CRUE | 20 |
| I.7. CONCLUSION | 20 |

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

| | |
|---|----|
| II.1. INTRODUCTION | 23 |
| II.2. L'ARGILE..... | 23 |
| II.2.1. ARGILE DE BELDET AMOR..... | 23 |
| II.2.1.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTATION | 23 |

| | |
|---|----|
| II.2.1.2. ESSAI DE DENSITE SECHE..... | 25 |
| II.2.1.3. ESSAI AU BLEU DE METHYLENE | 25 |
| II.2.1.4. ESSAI DE LIMITE D'ATTERBERG..... | 25 |
| II.2.1.5. ANALYSE CHIMIQUE..... | 26 |
| II.2.1.6. ESSAI DE DIFFRACTION DES RAYONS X, (DRX) | 27 |
| II.2.2. ARGILE D'EL HDJIRA | 28 |
| II.2.2.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTATION | 28 |
| II.2.2.2. ESSAI DE DENSITE SECHE..... | 30 |
| II.2.2.3. ESSAI AU BLEU DE METHYLENE | 30 |
| II.2.2.4. ESSAI DE LIMITE D'ATTERBERG..... | 30 |
| II.2.2.5. ANALYSE CHIMIQUE..... | 30 |
| II.2.2.6. ESSAI DE DIFFRACTION DES RAYONS X, (DRX) | 30 |
| II.3. LE SABLE DES DUNES | 31 |
| II.3.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE | 32 |
| II.3.2. MODULE DE FINESSE | 33 |
| II.3.3. ESSAI DE MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE..... | 33 |
| II.3.4. ESSAI DE MASSE VOLUMIQUE APPARENTE..... | 33 |
| II.3.5. ESSAI DE EQUIVALENT DE SABLE..... | 33 |
| II.3.6. ANALYSE CHIMIQUE..... | 34 |
| II.3.7. ESSAI DE DIFFRACTION DES RAYONS X, ANALYSE DRX..... | 34 |
| II.4. LES GRAVIERS..... | 35 |
| II.4.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE | 35 |
| II.4.2. ESSAI DE MASSE VOLUMIQUE..... | 36 |
| II.4.3. ESSAI MICRO-DEVAL EN PRESENCE D'EAU (MDE)..... | 37 |
| II.4.4. ESSAI LOS ANGELES | 37 |
| II.5. EAU DE GACHAGE..... | 38 |
| II.6. CONCLUSION | 38 |

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

| | |
|--|----|
| III.1. INTRODUCTION..... | 41 |
| III.2. PREPARATION DES PISES | 41 |
| III.2.1. L'OBTENTION DE L'EAU DE MALAXAGE..... | 41 |
| III.2.2. PREPARATION DES ECHANTILLONS UTILISES DANS L'ETUDE..... | 42 |
| III.3. ESSAIS MECANIQUES | 43 |
| III.3.1. LA RESISTANCE A LA COMPRESSION | 43 |
| III.3.2. RESISTANCE DE FLEXION | 43 |
| III.3.3. ESSAI ULTRASONIQUE..... | 44 |
| III.4. ESSAIS THERMIQUES..... | 45 |
| III.4.1. LA CONDUCTIVITE THERMIQUE | 45 |
| III.4.2. LA RESISTANCE THERMIQUE (R_{TH}) | 45 |
| III.5. RESULTATS ET DISCUSSIONS | 45 |
| III.5.1. PISE A BASE D'ARGILE DE BELDAT AMOR | 45 |
| III.5.2. PISE A BASE D'ARGILE D'EL HDJIRA | 49 |
| III.6. CONCLUSION..... | 52 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| CONCLUSION ET PERSPECTIVES..... | 54 |
| CONCLUSION GENERALE | 54 |
| PERSPECTIVES : | 56 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | I |
| ANNEXE I | II |
| ANNEXE II | IV |

Liste Des Figures

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

| | |
|--|----|
| Figure I.1: Brique pleines et perforées..... | 5 |
| Figure I.2: Briques perforées..... | 5 |
| Figure I.3 Produit en briques silico-calcaire. | 7 |
| Figure I.4 Mur en brique silico-calcaire. | 7 |
| Figure I.5 : Moulage et séchage des blocs adobes. | 10 |
| Figure I.6 : Moule de l'adobe..... | 11 |
| Figure I.7 : Brique de terre compressée..... | 12 |
| Figure I.8 ; I.9: Brique de terre crue compressée par une presse manuelle..... | 13 |
| Figure I.10 Château Chabert, XVIIe siècle. | 14 |
| Figure I.11 Maison ancienne de 130 ans. | 15 |
| Figure I.12 Mise en œuvre du coffrage du pisé suivant la méthode lyonnaise. | 15 |
| Figure I.13 Mise en œuvre du coffrage du pisé suivant la méthode du Bugey. | 16 |
| Figure I.14 Les deux techniques différentes appliquées sur une même maison. | 16 |
| Figure I.15 Maison en pisé moderne construite au cours des années 1980..... | 17 |
| Figure I.16 La dame pneumatique en métal. | 18 |
| Figure I.17 Coffrage métallique du pisé moderne. | 18 |
| Figure I.18 Préfabrication des pisés dans une usine. | 19 |
| Figure I.19 Transport et mise en œuvre des éléments préfabriqués. | 19 |
| Figure I.20 Un bâtiment construit par 160 éléments préfabriqués. | 19 |

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

| | |
|---|----|
| Figure II.1 : Courbe granulométrique d'argile (Beldet Amor) | 24 |
| Figure II.2 : Présentation des limites d'Atterberg. | 26 |
| Figure II.3 Machine de diffraction des rayons X. | 27 |
| Figure II.4 Analyse diffractométrie de l'argile Beldet Amor. | 28 |
| Figure II.5 : Courbe granulométrique d'argile (El Hdjira). | 29 |
| Figure II.6 Analyse diffractométrie de l'argile El Hdjira. | 31 |
| Figure II.7 : Sable des dunes. | 31 |
| Figure II.8 : courbe granulométrique de sable des dunes. | 32 |
| Figure II.9: Définition de l'équivalent de sable. | 34 |
| Figure II.10 Analyse diffractométrie de sable de dune..... | 35 |
| Figure II.11. Courbe granulométrique de gravier 3/8 | 36 |
| Figure II.12. Courbe granulométrique de gravier 8/15 | 36 |
| Figure II.13 La machine micro-Deval. | 37 |
| Figure II.14 : La machine Los Angeles..... | 38 |

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

| | |
|---|----|
| Figure III.1 Moule Proctor..... | 42 |
| Figure III.2 Courbe Proctor de l'argile B. Amor | 42 |

| | |
|---|----|
| Figure III.3 Courbe Proctor de l'argile El Hdjira..... | 42 |
| Figure III.4 Essai de Compression..... | 43 |
| Figure III.5 Essai de Flexion..... | 44 |
| Figure III.6 Mécanisme de l'appareille d'ultrasonique..... | 44 |
| Figure III.7 Résultats de Masse Volumique..... | 46 |
| Figure III.8 Résultats de la Compression..... | 47 |
| Figure III.9 Résultats de la Flexion..... | 47 |
| Figure III.10 Résultats de la vitesse de propagation du son..... | 48 |
| Figure III.11 Variation de la conductivité thermique des pisés..... | 48 |
| Figure III.12 Variation de la resistance thermique de pisé..... | 49 |
| Figure III.13 Résultats de Masse Volumique..... | 50 |
| Figure III.14 Résultats de la Compression..... | 50 |
| Figure III.15 Résultats de la Flexion..... | 51 |
| Figure III.16 Résultats de la vitesse de propagation du son..... | 52 |

Liste des Tableaux

CHAPITRE I : Synthèse Bibliographique

| | |
|---|----|
| Tableau I.1: La classe et la masse volumique des briques courantes. | 5 |
| Tableau I.2: Dimensions et résistances des briques. | 5 |
| Tableau I.3 : Propriétés de brique silico-calcaire. | 8 |
| Tableau I.4 : les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, BTC et pisé). | 20 |

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

| | |
|--|----|
| Tableau II.1: Analyse granulométrique d'argile Beldet Amor | 24 |
| Tableau II.2: Classification des argiles selon Burmister. | 26 |
| Tableau II.3 : Classification des argiles selon Atterberg. | 26 |
| Tableau II.4 : Analyse chimique d'argile (Beldet Amor). | 27 |
| Tableau II.5 : Analyse granulométrique d'argile El Hdjira | 29 |
| Tableau II.6 : Analyse chimique d'argile. | 30 |
| Tableau II.7: Résultats d'analyse granulométrique de sable des dunes. | 32 |
| Tableau II.8: Analyse chimique de sables des dunes. | 34 |
| Tableau II.9 : Résultats de la masse volumique apparente | 36 |
| Tableau II.10 : Résultats de la masse volumique absolue | 37 |
| Tableau II.11 : Résultats de Micro – Deval des graviers. | 37 |
| Tableau II.12 Résultats de los Angeles des graviers | 38 |
| Tableau II.13 : Composition chimique de l'eau. | 38 |

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

| | |
|--|----|
| Tableau III.1 : Compositions Utilisées à base d'argile Beldet Amor. | 45 |
| Tableau III.2 : Compositions Utilisées à base d'argile El Hdjira. | 49 |
| Tableau III.3 : les meilleurs résultats des argiles utilisées. | 52 |

Liste Des Notations

Alphabétiques :

| | |
|---|-----------------------|
| a : dimension | (cm) |
| b : dimension | (cm) |
| Ip : indice de plasticité | (%) |
| h : Hauteur | (cm) |
| m: masse | (kg) |
| MF : module de finesse | |
| P : densité sèche | (g/cm ³) |
| Rf : résistance à la flexion..... | (MPa) |
| Rc : résistance à la compression..... | (MPa) |
| R, Rth : Résistance thermique | (m ² .K/w) |
| T : température | (°C,K) |
| U : coefficient de transmission calorifique | (W/m ² .K) |
| V : Volume | (m ³) |
| W : Taux d'humidité | (%) |
| WL : limite de liquidité | (%) |
| Wp : limite de plasticité | (%) |

Romains :

| | |
|----------------------------------|----------------------|
| λ : Conductivité thermique | (W/m.k) |
| φ : flux thermique | (W/cal.s) |
| ρ : masse volumique | (kg/m ³) |
| ε : déformation | (%) |

RÉSUMÉ

Dans le cadre de valorisation des matériaux locaux dans les zones arides et semi arides, on va choisir le pisé comme un objet de réducteur

Ce sujet de recherche consiste à d'utilisation d'argile pour la construction. Ce dernier est abondant dans le sud-est de l'Algérie et présente des propriétés qui semblent convenir à la conception des bâtiments. Le but de ce projet est d'évaluer le comportement du pisé à base d'argile par l'ajout de sable de dune, gravier et grivlette par différents pourcentage, Cette étude technique est basée sur l'application des essais pour la caractérisation physiques et mécaniques de cette dernière.

Cette étude est lancée dans le but de caractérisation d'un pisé à base des matériaux locaux de la région de Ouargla à savoir l'argile de Baldat – Amor et l'argile d'El Hdjira, sable du dune de Sidi khouiled , gravier et grivlette de Ouargla .

Mots clé : Pisé , Argile , Sable de dune , Gravier , Grivlette, Résistance ,

RESUME

In the framework of valorization of the local materials in arid and semi-arid zones, one will choose the rammed earth as an object of reducer

This research topic consists of the objective of using clay for construction. The latter is abundant in the south-east of Algeria and presents properties that seem suitable for the design of buildings. The purpose of this project is to evaluate the behavior of rammed clay by adding sand dune, gravel and grivlette by different percentage, this technical study is based on the application of the tests for the physical and mechanical characterization of the latter.

This study is launched with the aim of characterizing a rammed mud made from local materials from Ouargla region, namely Baldat - Amor clay and El Hdjira clay, Sidi khouiled dune sand, gravel and Ouargla grivlette.

Keywords: Rammed earth, Clay, Sand dune, Gravel, Grivlette, resistance.

ملخص

في إطار تّمين المواد المحلية في المناطق الجافة والشبه الجافة، سنختار الجدار المرصوص كموضوع هذه الدراسة.

يهدف موضوع هذا البحث الى استخدام الطين كمادة للبناء. هذا الأخير وفيه في جنوب شرق الجزائر ويعرض خصائص تبدو مناسبة لتصميم المباني. الغرض من هذا المشروع هو تقييم سلوك الطين المرصوص عن طريق إضافة رمل الكتبان والحصى والجريفليت. بنسب مئوية مختلفة تستند هذه الدراسة الفنية إلى تطبيق اختبارات التوصيف الحراري والميكانيكي لهذه الأخيرة.

تم إطلاق هذه الدراسة بهدف توصيف الجدار المرصوص المصنوع من مواد محلية من منطقة ورقلة ، وهي طين بلدة عمر و طين الحجيرة ورمال سيدي خويلد والحصى والحصى الصغيرة من منطقة ورقلة.

كلمات البحث: الجدار المرصوص، طين ، رمل الكتبان ، الحصى ، الحصى الصغيرة ، الخصائص الحرارية الميكانيكية .

Introduction Générale

- La construction en terre demeure, et pour longtemps encore, le seul mode de construction logiquement et raisonnablement envisageable pour de nombreuses régions du continent qui ne disposent pas de ressources en matériaux en quantité suffisante ou des moyens d'en acquérir pour assurer le logement de tous leurs habitants.

Vis à vis de l'acceptation sociale, toute construction neuve tient à deux facteurs : d'une part la durabilité de cette construction, et d'autre part les coûts par rapport à l'existant.

- Les régions sahariennes d'Algérie qui sont caractérisées par un climat chaud et sec souffrent depuis longtemps de plusieurs problèmes en termes d'habitats et de constructions. Les constructions réalisées ne répondent en aucun cas aux exigences climatiques de ces régions. Les matériaux de construction utilisés sont souvent le béton ou des produits cimentaires tels que les parpaings ou les mortiers qui présentent des propriétés thermiques assez mauvaises. Pourtant ces régions possèdent plusieurs matériaux locaux (l'argile, le gypse ...) qui ont anciennement prouvé leurs efficacités thermiques et mécaniques.

- Ces matériaux locaux tels que la terre, gypse, le bois etc. ont servi fidèlement dans la construction de l'habitat social depuis le commencement de l'humanité.

- Dans cet objectif cette étude est lancée. D'un point de vue global le but de notre recherche est de confectionner une brique de pisé à base des matériaux locaux : à savoir l'argile de Baldet Amor et l'argile d'El Hdjira, le sable de dune de Sidi Khouiled ,gravier et grivlette de Ouargla. En suite procéder à sa caractérisation physique et mécanique.

L'organisation du travail s'est faite de la manière suivante :

- Le premier chapitre est propre à une recherche bibliographique qui présente les différents types de brique existante, les caractéristiques mécaniques et physiques. Et l'état de brique en terre crues et cuites utilisées dans les régions sahariennes.

- Le deuxième chapitre, est consacré à la caractérisation et étude comparatif des matériaux utilisés dans notre travail

-Le dernier chapitre expose l'étape expérimentale de notre travail qui consiste à confectionner des briques de pisé à base d'argile et de sable de dunes, gravier et grivlette, et à procéder à leurs essais mécaniques et physiques.

A l'issue des analyses et interprétations des résultats obtenus, le choix le plus adéquat a été fait sur les briques qui répondent aux exigences d'une bonne résistance à la compression, et de la bonne isolation thermique.

La présente thèse s'achève par une conclusion et quelques recommandations dans le souci de mieux valoriser ce nouveau type de matériau de construction.

Chapitre I :

Synthèse Bibliographique

Généralités sur les Techniques de
Production des Briques et leurs
Propriétés mécaniques.

Généralités sur les Techniques de Production des Briques et leurs Propriétés Thermomécaniques.

I.1. Introduction

La terre, matière première naturelle, est utilisée par l'homme dans la construction depuis des milliers d'années. Souvenez-vous de la grande muraille de Chine, des pyramides aztèques ou encore des ksours Algériennes. Sa transformation en matériau pour l'habitat ne nécessite que peu d'énergie et sa disponibilité quasi immédiate, lui confèrent encore aujourd'hui un succès incontestable.

La terre a toujours été utilisée pour bâtir sur notre planète, car elle est présente partout et directement sur le lieu de construction. On estime que 30% des habitations du monde sont construites à base de terre. [1]

I.2. Terre cuite

Les matériaux de terre cuite sont utilisés depuis plusieurs siècles dans le bâtiment. Ils se sont adaptés à l'évolution de la construction et à ses impératifs, dans le domaine traditionnel, Ils sont fabriqués à partir d'argiles communes devenant souvent rouges à la cuisson (sauf les argiles calcaires dont la couleur de cuisson varie du rose au jaune et au blanc) [2].

Le processus de production de la terre cuite se compose de différentes étapes :

- L'extraction des matières premières (argiles et limons).
- La préparation de l'argile.
- Le façonnage.
- Le séchage.
- La cuisson.

I.3. Produits de brique en terre cuite

I.3.1. Briques ordinaires

Les briques de terre ordinaire se présentent sous la forme de parallélépipèdes rectangles obtenus par extrusion « filage » ou éventuellement par pressage lorsqu'il s'agit de brique pleines. Selon la norme XP P13 305 la brique plein ordinaire se compose en deux catégories pleins ou perforés en terre cuite (figure I.1-I.2) [3,4].

- Brique plein : brique ne comprend aucune perforation et dont le format d'appellation le plus courant est dimensions: 250 x 120 x 55 mm.
- Brique perforée : Les briques perforées qui comportent au moins quatre conduits non débouchant sont fabriqués par voie demi-sèche. Ces briques doivent avoir les dimensions suivants 250x120x88-55mm.[3.4].

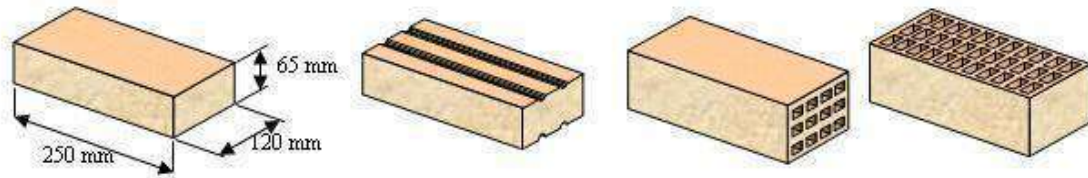


Figure I.1: Briques pleines et perforées

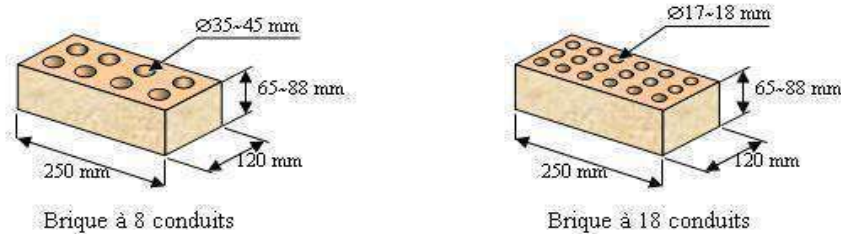


Figure I.2: Briques perforées.

Tableau I.1: La classe et la masse volumique des briques courantes.

| Classe | A | B | C | D |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------------|
| Masse volumique (Kg/m ³) | 700 -1000 | 1000 -1300 | 1300 -1450 | Supérieur de 1450 |

La capacité d'absorption d'eau d'une brique ne doit pas être inférieure à 8 %.

Tableau I.2: Dimensions et résistances des briques.

| | Dimensions courantes (mm) | | | Résistances moyennes | | |
|--|---------------------------|---------|----------|--|------------|-----|
| | Epaisseur | Largeur | Longueur | Catégorie | Résistance | |
| | | | | | MPa | bar |
| Briques pleines ou perforées | 40 | 105 | 220 | I | 20 | 200 |
| | 55 | 105 | 220 | II | 30 | 300 |
| | 60 | 105 | 220 | III | 40 | 400 |
| | 55 | 105 | 330 | | | |
| Tolérances sur briques calibrées : • 3% sur longueur et largeur. • 3mm sur la hauteur. | | | | 1 MPa = 10 bars. 1 bar = 10 N/cm ² . | | |

I.3.2. Briques poreuses

Les briques poreuses peuvent être fabriquées par la technologie traditionnelle en utilisant les argiles ordinaires, auxquelles on ajoute des additions fusibles (sciure de bois, tourbe pulvérisée, charbon pulvérisé).

L'emploi des briques poreuses permet de réduire les dépenses de transport et donc le prix des murs. Cependant la résistance d'une brique poreuse étant faible, ce type de briques ne peut pas être utilisé pour construire des murs supportant de fortes charges. Elles seront plutôt employées pour le remplissage des bâtiments à ossature métallique ou béton armé. [5.6.7]

I.3.3. Briques silico-calcaires

Les briques silico-calcaires sont essentiellement formés d'un mélange de matériaux siliceux finement broyés et de chaux hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ appelée chaux grasse (ou ciment portland) soumis généralement à un traitement à l'autoclave. Deux catégories de produits sont fabriquées et utilisées comme matériaux de construction [8].

a. Silico- calcaires denses

Le mélange de silice et de chaux ne constitue généralement pas un liant hydraulique à la température ambiante (la combinaison n'a lieu que si la silice est vitreuse et pouzzolanique), mais il n'en est pas de même en présence de vapeur d'eau sous pression.

Les premiers brevets, qui furent pris en 1880 par l'Allemand Michaelis, en 1886 par l'Anglais VAN Derburgh, étaient relatifs à la fabrication de briques silico-calcaire obtenues par un mélange soigneusement dosé de chaux et de silice, broyé puis moulé par pression et traité à la vapeur. La première application industrielle a été faite en Allemagne vers 1894. Les pays qui ont les plus fortes productions de produits silico-calcaires denses sont : La Russie, l'Allemagne et la France.

b. Silico- calcaires légers

Les briques silico-calcaires légers sont fabriquée à partir des mêmes matériaux que les silico-calcaires denses, mais avec ajout d'un constituant produisant des vides artificiels fermés, sous forme de bulles gazeuses obtenues par réaction chimique. Ils appartiennent à la classe des matériaux appelée Improprement béton cellulaire ou béton gaz.

Les premiers brevets datent de 1890, mais on considère souvent le Suédois J. A Eriksson comme le père de ces produits ; ses brevets datent de 1923 et il utilisa en 1929 le traitement à l'autoclave. Ces produits furent d'abord commercialisés en Suède en 1924 Danemark en 1928 et URSS en 1930. Les principes producteurs sont la Russie, le Japon, l'Allemagne, la Grande-Bretagne [8].

c. Les phénomènes physiques de processus d'autoclave

En conditions normales, la chaux mélangée avec le sable durcit très lentement. Les éléments obtenus après durcissement sont de résistance mécanique (de 1-2 MPa) et sont facilement détremés en présence d'eau. Mais en présence d'une vapeur saturée (100% d'humidité) à une température de 170°C et plus la silice du sable devient chimiquement active et commence à réagir rapidement avec la chaux, suivant la réaction (I.1), formant un hydrosilicate de calcium : un produit solide et résistant à l'eau.



Au fur et à mesure que la température s'élève la vitesse de réaction (I. 1) croit. Ce processus a lieu dans les autoclaves sous pression de la vapeur saturée (0.8 - 1.2 MPa) L'augmentation de température et de pression de vapeur est suivie par la dissolution des composants initiaux. La solubilité des constituants varie avec la température c'est à dire, la dissolubilité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ diminue avec l'augmentation de la température et celle du SiO_2 , H_2O (H_4SiO_4) augmente [9].

d. La Fabrication

- **Silico-calcaire denses**

Le mélange (5-12%) chaux vive (CaO) et sable propre de 0/5 mm et l'eau de l'ordre de (4 à 8 %) de la masse des matières sèches. Généralement des mélangeurs continus alimentent d'une façon régulière la matière comprimée ou comprimée – vibrée suivant les modèles de presses, sous des pressions variant de 15 à 45 MPa, exceptionnellement 60

MPa, après démoulage les produits sont traités dans des autoclaves durant de 6 à 14 h et la pression varie de 0,8 à 1,2 MPa (à 170 - 190°C environ) [8].

- **Silico-calcaire léger**

Ces matériaux sont obtenus par traitement à l'autoclave d'un mélange de sable siliceux (60 à 65%), de chaux et de ciment (35 à 40% pour l'ensemble), une multitude de petites cellules étant créées dans un mélange par dégagement gazeux résultant de l'addition, au moment du gâchage, de poudre d'aluminium.

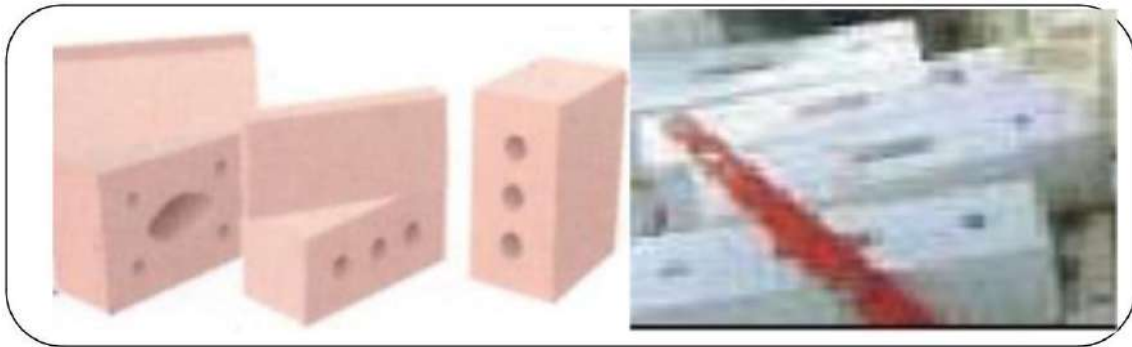


Figure I.3 Produit en briques silico-calcaire.



Figure I.4 Mur en brique silico-calcaire.

e. Propriétés de brique silico-calcaire

Les propriétés de brique silico-calcaire sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau I.3 : Propriétés de brique silico-calcaire.

| Type de brique SC | Brique silico-calcaire dense | Brique silico-calcaire léger |
|--|--|---|
| Masse volumique (kg/m ³) | 600 – 2200 | 300 – 800 |
| Résistance à la compression (Mpa) | 6 – 60 | 1.5 – 7 |
| Conductibilité thermique λ (w/m. °c) | Pour une masse volumique entre 1700-2100 (Kg /m ³) 1.16 -1.63 | Pour une masse volumique entre 0.08-300 (Kg /m ³) |
| Absorption d'eau | 4 à 8 % | - |
| Isolation acoustique | 48 Db | - |

f. Les avantages des briques silico-calcaires

Les briques silico-calcaires en général ont un très bon comportement au gel, leur non gélivité leur permet de bien résister à des températures pouvant atteindre 550°C.

➤ Les briques silico-calcaires ainsi que les briques cuites sont des matériaux de construction non inflammable [9].

➤ Les briques silico-calcaires sont en générale de même usage que les briques de terre cuite, mais avec certaine restriction, Il est interdit d'utiliser les briques silico-calcaires pour la pose des fondations et des socles parce qu'elles sont moins résistantes à l'eau que les briques de terre cuite [9].

La norme utilisée pour les briques silico-calcaire est (**DIN 106**), et la norme Française (**NF P 14 – 302**).

I.4. la terre crue

La terre crue est le matériau de construction traditionnel par excellence. On en retrouve la trace à l'âge de Bronze et la muraille de Chine présente des tronçons. De nombreux monuments inscrits au patrimoine mondial de l'humanité sont en terre crue: forteresses marocaines, pyramides d'Egypte..... [10]. Aujourd'hui encore, environ 40% de l'humanité habite des constructions en terre crue. Facilement mobilisable dans les régions ou pierre et bois manquent, sa mise en œuvre est simple et ne nécessite pas de matériel sophistiqué. De même sa mise en œuvre, sans transport, sans cuisson, sans processus de transformation industriel lui confère une empreinte écologique et bilan CO2 exceptionnel [10].

I.4.1. Histoire de la construction en terre crue

L'histoire de la construction en terre est mal connue. L'intérêt pour ce matériau jugé antique et médiocre était éclipsé par celui accordé à la pierre ou au bois, matériaux plus "nobles".

C'est pourtant bien la terre qui fut associée aux époques décisives de la révolution urbaine et qui servait la quotidienneté autant que le prestige des civilisations les plus glorieuses de l'Antiquité.

CHAPITRE I : Synthèse Bibliographique

Les trouvailles archéologiques de maintes contrées en témoignent. Les strates du temps n'ont pas pu effacer les preuves accumulées, tout juste dissimulées. L'époque actuelle soigne ses vestiges : les ruines sont révélées et relevées, classées, protégées et restaurées. Plus l'on remonte le cours de l'histoire et plus la terre semble être le matériau privilégié de l'homme bâtisseur, des âges les plus lointains jusqu'à nos jours.

La construction en terre fut indépendamment développée dans les principaux foyers connus de la civilisation dans les vallées inférieures du Tigre et de l'Euphrate, le long du Nil, sur les rives de l'Indus et du Huanghe. Ces régions fertiles furent propices à l'installation des communautés de chasseurs -collecteurs puis au développement de la révolution agricole. [11, 12]

Il existe plusieurs types de terre crue entre autres nous citons :

I.5. Les types de constructions en terre crue

I.5.1. L'adobe

a. Définition

Les premiers éléments de construction préfabriqués utilisés par l'homme étaient des briques moulées en terre crue appelées « adobes », une technologie utilisée depuis des millénaires partout à travers le monde. L'adobe est un matériau de construction fait d'un mélange de sable, d'argile, une quantité de paille hachée ou d'autre fibre. de nature assez argileuse (jusqu'à 30% de fraction fine), mais très sableuse, ajoutée d'eau jusqu'à obtenir un état de pâte semi ferme (15 à 30% d'eau). Chaque élément du mélange joue son rôle. Le sable réduit la probabilité de microfissures dans le bloc de terre, l'argile agglutine les particules et la paille hachée, quant à elle, donne un certain grade de flexibilité [13, 14,15].

Ce mélange est par la suite déposé à la main dans un moule en bois de façon à fabriquer des petits éléments de maçonnerie, la dimension requise pour être démoulé et séché directement au sol (Figure I.5).

La brique d'adobe peut varier d'une dimension de 15 X 25X 10 cm soit 30 X 60 X 10cm.

La construction en adobe est très répandue dans le monde, de la Chine aux pays du Moyen – Orient, de l'Afrique, à l'Amérique latine, en France et Etats Unis d'Amérique [13, 14,15]



Figure I.5 : Moulage et séchage des blocs adobes.

b. La production

La production des blocs d'adobe doit prendre en compte des étapes successives depuis l'extraction de la terre jusqu'au stockage final du matériau prêt à être utilisé en construction [9].

c. Modes de production de l'adobe

On distingue deux principaux modes de production des adobes, l'un manuel et l'autre mécanisé traduisant un mode de production traditionnel et un mode de production modernisé

c.1. Le mode de production manuel

• Moules simples

Il correspond à un moulage traditionnel soit par façonnage manuel ou à l'aide d'un moule Façonnée à la main, la terre est généralement utilisée à l'état de pâte plastique mi-ferme.

La terre peut être employée à deux états hydriques différents, soit sous forme de pâte mi-molle et selon une méthode dite du "coup d'eau" (moule préalablement nettoyé et mouillé pour faciliter le démoulage), soit sous forme de pâte mi-ferme et selon une méthode dite du "coup de sable" (le moule préalablement nettoyé et mouillé est sou-poudré de sable pour faciliter le démoulage). Dans ces deux techniques de moulage manuelles rendements moyens de production se situent de 400 à 600 blocs par jour pour deux ouvriers.

• Moules multiples

Il associe l'utilisation de grands moules à compartiments multiples, généralement en forme d'échelles ou de forme carrée subdivisée en petits compartiments et la livraison de la terre, à l'état assez liquide par brouettes, dumpers ou bulldozers à godet. Parfois la terre est directement déversée depuis le malaxeur qui est alors mobile et tracté par ou sur un camion.

CHAPITRE I : Synthèse Bibliographique

Les moules doivent être manipulés facilement par deux ouvriers (pas trop lourds) et doivent être propres et mouillés avant d'y déverser la terre. Compte tenu de l'état hydrique plus liquide de la terre, les adobes produites de cette façon présentent un risque de retrait et donc de fissuration plus importante.

Il convient donc de compenser ce risque en utilisant une terre dont la texture est riche en gros sables et petits graviers. L'organisation de la production mécanisée se fait autour de deux principaux postes qui sont le malaxage et le moulage et mobilise 5 à 6 ouvriers selon la taille des unités, La production moyenne pour ce type d'organisation est de l'ordre de 8000 à 10 000 blocs par jour [9].

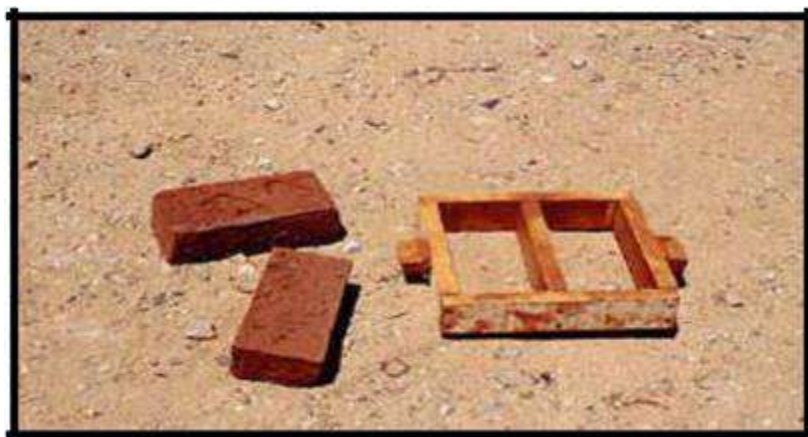


Figure I.6 : Moule de l'adobe.

c.2. Le mode de production mécanisé

La production mécanisée de blocs d'adobe a été développée dès la fin du XIX siècle, aux Etats Unis d'Amérique, notamment par un fabricant californien, Hans Sumpf. Celui-ci mettait au point une machine tractée par un animal domestique dans un premier temps puis motorisée et munie de pneus, dotée d'un système de trémie mobile au-dessus d'un moule à compartiments multiples (25 moules) recevant directement la terre et déposant au sol les 25 blocs successivement moulés. Ce type de machine permet une production pouvant aller de 20 à 30 000 blocs par jour.

d. Les produits

Les produits de la fabrication des adobes, manuelle ou mécanisée, sont extrêmement variés. Ils sont le plus souvent directement tributaires des savoir-faire traditionnels et varient quant au type de terre utilisée, au mode de moulage, aux dimensions des blocs (très changeantes) et aux destinations d'emploi plus ou moins spécifiques (blocs spéciaux). Les moules utilisés sont généralement en acier ou en bois (le plus souvent) et de forme très variée. Les dimensions les plus fréquentes de 40 x40x15 cm ou 40x30x15 cm, ou 40x20x10 cm...). On distingue globalement trois principaux types de produits : Produits classique, produits spéciaux, produits antisismiques [9,16].

e. Les avantages de l'adobe

L'adobe possède plusieurs avantages par rapport aux matériaux industriels qui se résume en :

- Il a la capacité de régulariser l'humidité de l'air.
- D'emmagasiner la chaleur.
- Réduire la consommation d'énergie.
- De ne produire virtuellement aucune pollution.
- Construction peu coûteuse.
- N'entraîne pas la production de gaz [13].

f. Les inconvénients de l'adobe

- Fragile.
- Nécessite des travaux d'entretien.

I.5.2. La brique de terre crue compressée (BTC)

La brique de terre compressée est un béton de terre composé de graviers, sables, et d'éléments fins (limons et argiles). On utilise ensuite des presses pour comprimer la brique manuelles ou motorisées, à transmission mécanique, hydraulique ou pneumatique. Le joint que l'on utilise pour assembler les briques est généralement constitué d'un mortier de chaux, sable et terre (argile). La capacité de charge de ce type de mur est d'environ 700 psi (48 bars) lorsqu'il est juste fini, peut atteindre 1000 psi (68 bars) une fois séché, et entre 2500 à 3900 psi (172 à 268 bars) mélangé à du ciment, sachant que les normes recommandent une capacité de charge de 300 psi (20,6 bars). [17, 18,6]



Figure I.7 : Brique de terre compressée.

a. Production des blocs de terre comprimée

La production des blocs de terre comprimée peut être assimilée à celle des blocs de terre cuite produits pas compactage, exception faite de la phase de cuisson. L'organisation de la production sera selon qu'elle est réalisée dans le cadre de petites unités de production artisanales (ou briqueteries) ou bien dans le cadre d'unités de production semi-industrielles ou industrielles.

CHAPITRE I : Synthèse Bibliographique

Les aires de production, de séchage et des stockages varient également selon les modes de production adoptés et les conditions de production issues de l'environnement climatique, social, technique et économique [18].



Figure I.8 ; I.9: Brique de terre crue compressée par une presse manuelle.

b. Techniques de constructions

Pour la fabrication des BTC, divers types de presses sont disponibles à l'achat ou à la location : De la presse manuelle qui convient pour un usage personnel et pour auto-constructeurs, jusqu'à la presse motorisée, à transmission mécanique, hydraulique ou pneumatique pour un usage professionnel intensif.

- Il est indispensable de mouiller chaque brique avant de l'installer.
- N'empilez trop de rangées, préférez l'installation d'un rang ou deux sur une plus grande longueur. En effet, sous le poids des briques le mur est très instable, en tous cas jusqu'au séchage du mortier.

L'utilisation du ciment comme additif peut réduire le temps de séchage.

c. Avantage

- La BTC est un matériau écologique : composée essentiellement d'argile, sable et gravillons et d'un peu de ciment, fabriquée sans cuisson.
- La BTC procure un confort thermique et phonique excellent : de part son inertie thermique et sa masse, un mur en BTC apporte confort thermique et isolation phonique
- La BTC offre une grande résistance : la résistance à la compression d'une BTC dépasse les 60 bars (60kg/cm²)
- La BTC présente un intérêt architectural et esthétique : en cloison, en mur porteur, la BTC permet une richesse de formes, et de motifs variés dans son utilisation.
- La BTC est simple à mettre en œuvre : la BTC se monte avec un mortier de terre amendé. Les règles de construction sont simples à suivre [6].

d. Inconvénients

- Fabrication des briques longue et fatigante
- Fragilité : au moindre choc la brique se brise ou s'effrite

- Se détériore sous l'effet du gel

I.5.3. Le Pisé

La définition la plus connue et la plus souvent citée est celle de F. Cointeraux dans "Ecole d'architecture rurale et économique, Paris 1790" [5] : "Le pisé est un procédé d'après lequel on construit les maisons avec de la terre, sans la soutenir par aucune pièce de bois, et sans la mélanger ni de paille ni de bourre. Il consiste à battre, lit par lit, entre des planches, à l'épaisseur ordinaire des murs de moellons, de la terre préparée à cet effet. Ainsi battue elle se lie, prend de la consistance, et forme une masse homogène qui peut être élevée aux hauteurs nécessaires pour une habitation".

Le pisé est donc une technique de maçonnerie de mur en terre crue monolithique coffrée, composée de couches superposées de terre compactée. Le mur obtenu est un mur porteur. Il a 50 cm d'épaisseur en moyenne, parfois plus. La densité du pisé traditionnel est d'environ 1,7 à 1,9 t/m³ [17]. Les édifices en pisé ont couramment deux niveaux. Certains, notamment en milieu urbain, peuvent présenter trois voire quatre niveaux.

I.5.3.1. Pisé traditionnel

La technique de construction en pisé est variée suivant les régions, et elle change aussi suivant le fil du temps. Aujourd'hui, on distingue principalement deux types de pisé : les pisés traditionnels et les pisés modernes qui sont fabriqués à partir des années 1980. [17]



Figure I.10 Château Chabert, XVIIIe siècle.

Le pisé traditionnel est fabriqué par des coffrages en bois et une dame manuelle. Il est monté sur un soubassement en maçonnerie (pierre, brique, galets) appareillée, hordée au mortier de chaux. Cette maçonnerie a environ 50 cm de haut [17]. Pourtant, elle peut être plus importante dans des cas particuliers : les étables, les écuries, etc. (le pisé risque d'être érodé par le passage des animaux) et quand le climat est à tendance humide, le soubassement protège alors le pisé des projections d'eau et des remontées d'humidité par capillarité. Dans la Figure. I.11, on peut voir le soubassement d'une maison traditionnelle de 130 ans en région Rhône-Alpes.



Figure I.11 Maison ancienne de 130 ans.

Pour les raisons historiques et géographiques, liées en particulier aux travaux de François Cointreau, on considère le pisé du Lyonnais comme la référence première, en ce qui concerne tant les outils que la mise en œuvre [17]. Les pratiques de l'Auvergne et du Bugey apparaissent donc comme les variantes régionales. Les Figure. I.12 et I.13 illustrent la mise en œuvre du coffrage du pisé suivant les méthodes lyonnaise et de Bugey, respectivement. Avec la méthode de mise en œuvre de Bugey, on peut éviter les trous sur le mur. Ce système présente l'avantage de la rapidité, mais il ne permet d'édifier que des constructions de hauteur limitée, et le matériel nécessaire à sa mise en œuvre est encombrant et difficile à transporter.

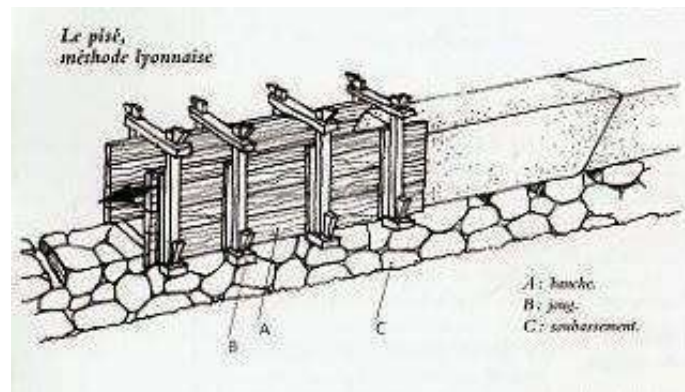


Figure I.12 Mise en œuvre du coffrage du pisé suivant la méthode lyonnaise.

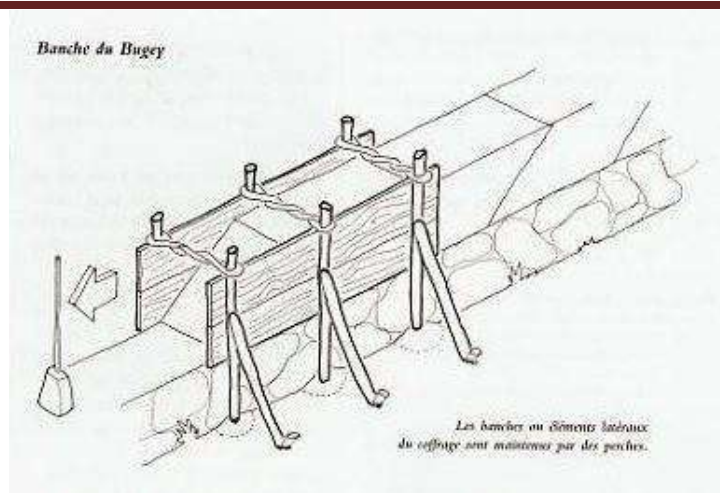


Figure I.13 Mise en œuvre du coffrage du pisé suivant la méthode du Bugey.

Dans la fabrication du pisé traditionnel, des cordons de mortier de chaux (les liens ou joints) peuvent être appliqués en fond de banche, sur les côtés (ils ne traversent pas le mur), afin de renforcer la ligne de jointure horizontale entre banches, zone plus difficile à tasser. Une fois la banchée terminée, on peut la décoffrer immédiatement et attaquer la banchée voisine. Les murs sont montés par assises successives ; pour en améliorer la cohésion, le maçon doit prendre soin de « croiser » ses coups de pisoir, en faisant tourner l'outil entre chaque coup, et de croiser les banches, c'est-à-dire d'adopter un sens de construction opposé d'une assise du mur à l'autre. La Figure. I.14 nous donne un exemple de deux types de joints sur une même maison. A gauche, les joints de chaux sont inclinés et la hauteur du soubassement est faible. A droite, les joints sont verticaux et un soubassement important est observé.



Figure I.14 Les deux techniques différentes appliquées sur une même maison.

C'est vers le milieu du XVIIIe siècle que les joints de chaux deviennent systématiques et le raccord entre les banchées s'incline jusqu'à atteindre plus ou moins 45° : cette technique, combinée au croisement des assises (les raccords de deux assises superposées sont inclinés en sens contraire), éviterait la fissuration du mur. L'observation sur

CHAPITRE I : Synthèse Bibliographique

le terrain montre que, dans la réalité, un même mur peut présenter des raccords verticaux et inclinés, cela étant certainement du à la plus grande difficulté qu'il y avait à faire les seconds.

I.5.3.2. Pisé moderne

Depuis les années 1980, le pisé redevient un mode de construction dans le monde. Ces pisés "modernes" ne reproduisent pas à l'identique les procédés de construction anciens. La terre est mise en œuvre avec les apports de la technologie moderne pour aboutir à des logements ayant au moins le standard du confort actuel. La Figure. I.15 présente un exemple d'une maison en pisé construite dans les années 1980 au "Domaine de la Terre", en région Rhône-Alpes, France.

La technique du pisé actuel est une "technique ancienne modernisée". Donc, les spécificités du pisé moderne seront présentées plus en détail dans les sections suivantes.



Figure I.15 Maison en pisé moderne construite au cours des années 1980.

a- Compactage par une dame pneumatique

La dame manuelle en bois dans le cas du pisé traditionnel est remplacée par une dame pneumatique plus puissante qui permet d'augmenter la rapidité de la fabrication et la densité du pisé moderne. La Figure. I.16 présente l'exemple des dames pneumatiques modernes. La dame en général est en métal sous forme circulaire mais elle peut être modifiée par l'ajout d'une plaque de bois carrée suivant les besoins.



Figure I.16 La dame pneumatique en métal.

b- Mise en œuvre de coffrages du pisé moderne

Les coffrages actuels sont plus larges que les coffrages traditionnels pour la rapidité de la fabrication sur chantier. Ils sont aussi plus rigides pour supporter le damage plus fort de la dame pneumatique (actuellement ils sont en général en métal, (Figure. I.17).



Figure I.17 Coffrage métallique du pisé moderne.

c- Préfabrication du pisé moderne

La préfabrication s'est aussi développée. Les Figures. I.18, I.19 et I.20 présentent la fabrication des pisés fabriqués en usine, leur transport et mise en œuvre.



Figure I.18 Préfabrication des pisés dans une usine.



Figure I.19 Transport et mise en œuvre des éléments préfabriqués.



Figure I.20 Un bâtiment construit par 160 éléments préfabriqués.

a. Les avantages de pisé

La terre possède de multiples qualités dans le domaine du bâti :

- Régulateur d'humidité : capacité à laisser transiter la vapeur d'eau.
- Durée de vie : patrimoine de bâtiments centenaires très présents.
- Déphasant : il ralentit le transfert de chaleur (et permet un confort d'été indéniable).

CHAPITRE I : Synthèse Bibliographique

- Élément de forte inertie, c'est-à-dire qu'il a une bonne capacité de stocker la chaleur et de la restituer par rayonnement.
- Bonne isolation phonique et qualité acoustique.
- Reprise aisée, mais nécessitant un savoir-faire [5].

b. Les inconvénients de pisé

- Travaux d'entretien annuels.

I.6. Les Caractéristiques des briques en terre crue

Les caractéristiques des briques de terre crue sont représentées dans le tableau suivant : [18]

Tableau I.4 : les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, BTC et pisé).

| Caractéristiques | Types de briques de terre crue | | |
|--|--------------------------------|--|--|
| | Adobe | Pisé | BTC |
| Masse volumique (kg/m ³) | 1200 – 1700 | 1700 – 2200 | 1700 – 2200 |
| Résistance à la compression (MPa) | 2 - 5 | < 2 | < 2,4 |
| Résistance à la traction (MPa) | - | 0,5 – 1 | - |
| Conductivité thermique λ (W/m°C) | 0,46 – 0,81 | 0,81 – 0,93 | 0,81 – 1,04 |
| Chaleur spécifique (J/Kg°C) | 900 | 850 | - |
| Capacité thermique (KJ/m ³ °C) | 1350 | 510 | - |
| Absorption d'eau (%) | 5 | 10 – 20 | 10 – 20 |
| Isolation acoustique (dB) | - | 50 dB pour 40cm 40 dB pour 20cm | 50 dB pour 40cm 40 dB pour 20cm |
| Retrait au séchage (mm/m) | 1 | 1 – 2 | 0,2 - 1 |

I.7. Conclusion

Le but de cette étude bibliographique, est de connaître les différents types de briques de terre crue et cuite existants dans le domaine de construction et les différentes méthodes de fabrication ; Ainsi que leurs développements dans l'histoire de la construction. Et les caractéristiques physiques et mécaniques de chaque type de ces briques.

Nous avons constaté que la Construction en terre comporte une palette très large d'avantages : propriété mécanique, propriété thermique avec une excellente isolation, hygiénique, respect de l'environnement. A la vue de ces caractéristiques, il est logique de se demander pourquoi ce matériau n'est pas plus utilisé et généralisé dans les pays riches.

La construction d'habitations en terre souffre aujourd'hui de préjugés car la terre est méconnue ou mal connue des gens qui ignorent ses propriétés intéressantes. Elle est associée dans les esprits, à un matériau fragile et peu évolué technologiquement.

CHAPITRE I : Synthèse Bibliographique

La maison en terre n'est certes pas la seule et l'unique solution à nos questions de développement durable mais mérite d'être étudiée avec grand intérêt par beaucoup de gens.

Notre travail de recherche, consiste à valoriser l'argile et le sable des dunes de la région de Ouargla par son incorporation et utilisation pour la confection d'un pisé. Dans notre travail on a choisi gravier et grivlette pour confectionner une pisé à base de ces matériaux. La région de Ouargla est un exemple des régions chaudes et sèches de notre pays, est un exemple aussi d'une région ou au passé en construit en terre et en pierres locaux (Ksores) ; mais malheureusement ces dernier temps on construit en béton ;un matériaux pas adapté aux conditions climatiques.

Chapitre II

Caractérisation des Matériaux Utilisés.

Caractérisation des Matériaux Utilisés.

II.1. Introduction

"Un sol argileux est un sol dont le comportement mécanique est essentiellement fonction des propriétés physico-chimiques de ses particules" (Giroud et Bottero, 1972).

Dans ce chapitre, nous étudions les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la fabrication des pisées suivants :

- L'argile
- Le sable de dune
- Le gravier
- L'eau

II.2. L'Argile

L'argile est une roche sédimentaire, composée pour une large part des minéraux spécifiques, silicates en général d'aluminium plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée (phyllosilicates) qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse (sépiolite et palygorskite) qui explique leurs qualités d'absorption. On désigne par argile les matériaux de granulométrie inférieurs à 2 μm .

Pour notre étude nous avons utilisé l'argile de Touggourt le gisement de Beldet Amor et l'argile d'El Hdjira .

Nous avons effectué les essais suivants sur l'argile :

- Analyse granulométrique sédimentation.
- Densité sèche.
- Bleu de méthylène
- Limite d'Atterberg
- Analyse chimique.
- Diffraction des rayons X

Ces essais sont réalisés au niveau de laboratoire de génie civil de l'UKMO et laboratoire des travaux publics de sud L.T.P.S Ouargla.

II.2.1. Argile de Beldet Amor

II.2.1.1. Analyse granulométrique par sédimentation

Selon la norme NF P94-056/ NF P94-057, l'analyse granulométrique par sédimentation est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage, l'essai a pour objet de détermination de la distribution pondérale de la taille des particules fines de sols de dimension inférieure à 0,08mm. [19]

CHAPITRE II : Caractérisation des Matériaux Utilisés

Les résultats d'analyse granulométrique par tamisage (la norme NF P 94-056) et l'analyse granulométrique par sédimentation (la norme NF P 94-057) sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau II.1: Analyse granulométrique d'argile Beldet Amor

| Analyse par | Diamètre de tamis (mm) | Tamisât % |
|---------------|------------------------|-----------|
| tamisage | 5 | 100 |
| | 2 | 100 |
| | 1 | 100 |
| | 0,4 | 99 |
| | 0,2 | 98 |
| | 0,1 | 93 |
| | 0,08 | 92 |
| | 0,075 | 92 |
| sédimentation | 0,055 | 90 |
| | 0,038 | 90 |
| | 0,025 | 90 |
| | 0,017 | 90 |
| | 0,012 | 90 |
| | 0,008 | 78 |
| | 0,006 | 72 |
| | 0,004 | 28 |
| | 0,003 | 8 |
| | 0,002 | 0 |
| | 0,001 | 0 |
| | 0,0005 | 0 |

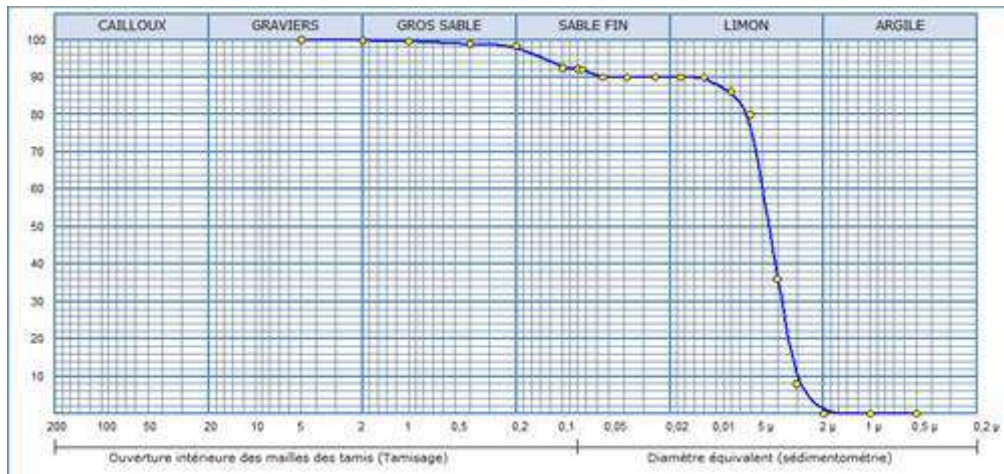


Figure II.1 : Courbe granulométrique d'argile (Beldet Amor)

Les résultats de l'analyse granulométrique par sédimentation montre que notre sol est constitué environ de :

=02% gros sable

=08% sable fin

=90% limon

II.2.1.2. Essai de Densité sèche

Le résultat de la densité sèche est mesuré selon la norme NF P 94/064.

- La densité sèche $P = 1.91 \text{ g/cm}^3$

II.2.1.3. Essai au Bleu de méthylène

Selon la norme (NF EN 933-9), cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à absorber de bleu de méthylène tant absorbé préférentiellement par l'argile, les matières organiques et les hydroxydes de fer cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments. [19]

On appelle « valeur de bleu » des fines, la quantité exprimée en gramme de bleu de méthylène, elle est donnée par la formule suivante :

$$VBS = 10 \frac{V}{m} \dots\dots\dots (II.1)$$

- La valeur du bleu du sol est (sans unité)

Avec

- V : Volume de bleu ajouté en cm^3 ;
- m : la masse de l'échantillon en gramme;

On distingue les valeur suivantes :

- $VBS \leq 0,2$:sols sableux (sol insensible à l'eau).
- $0,2 < VBS \leq 2,5$:sols limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau).
- $2,5 < VBS \leq 6$:sols limono-argileux, (sol de plasticité moyenne).
- $6 < VBS \leq 8$:sols argileux.
- $VBS > 8$:sols très argileux.

Le VBS de l'argile utilisé est égale 8 ;donc un sol argileux.

II.2.1.4. Essai de Limite d'Atterberg

Selon la norme NF P 94-051, les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales, caractéristiques du sol. Elles correspondent à des comportements particuliers de celui-ci sous l'action des variations de la teneur en eau. Ces limites sont déterminées sur la fraction de sol passant au travers du tamis 400 μm . [19]

Les deux limites utilisées sont : [19]

WL : limite de liquidité : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide et un état plastique.

WP : limite de plasticité : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide.

A partir des résultats obtenus, nous déterminons l'indice de plasticité. (FigureII.2). [19]

IP : indice de plasticité : Cet indice définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité :

$$IP = WL - WP \dots\dots\dots (II.2)$$

CHAPITRE II : Caractérisation des Matériaux Utilisés

Les teneurs en eau étant exprimées en pourcentage, l'indice de plasticité est un nombre sans dimension.

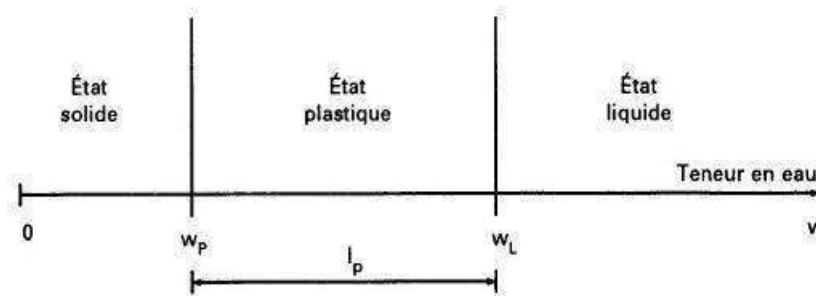


Figure II.2 : Présentation des limites d'Atterberg.

- **Classification des argiles selon les limites d'ATTERBERG :**

Les argiles sont classées suivant leur plasticité ; BURMISTER (1967) propose une classification détaillée de la plasticité des argiles en fonction de l'indice de plasticité. (Tableau II.2) [19]

Tableau II.2: Classification des argiles selon Burmister.

| I_p (%) | 0 | 1 à 5 | 5 à 10 | 10 à 20 | 20 à 40 | >40 |
|-------------------|---------------|--------|--------|---------|---------|-------------|
| <i>Plasticité</i> | Non plastique | Légère | Faible | Moyenne | Élevé | Très élevée |

Atterberg (1973) classe la plasticité des argiles en trois niveaux comme montrés dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Classification des argiles selon Atterberg.

| I_p (%) | <7 | 7 à 17 | >17 |
|-------------------|--------|---------|--------|
| <i>Plasticité</i> | Faible | Moyenne | Elevée |

Les résultats obtenus des limites d'Atterberg sont :

$$W_L = 69,58 \%$$

$$W_P = 24,71 \%$$

$$I_P = 44,87 \%$$

D'après Atterberg et Burmister, on peut classer notre argile par son indice de plasticité ($I_P = 44,87$) la nature de l'argile est une argile très plastique.

II.2.1.5. Analyse chimique

Les principaux résultats de l'analyse chimique réalisée au laboratoire de travaux public de L.T.P.Sud OUARGLA sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau II.4 : Analyse chimique d'argile (Beldet Amor).

| | Composants | Pourcentages(%) |
|----------------------------------|--|------------------------|
| <i>Insolubles NF P 15 – 461</i> | Insolubles | 73 |
| <i>Sulfates BS 1377</i> | SO ₃ | 1 |
| | Ca SO ₄ / 2H ₂ O | 4 |
| <i>Carbonates NF P 15 – 461</i> | CaCO ₃ | 21 |
| <i>Chlorures méthode de MOHR</i> | Cl ⁻ | 0 |
| | NaCl | 1 |

II.2.1.6. Essai de Diffraction des rayons X, (DRX)

La diffraction des rayons X (DRX, abréviation de l'anglais « *X-ray diffraction* ») est une puissante technique sans effets destructeurs destinée à caractériser les matériaux cristallins. Elle donne des informations sur les structures, les phases, les orientations privilégiées du cristal (texture) et d'autres paramètres structuraux comme la taille moyenne du grain, la cristallinité, la tension et les défauts des cristaux.

Les pics de diffraction des rayons X sont produits par interférence constructive d'un faisceau monochromatique de rayons X diffusé à des angles spécifiques de chaque jeu de plans réticulaires compris dans un échantillon.

Les intensités des pics sont déterminées par la distribution des atomes à l'intérieur du réseau. Par conséquent, le schéma de diffraction des rayons X est l'empreinte digitale du dispositif atomique périodique dans un matériau donné.

Une recherche dans la base de données standard ICDD des schémas de diffraction des rayons X permet de faire une identification rapide de phase dans une grande quantité d'échantillons cristallins.



Figure II.3 Machine de diffraction des rayons X.

a. PRINCIPALES applications de l'analyse DRX

CHAPITRE II : Caractérisation des Matériaux Utilisés

- Identification/quantification de la phase cristalline
- Mesure de la taille moyenne du cristal, de la tension ou des effets de micro tension dans les échantillons de densité globale et dans les échantillons de couche mince
- Quantification de l'orientation privilégiée (texture) dans les couches minces, dans les piles multicouches et dans les pièces fabriquées
- Détermination du ratio de matériaux cristallins par rapport aux matériaux amorphes dans les matériaux à densité globale et dans les échantillons à couche mince

La figure II.4 représente les résultats obtenus pour l'argile de Beldet Amor

Cette étude a été réalisée dans le laboratoire de physique à l'Université de Kasdi Merbah Ouargla

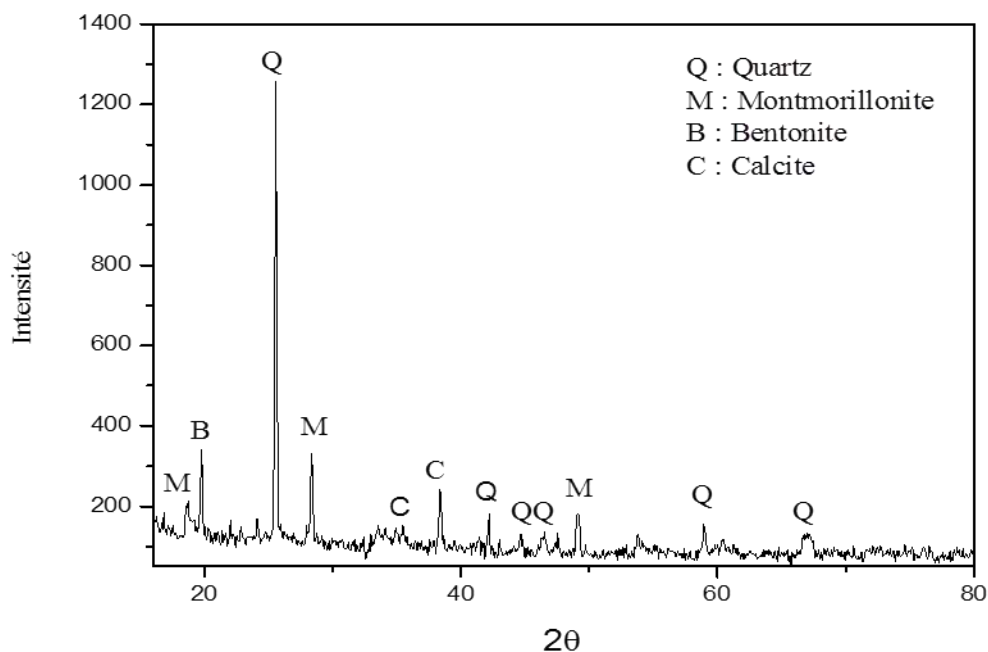


Figure II.4 Analyse diffractométrie de l'argile Beldet Amor.

L'échantillon est constitué essentiellement de minéraux associés de quartz et de la Montmorillonite, ainsi d'autres phases qui ne sont pas à écarter. Les intensités de ce diffractogramme montrent que le quartz est la phase dominante, en effet les pics 42.20, 55.02, 60.36, 76.04 (2θ), sont caractéristiques de ce matériau, de même pour la Montmorillonite, sa présence dans l'échantillon est déterminée par les principaux pics à 19.76, 24,11, 35.53 et à 53.87 (2θ).

II.2.2. Argile d'El Hdjira

II.2.2.1. Analyse granulométrique par sédimentation

Les résultats d'analyse granulométrique par tamisage (la norme NF P 94-056) et l'analyse granulométrique par sédimentation (la norme NF P 94-057) sont représenté sur le tableau suivant :

Tableau II.5 : Analyse granulométrique d'argile El Hdjira

| Analyse par | Diamètre de tamis (mm) | Tamisât % |
|---------------|------------------------|-----------|
| tamisage | 5 | 100 |
| | 2 | 100 |
| | 1 | 99 |
| | 0,4 | 98 |
| | 0,2 | 95 |
| | 0,1 | 82 |
| | 0,08 | 76 |
| sédimentation | 0,075 | 76 |
| | 0,055 | 66 |
| | 0,038 | 64 |
| | 0,025 | 62 |
| | 0,017 | 61 |
| | 0,012 | 59 |
| | 0,008 | 57 |
| | 0,006 | 55 |
| | 0,004 | 52 |
| | 0,003 | 52 |
| | 0,002 | 35 |
| | 0,001 | 7 |
| | 0,0005 | 4 |

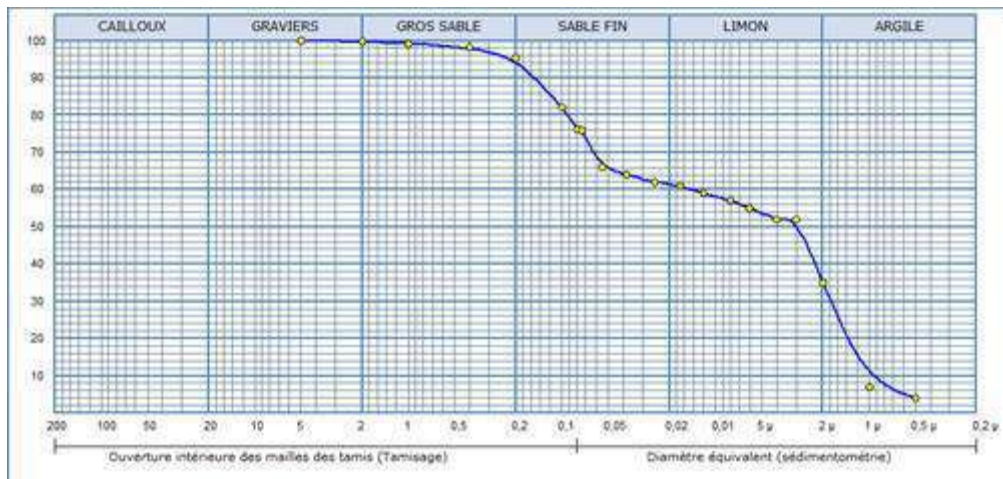


Figure II.5 : Courbe granulométrique d'argile (El Hdjira).

Les résultats de l'analyse granulométrique par sédimentation montre que notre sol est consisté environ de

=05% gros sable

=33% sable fin

=27% limon

=35 % argile

II.2.2.2. Essai de Densité sèche

Le résultat de la densité sèche est mesuré selon la norme NF P 94/064.

- La densité sèche $P = 2.06 \text{ g/cm}^3$

II.2.2.3. Essai au Bleu de méthylène

Selon la norme (NF EN 933-9),

Le VBS de l'argile utilisé est égale 8 ; donc un sol argileux.

II.2.2.4. Essai de Limite d'Atterberg

Selon la norme NF P 94-051.

Les résultats obtenus des limites d'Atterberg sont :

$$WL = 46.50 \%$$

$$WP = 21.21 \%$$

$$IP = 25.29 \%$$

D'après Atterberg et Burmister, on peut classer notre argile par son indice de plasticité ($IP = 25.29$) la nature de l'argile est une argile très plastique.

II.2.2.5. Analyse chimique

Les principaux résultats de l'analyse chimique réalisée au laboratoire de travaux public de L.T.P.Sud OUARGLA sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau II.6 : Analyse chimique d'argile.

| | Composants | Pourcentages(%) |
|----------------------------------|--|-----------------|
| <i>Insolubles NF P 15 – 461</i> | Insolubles | 84 |
| <i>Sulfates BS 1377</i> | SO ₃ | 1 |
| | Ca SO ₄ / 2H ₂ O | 3 |
| <i>Carbonates NF P 15 – 461</i> | SO ₄ | 1 |
| <i>Chlorures méthode de MOHR</i> | NaOH | 10 |
| | NaCl | 1 |

II.2.2.6. Essai de Diffraction des rayons X, (DRX)

La courbe représente les résultats obtenus pour l'argile de El Hdjira

Cette étude a été réalisée dans le laboratoire de physique à l'Université de Kasdi Merbah Ouargla

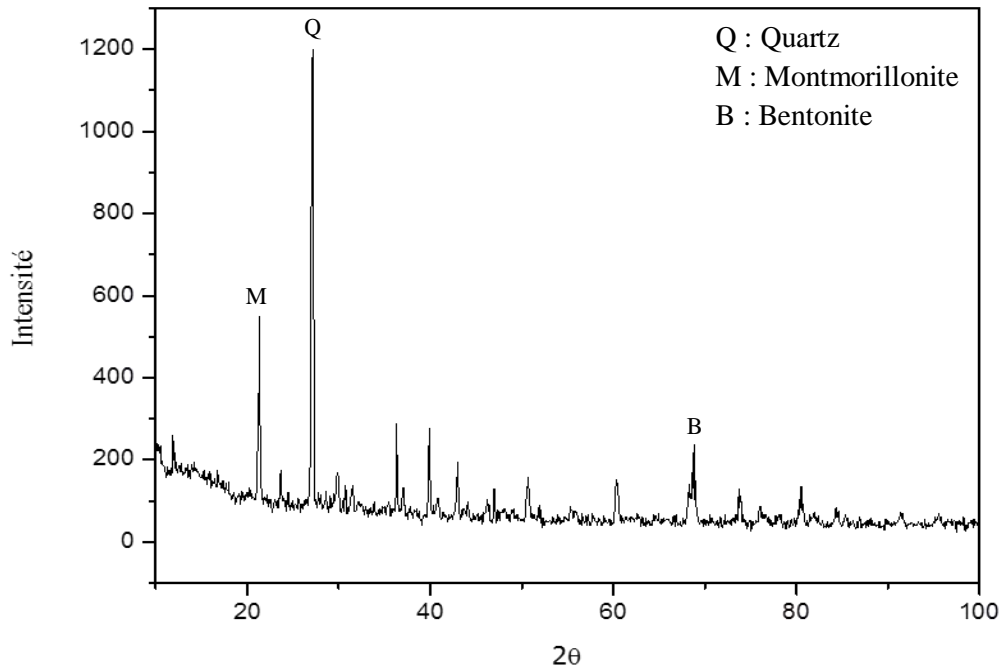


Figure II.6 Analyse diffractométrie de l'argile El Hdjira.

D'après La figure II.6 qui représente le diffractogramme de l'argile.

Nous constatons que l'échantillon argileux est constitué essentiellement de minéraux associés de quartz et de Montmorillonite, ainsi que la Bentonite.

II.3. Le sable des dunes

Le sable des dunes est le résultat d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivi d'un transport fluviatile et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constitué de quartz. Il est caractérisé par une granulométrie fine et très serrée. Pour notre étude nous avons utilisé le sable des dunes de Sidi-Khouiled (OUARGLA).



Figure II.7 : Sable des dunes.

Nous avons effectué les essais suivants :

- Analyse granulométrique.

CHAPITRE II : Caractérisation des Matériaux Utilisés

- La masse volumique absolue.
- La masse volumique apparente.
- Equivalent de sable.
- Analyse chimique.

Ces essais sont réalisés au laboratoire de travaux publics de sud L.T.P.S Ouargla, pour tous les essais nous avons utilisées trois échantillons dans chaque caractéristique.

II.3.1. Analyse Granulométrique

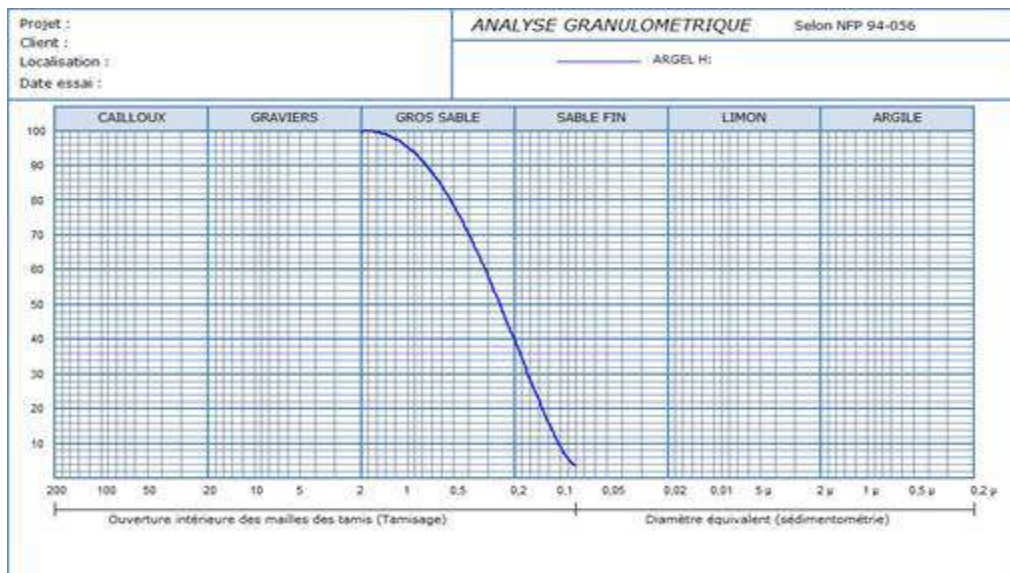
L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. [19]

L'échantillon représentatif doit avoir une masse comprise entre 200D et 600D, ou D est la plus grande dimension des granulats dans notre cas nous avons pris 300 g. Les résultats obtenus sont présentes sur le tableau suivant :

Tableau II.7: Résultats d'analyse granulométrique de sable des dunes.

| Ouverture de tamis | Refus cumulé en % | Tamisât en % |
|--------------------|-------------------|--------------|
| 5 | 0 | 100 |
| 2 | 0 | 100 |
| 1 | 0 | 100 |
| 0,4 | 6.47 | 94 |
| 0,2 | 69.52 | 30 |
| 0,1 | 95.49 | 5 |
| 0,08 | 96.29 | 4 |



- Nous pouvons dire que le sable a une granulométrie très serrée.

II.3.2. Module de finesse

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (M_f). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis 5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315, 0.16. [19]

$$M_f = \sum R_c / 100 \quad \dots\dots\dots (II.3)$$

R_c : refus cumulé en (%) sous les tamis 0.16 à 5 ;

Pour le sable utilisé dans notre étude on a trouvé la valeur suivante :

$$M_f = 1,224$$

Pour notre échantillon, et d'après la valeur du M_f qu'est égal à 1.224, on conclut que ce sable est un sable très fin ayant une granulométrie serrée

II.3.3. Essai de Masse volumique absolue

C'est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le sable sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains, elle est donnée par la formule suivante :

$$\rho_s = \frac{M_t}{V_a} \quad \dots\dots\dots (II.4)$$

ρ_s : Masse volumique absolue ;

M_t : Masse totale d'échantillon ;

V_a : Volume absolue d'échantillon ;

La masse volumique absolue du sable utilisé est égale $\rho_s = 2570 \text{ kg/m}^3$

II.3.4. Essai de Masse volumique apparente

La masse volumique apparente du sable, c'est la masse à l'état naturel du matériau rapportée à l'unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides, elle est donnée par la formule suivante :

$$\rho_a = \frac{M}{V} \quad \dots\dots\dots (II.5)$$

ρ_a : Masse volumique apparente ;

M : Masse totale de l'échantillon ;

V : Volume total de l'échantillon.

La masse volumique apparente du sable utilisé est égale $\rho_a = 1520 \text{ kg/m}^3$

II.3.5. Essai de Equivalent de Sable

L'essai d'équivalent de sable permet de manière courante pour évaluer la propreté des sables. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossier. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient

CHAPITRE II : Caractérisation des Matériaux Utilisés

d'équivalent de sable qui quantifie celui-ci l'essai effectué sur fraction 0/5 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout au bout de 20 minutes on mesure les éléments suivants : [19]

- h₁ : hauteur de sable propre + éléments fines (floculant).
- h₂ : sable propre seulement.

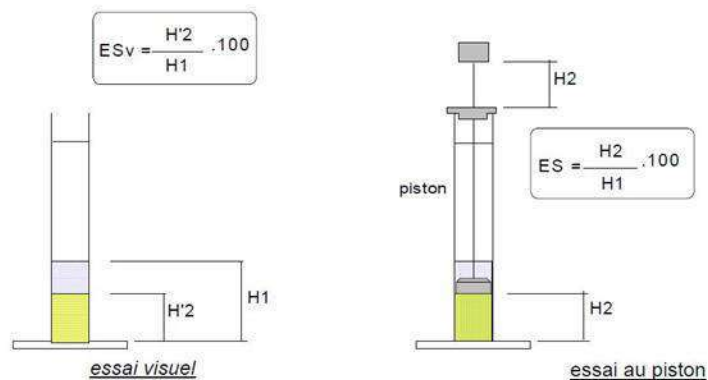


Figure II.9: Définition de l'équivalent de sable.

Les résultats obtenus sont les suivants :

| | |
|--------|---------|
| piston | 93.80 % |
| visuel | 97.40 % |

II.3.6. Analyse chimique

Le tableau II.8 montre les pourcentages des composants chimiques du sable des dunes. Cette analyse est réalisée au laboratoire LTP Sud de OUARGLA.

Tableau II.8: Analyse chimique de sables des dunes.

| Composants | Pourcentages (%) |
|--|------------------|
| <i>SO₄ Ca, 2H₂ O</i> | 2 |
| <i>SO₄</i> | 0 |
| <i>Ca CO₃</i> | 1 |
| <i>Insoluble</i> | 97 |
| <i>Na Cl</i> | 0 |

II.3.7. Essai de Diffraction des rayons X, analyse DRX

La courbe représente les résultats obtenus pour le sable de dune. Cette étude a été réalisée dans le laboratoire de physique à l'Université de Kasdi Merbah Ouargla.

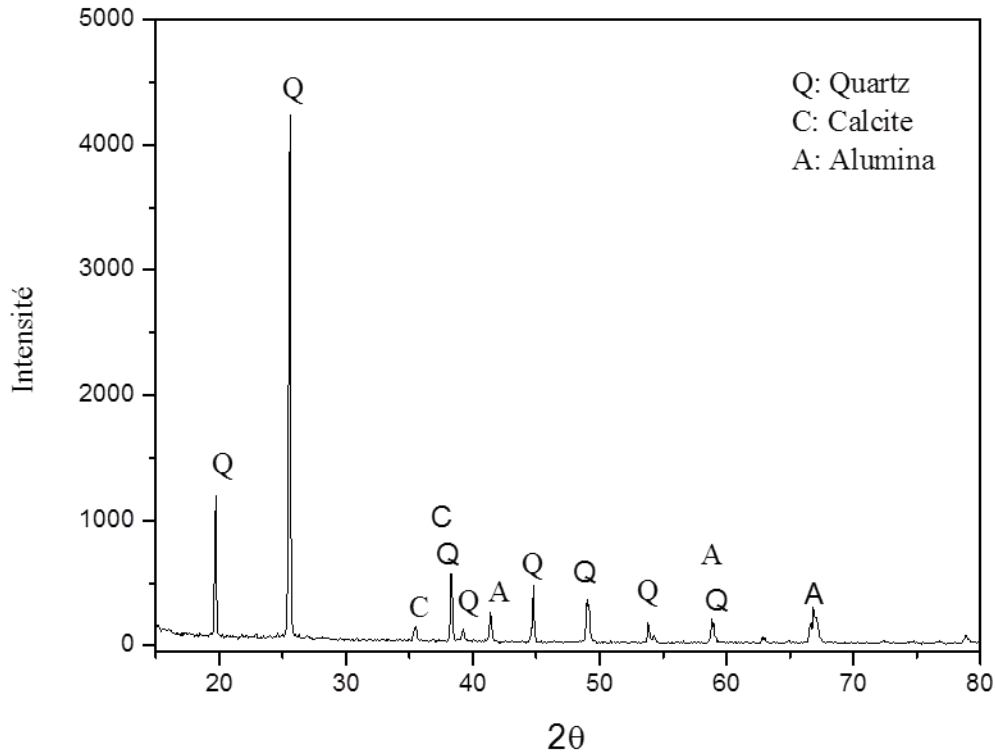


Figure II.10 Analyse diffractométrie de sable de dune.

Suivant les mesures menées à partir du diffractogramme, qui a été effectué au niveau du laboratoire de physique à l'université d'OUARGLA, on peut constater ce qui suit :

- Le quartz forme une grande part des minéraux avec un pourcentage de 80 %.
- Le gypse se trouve sous forme des grains fins de couleur blanchâtre avec un Pourcentage de l'ordre de 3 %.
- Le feldspath et la calcite sont présent avec des pourcentages faibles au tour de 10 %

II.4. Les Graviers

Les graviers ont des origines semblables à celles des sables, ils proviennent de la désagrégation des roches. La dimension maximale des agrégats est conditionnée, d'une part, par la distance minimale à réaliser, d'autre part, de la distance minimale entre les différents armatures de l'ouvrage. La fraction 3/8 est considérée comme sable concassé.

II.4.1. Analyse Granulométrique

Nous avons préparé deux classes de gravier, soit 3/8 et 8/15 de Ouargla, ci-dessous on présente les courbes granulaires des deux classes

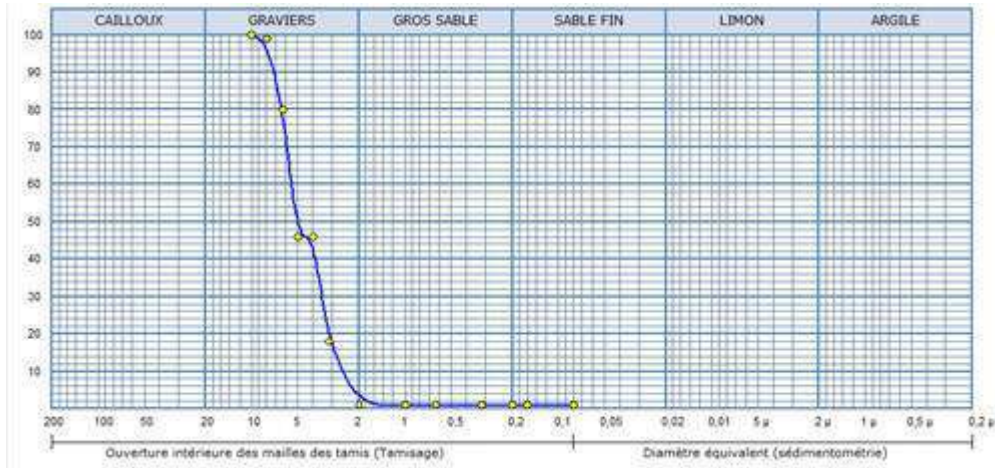


Figure II.11. Courbe granulométrique de gravier 3/8

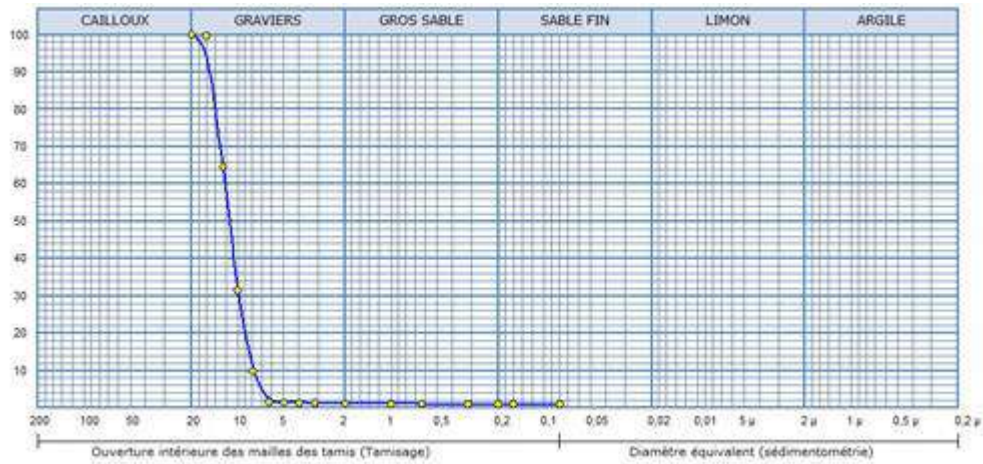


Figure II.12. Courbe granulométrique de gravier 8/15

II.4.2. Essai de Masse volumique

a. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre de cube en matériau pris en charge, comprenant une fois les vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre les particules. La masse volumique apparente d'un matériau peut être modifiée.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II.9 : Résultats de la masse volumique apparente

| | | |
|---------------|-------|------|
| classe | 3/8 | 8/15 |
| M.V.apparente | 1.506 | 1.46 |

b. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

Tableau II.10 : Résultats de la masse volumique absolue

| classe | 3/8 | 8/15 |
|-------------|-------|-------|
| M.V.absolue | 2.613 | 2.661 |

II.4.3. Essai Micro-Deval en présence d'eau (MDE)

Cet essai permet de déterminer l'usure d'une chaussée sous l'effet de frottements (pneus des véhicules). L'essai consiste à introduire des granulats dans le cylindre de la machine MDE avec de l'eau et des billes de taille normalisée équivalente à celle des gravillons. Lors de la rotation du cylindre, les gravillons frottent sur les billes. La masse des éléments inférieurs à 1,6mm à la fin de l'essai donne la résistance à l'usure du granulat. Plus le résultat est faible, plus le granulat est résistant à l'usure.



Figure II.13 La machine micro-Deval.

Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau II.11 : Résultats de Micro – Deval des graviers

| Classe des graviers | 3/8 | 8/15 | Spécifications |
|---------------------|-----|------|----------------|
| MDE | 10 | 11.2 | ≤ 25 |

II.4.4. Essai Los Angeles

Cet essai permet de déterminer la résistance aux chocs des granulats. Il simule les chocs des roues des véhicules sur une route. L'essai consiste à introduire des gravillons dans le cylindre de la machine Los Angeles.

Lors de sa rotation, les granulats sont heurtés par des boulets plus lourds que les gravillons. La masse des éléments inférieurs à 1,6mm à la fin de l'essai donne la résistance aux chocs du granulat. Plus le résultat est faible, plus le granulat est résistant aux chocs.



Figure II.14 : La machine los Angeles

Tableau II.12 Résultats de los Angeles des graviers

| Classe des graviers | 3/8 | 8/15 | Spécifications |
|---------------------|-----|------|----------------|
| LOS ANGELES | 20 | 25 | ≤ 25 |

II.5. Eau de gâchage

L'eau utilisée est celle du robinet du laboratoire de génie civil de l'université de Ouargla. L'eau permet à la fluidification de la pâte ; l'analyse chimique de l'eau a été effectuée au niveau de laboratoire de traitement des eaux de l'université de Ouargla et elle a donné la constitution suivante :

Tableau II.13 : Composition chimique de l'eau.

| Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | K ⁺⁺ | Na ⁺ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ⁻ | HCO ₃ ⁻ | PH |
|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------|
| 242 | 125 | 31 | 536 | 755 | 14,5 | 755 | 124 | 6,75 |

Les concentrations sont données en mg/l

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé d'identifier les caractéristiques des matériaux utilisés suivant les normes "AFNOR"

Les conclusions qu'on peut tirer de la caractérisation de ces matériaux sont :

- Pour les sables utilisés, c'est un sable de la région de Sidi Khouiled, qui se caractérise par une granulométrie serrée, et qui est très propre et très fin avec une granulométrie serrée, leur module de finesse est de l'ordre de 1.224. Donc ce sable est hors normes de point de vue construction.
- L'argile utilisé de la région de Beldet Âmor qui est très plastique et d'une densité sèche =1.91 g/cm³.
- L'argile de la région d'El Hdjira qui est plastique et d'une densité sèche =2,03 g/cm³.
- L'eau de gâchage est celle de robinet du laboratoire de faible salinité.
- Nous avons préparé deux classes de gravier, soit 3/8 et 8/15 de Ouargla qui se caractérise par :

CHAPITRE II : Caractérisation des Matériaux Utilisés

La masse volumique absolue de gravier 3/8 $\rho_s = 2.613 \text{ kg/m}^3$.

La masse volumique absolue de gravier 8/15 $\rho_s = 2.661 \text{ kg/m}^3$.

La masse volumique apparente de gravier 3/8 $\rho_a = 1.506 \text{ kg/m}^3$.

La masse volumique apparente de gravier 8/15 $\rho_a = 1.46 \text{ kg/m}^3$.

Chapitre III

Résultats et Interprétations.

Résultats et Interprétations

III.1. Introduction

L'étude expérimentale de notre travail consiste à déterminer les caractéristiques thermiques et mécaniques du pisé à base de terre locale de dimensions (7x 28 x 7) cm, par l'utilisation premièrement l'argile de Beldet Amor, le sable de dunes de Sidi Khouiled , gravier et grivlette de Ouargla. et ensuite à la base de l'argile d'El Hdjira avec les mêmes compositions, puis différents essais ont été effectués sur les éprouvettes confectionnées à savoir :

- Essai mécaniques :
 - La résistance à la compression ;
 - La résistance à la flexion ;
 - Essai Ultrasonique.
- Essai thermiques :
 - Conductivité thermique ;
 - Résistance thermique .

Ces essais sont effectués au laboratoire de Génie Civil de l'université d'Ouargla, dans les conditions suivantes : Température ($30 \pm 5^\circ\text{C}$), et d'humidités relatives $\text{HR} = 35 \pm 3\%$.

III.2. Préparation des pisés

III.2.1. L'obtention de l'eau de malaxage

a. Essais Proctor:

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale (ω) pour un sol de remblai donné à laquelle doit être compactée ce sol pour obtenir la densité sèche maximum (γ_d) et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore à la capacité portante maximale.

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir des essais dits : Essai Proctor normal ou Essai Proctor modifié.

L'essai Proctor consiste à mesurer le poids volumique d'un sol (argile +sable) disposer en trois couches dans un moule Proctor de volume connu, dans chaque couches étant compacter avec la dame Proctor l'essai répété plusieurs fois et on varie à chaque fois la teneur en eau (24-6 et 8%) et on fixe l'énergie de compactage (3*25).

Appareillage : Moules Proctor avec leurs hausses de compactage

Diamètre du moule : 10,16cm.

Hauteur du moule : 11,17cm.

Volume du moule : 948,55 cm.3

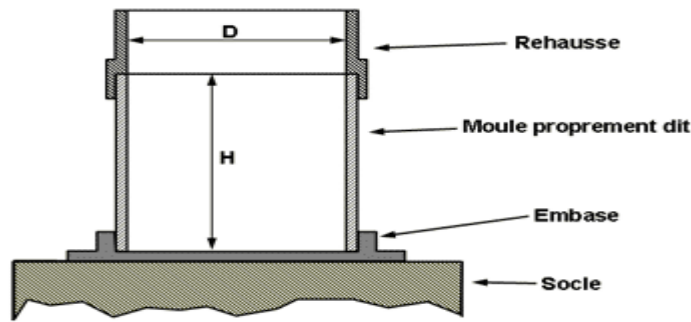


Figure III.1 Moule Proctor

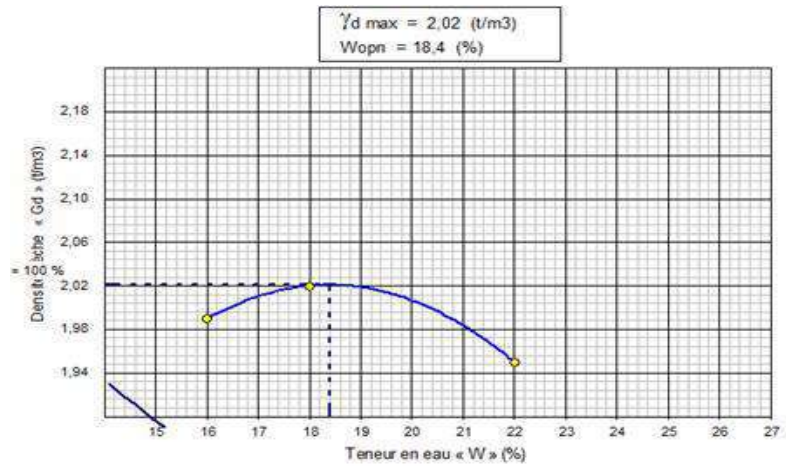


Figure III.2 Courbe Proctor de l'argile B.Amor

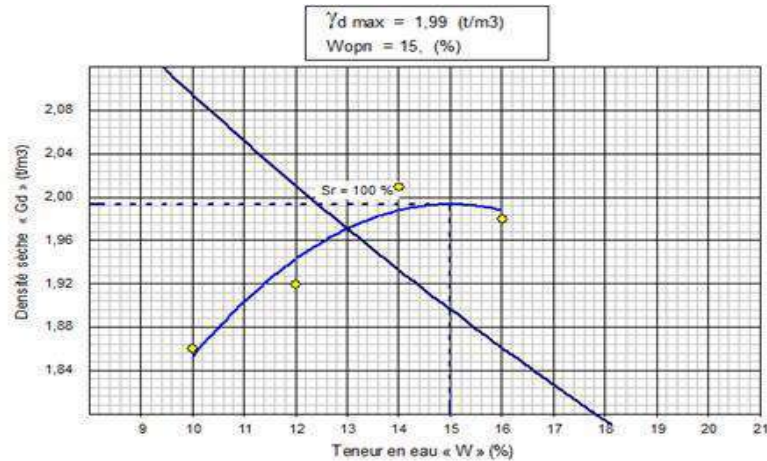


Figure III.3 Courbe Proctor de l'argile El Hdjira

D'après l'essais de proctor , la quantité d'eau optimale pour la confection de pisé à base de l'argile de Baldet Amor est 18 %, et la quantité d'eau optimale pour la confection de pisé à base de l'argile El Hdjira est 15 %

III.2.2. Préparation des échantillons utilisés dans l'étude

Pour la préparation des échantillons, nous avons suivi les étapes suivantes:

- Peser l'argile ;
- Peser le sable de dunes ;

- Peser le gravier et grivllette ;
- Ajouter l'eau de malaxage ;
- Mélanger les ingrédients manuellement ;
- Remplissage des moules ;
- Compactage avec un petit pésoir ;
- Séchage à l'air libre ;

III.3. Essais Mécaniques

III.3.1. La Résistance à la Compression

L'essai de résistance à la compression par écrasement ont été effectués sur des éprouvettes (7x 7 x28) cm³ conformément à la norme (NFP 18-407) L'écrasement des éprouvettes est fait sur une presse hydraulique de vitesse de chargement force 2,4 ± 0,2 KN/Sec. Cet essai a pour but de connaître la contrainte de compression de l'éprouvette après séchage à l'aire libre pour toutes les compositions du pisé.

Les essais de résistance à compression ont été effectués au sein du laboratoire de génie civil de faculté des sciences appliquées de l'université Kasdi Merbah de Ouargla

La contrainte de compression est déterminée par la relation suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{S} \dots \dots \dots \quad (III-1)$$

Avec :

R_c : la contrante de compression en Méga Pascal (MPa)

F_c : Charge de compression appliquée en Newton (N)

S : Section en mm².

Nous avons proposé pour notre travail onze compositions (argile+sable+gravier+grivllette).

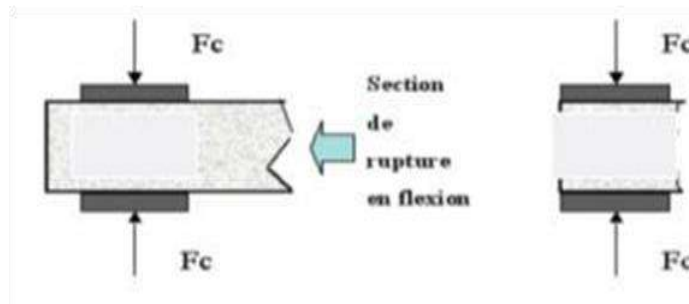


Figure III.4 Essai de Compression.

III.3.2. Résistance de flexion

L'essai de flexion est réalisé selon la norme (NFP 18-407), et exécuté sur trois éprouvettes (7x7x28) cm. La machine d'essai est d'une capacité de 200KN et d'une vitesse de chargement de 0.1MPa par seconde. Ont été effectués au sein du laboratoire de génie civil de de l'université Kasdi Merbah de Ouargla.

a. Le Principe de l'essai

Comportant deux appuis à rouleau distant de 210 mm sur lesquels repose l'éprouvette prismatique (7x7x28) cm, et un troisième rouleau transmettant une charge concentrée

CHAPITRE III : Résultats et Interprétations

La contrainte de flexion est déterminée par la relation suivante :

$$Rf = \frac{3F.L}{2bh^2} \dots\dots\dots (III-2)$$

Avec :

R f : Résistance à la flexion en (MPa);

F : La Charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N)

L : Longueur d'éprouvette en mm

b : Largueur d'éprouvette en mm

h : Hauteur d'éprouvette en mm

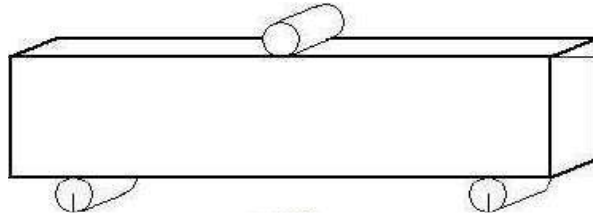


Figure III.5 Essai de Flexion.

III.3.3. Essai ultrasonique

a. Objectifs d'essai

La mesure de la vitesse des impulsions ultrasoniques de vibrations longitudinales passant à travers la brique peut être utilisée pour les applications suivantes :

- La détermination de l'uniformité de la brique à l'intérieur et entre les membres
- La mesure des changements qui surviennent avec le temps dans les propriétés de la brique.
- corrélation de la vitesse d'impulsion et la force comme une mesure de la qualité de la brique.

b. Principes de l'essai

Mesure du temps de propagation de la première impulsion d'un d'ondes appelées ondes longitudinales généré par un transducteur entre deux points déterminés de la brique (Figure III.6).

On peut à partir du temps propagation mesuré, exprimer une vitesse conventionnelle de propagation : c'est le quotient de la distance entre transducteur par le temps mesuré.

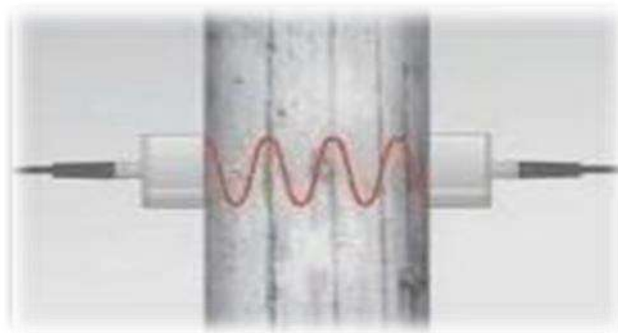


Figure III.6 Mécanisme de l'appareille d'ultrasonique.

La vitesse conventionnelle de propagation est calculée par la formule :

$$v = \frac{l}{t} \dots\dots\dots (III.3)$$

l : est la distance entre le transducteur en mètres.

t : est le temps de propagation en secondes.

III.4. Essais Thermiques

III.4.1. La Conductivité Thermique

L'essai est réalisé selon la norme EN 1745, qui a pour objet de mesurer la conductivité thermique de pisé. L'appareil utilisé est le CT-mètre ; on utilise la sonde anneau de puissance 0,509 watt. La mesure s'effectue en plaçant la sonde entre deux briques puis lancer la mesure. Elle s'exprime dans le système international par $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$; ou $W.m^{-1}.K^{-1}$. Ou par $J.m^{-1}.K^{-1}.s^{-1}$.

III.4.2. La Résistance Thermique (R_{th})

La résistance thermique représente la résistance de l'élément à la transmission de chaleur à travers son épaisseur, elle est généralement connue sous le terme de « isolation thermique ». L'augmentation de la résistance thermique implique que l'élément est isolant. Elle s'exprime en $m^2.K^1.W^{-1}$. [20.21]

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda} \dots\dots\dots (III.4)$$

Où :

e : l'épaisseur de l'élément

λ : la conductivité de l'élément.

III.5. Résultats et Discussions

III.5.1. Pisé à base d'argile de Beldat Amor

Les compositions utilisées sont indiquées dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Compositions Utilisées à base d'argile Beldet Amor.

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 |
|----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| A % | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| S % | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| G % | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 20 | 15 | 10 | 5 | 0 |
| g % | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 | 0 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |

CHAPITRE III : Résultats et Interprétations

Au cours de préparation des mélanges nous avons rencontré quelques difficultés comme :

- Difficulté à mélanger l'échantillon manuellement
- L'échantillon nécessite beaucoup d'effort lorsqu'il est placé dans moule

La préparation, le confédération étaient réalisés dans laboratoire de Génie Civil de l'université KASDI Merbah Ouargla.

- La figure III.7 montre la variation de la masse volumique des pisées en fonction des différents pourcentages de gravier et grivlette.

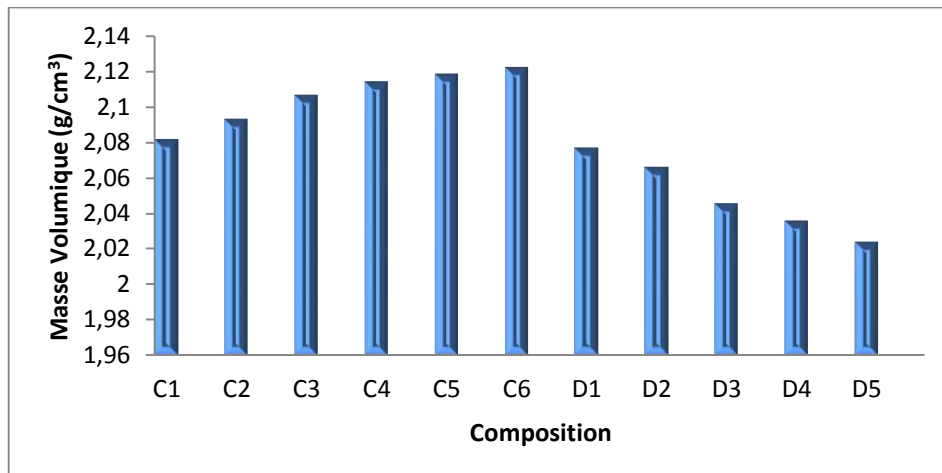


Figure III.7 Résultats de Masse Volumique.

A partir des figures (III.7) nous constatons que :

- Une augmentation de la masse volumique en fonction du pourcentage de gravier dans les compositions, ce à est due à la masse volumique du gravier qu'est plus grande que les autres.
- Une diminution de la masse volumique en fonction de la diminution du pourcentage de gravier dans les compositions.
- La masse volumique de la composition (C6) est plus élevée que les autres compositions
- Les masses volumiques des autres compositions sont proches.
- Les résultats de l'essai de résistance à la compression sont présentés dans la figure suivant :

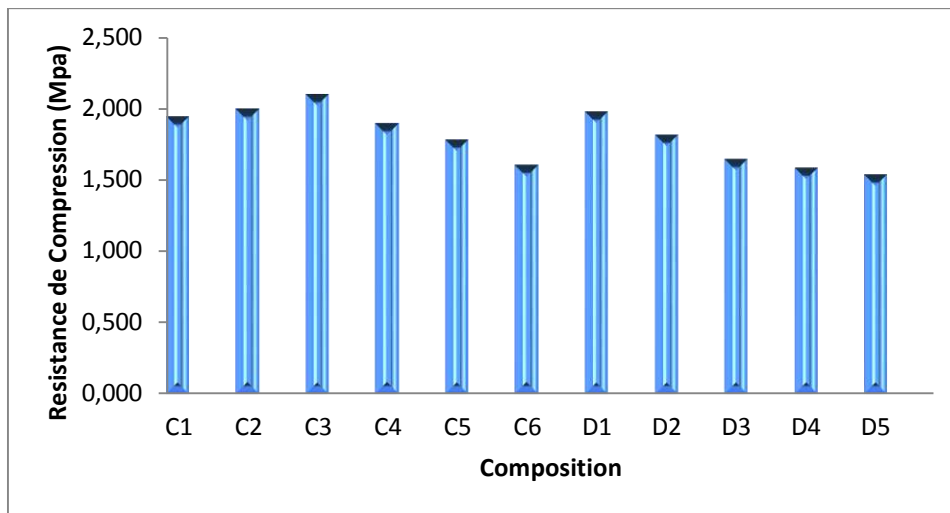


Figure III.8 Résultats de la Compression.

A partir la figure (III.8) nous constatons que :

- Une augmentation et une diminution dans les six compositions premières (C), Ce phénomène s'explique en deux Phases ;

Phase 1 : Une augmentation de la résistance à la compression en termes d'augmentation du pourcentage de gravier jusqu'au sommet, ce qui est dû à la bonne cohésion du mélange.

Phase 2 : Diminution de la résistance à la compression liée à l'augmentation du pourcentage de gravier, due à l'existence de vides créés par le gravier.

- Une diminution de la résistance à la compression des compositions (D) en termes d'augmentation du pourcentage de grivette, ce qui crée des vides et le manque de cohérence de l'échantillon.

- La résistance à la compression de l'échantillon (C3) est plus élevée que celle de l'échantillon (D1) et ça est dû à l'augmentation du pourcentage de gravier.

- La résistance à la compression de échantillon (C6), (D5) est faible d'un point mécanique, et ça est dû à l'influence des vides résultant de gradient granulaire n'est pas approprié.

- La résistance à la compression des échantillons (C3) et (D1) sont acceptables.

- Les résultats de l'essai de résistance à la flexion sont résumés dans la figure suivante :

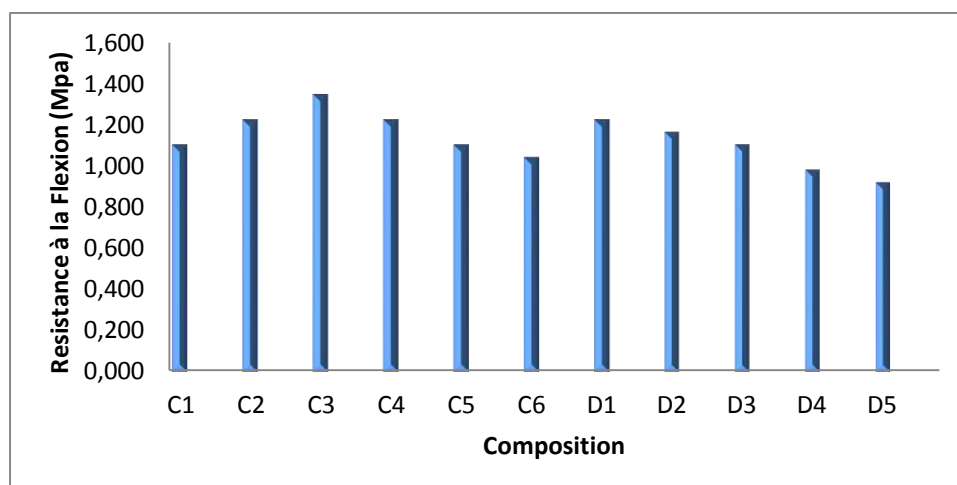


Figure III.9 Résultats de la Flexion.

A partir la figure (IV.11) nous constatons que :

- Les compositions (C3) et (D1) donnent des meilleurs résultats à la flexion et ça est dû à la bonne cohésion du mélange.
- La résistance à la flexion des toutes les compositions sont proches.
- La résistance à la flexion de l'échantillon (C3) est plus élevée que celle de l'échantillon (D5) et ça est dû à l'augmentation du pourcentage de grivlette.
- La résistance à la flexion des échantillons (C2) et (C4) sont moins importantes que celle des échantillons (D2) et (D3) et ça est dû à ce que le gravier est plus élevé que le grivlette, ce qui crée des vides.

Les résultats de l'essai de l'Ultration sont résumés dans la figure suivante :

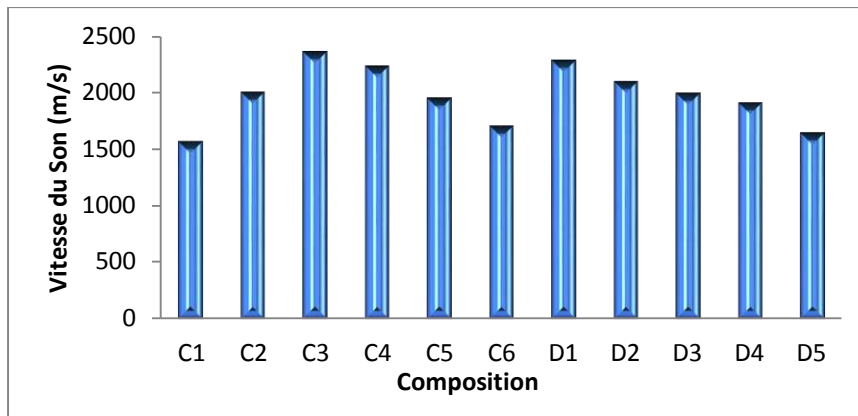


Figure III.10 Résultats de la vitesse de propagation du son.

- L'essai de la vitesse du son a confirmé les résultats de résistance à la compression et à la flexion.
- L'échantillon C3 donne le meilleur résultat.

La figure III.11 montre la variation de la conductivité thermique des pisés en fonction des différents pourcentages d'argile et de sable des dunes, gravier et grivlette.

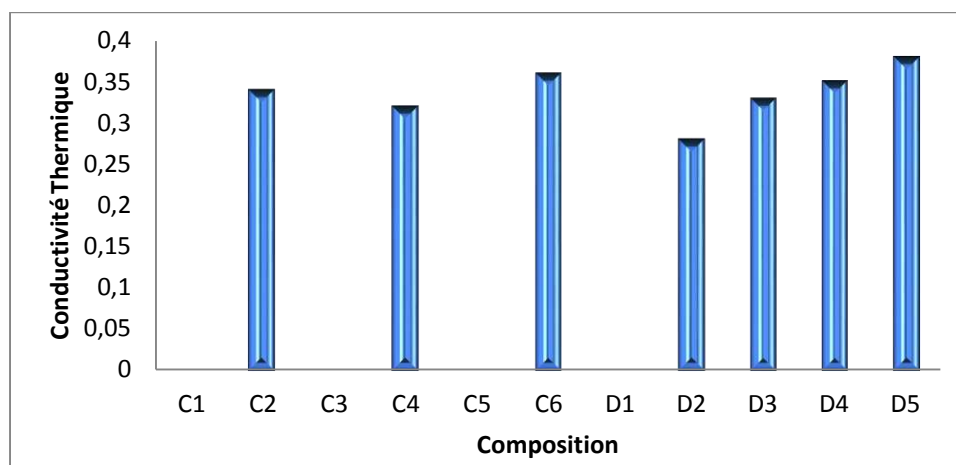


Figure III.11 Variation de la conductivité thermique des pisés.

A partir de la figure (IV.11):

- Certains échantillons ont été cassés, cela est dû au transport.
- Une diminution de la conductivité en fonction de l'augmentation de pourcentage de gravier dans le mélange. Cela est attribué aux vides laissés par le gravier.

- les échantillons (C4) et (D2) donnent une conductivité thermique moindre, du fait de la présence des vides entre les composants de ces compositions,
 Les résultats de la résistance thermique sont résumés dans la figure suivante :

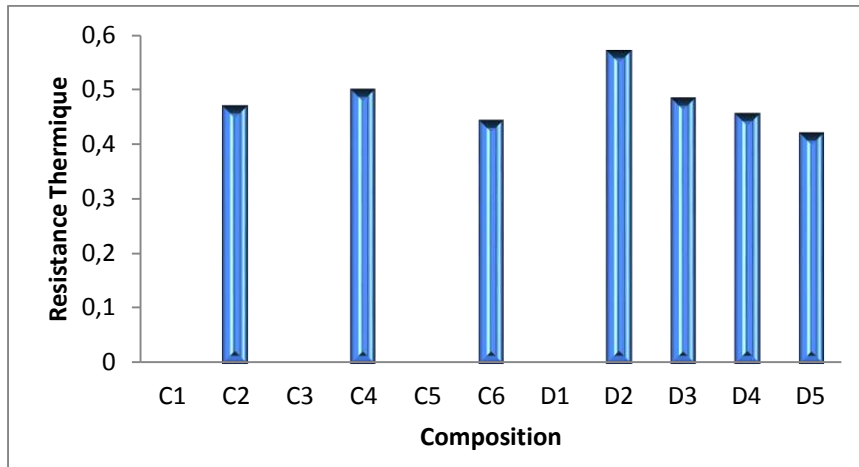


Figure III.12 Variation de la résistance thermique de pisé.

A partir de la figure (IV.4), nous constatons :

- la résistance thermique a automatiquement augmenté car elle est inversement proportionnelle à la conductivité thermique .
- Une augmentation de la résistance thermique en fonction de l'augmentation du pourcentage des gravier.
- La résistance thermique la plus élevée est celle des briques contenant des gravier (C6) par contre le échantillon (D5) sont les plus faible et ça est due à l'absence des gravier.
- Une convergence de la résistance thermique dans l'échantillon (C2) et l'échantillon (D2).

III.5.2. Pisé à base d'argile d'El Hdjira

Nous avons proposé pour notre travail douze compositions (argile+sable+gravier+grivlette) suivantes en plus la composition de référence. Les compositions utilisées sont indiquées dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Compositions Utilisées à base d'argile El Hdjira.

| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 |
|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| A % | 25 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| S % | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| G % | 25 | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 | 0 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| g % | 25 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 20 | 15 | 10 | 5 | 0 |

Au cours de préparation des mélanges nous avons rencontré quelques difficultés comme :

- Difficulté à mélanger l'échantillon manuellement
- L'échantillon nécessite beaucoup d'effort lorsqu'il est placé dans moule

CHAPITRE III : Résultats et Interprétations

La préparation, le confectonnement étaient réalisés dans laboratoire de Génie Civil de l'université KASDI Merbah Ouargla.

- La figure IV.12 montre la variation de la masse volumique des briques en fonction des différents pourcentages d'argile , sable des dunes , gravie et grivlette.

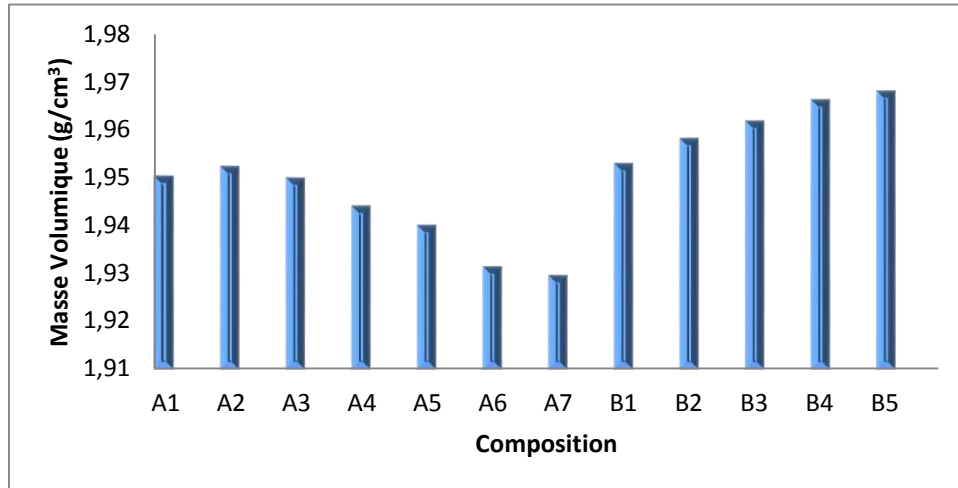


Figure III.13 Résultats de Masse Volumique.

A partir des figures (III.13) nous constatons que :

- Une diminution de la masse volumique en fonction de la diminution du pourcentage de grivelette dans le mélange. En effet la masse volumique du gravier est plus grande que celle grivlette.
- La masse volumique de l'échantillon (C2) est plus élevée que les autres échantillons
- Les masses volumiques des autres compositions sont très proches.
- La masse volumique des échantillons (C2) et (C4) sont plus élevé que les autres compositions est ça est dû à la manque des sable qui entraîne l'augmentation de la masse volumique

- Les résultats de l'essai de résistance à la compression sont présentés dans le figure suivant :

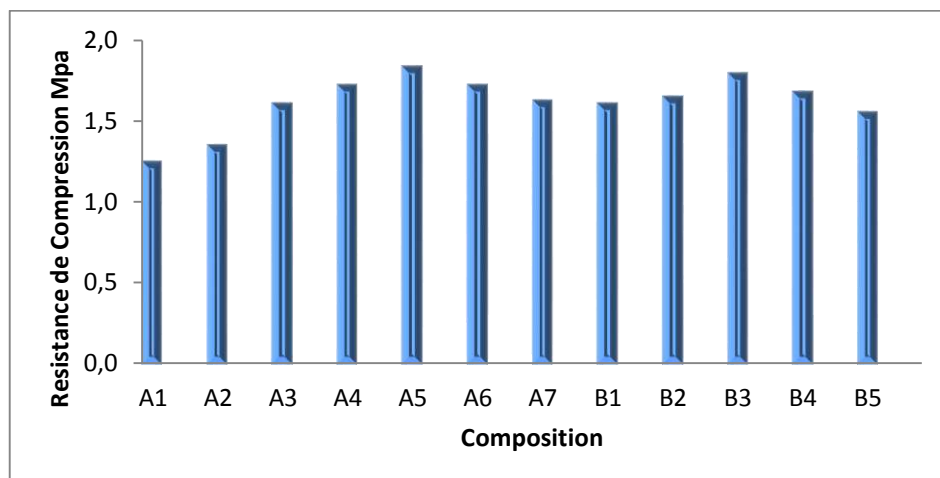


Figure III.14 Résultats de la Compression.

A partir de la figure (III.14) nous constatons que :

- Généralement les échantillons Dans lequel une certain proportion de gravier et grivlette , donnent les meilleurs résultats à la compression c'est-à-dire Le gradient granulaire approprié influe Positif sur la résistance à la compression.
 - La résistance à la compression de l'échantillon (A5) est plus élevée que celle de l'échantillon (B3) et ça est dû à l'augmentation du pourcentage de gravier.
 - La résistance à la compression de échantillon (B5) est faible et ça est dû à l'influence des vides résultant d'une grande quantité de gravier.
 - La résistance à la compression des échantillons (A5) et (A6) sont acceptables.
- Les résultats de l'essai de résistance à la flexion sont résumés dans le figure suivant :

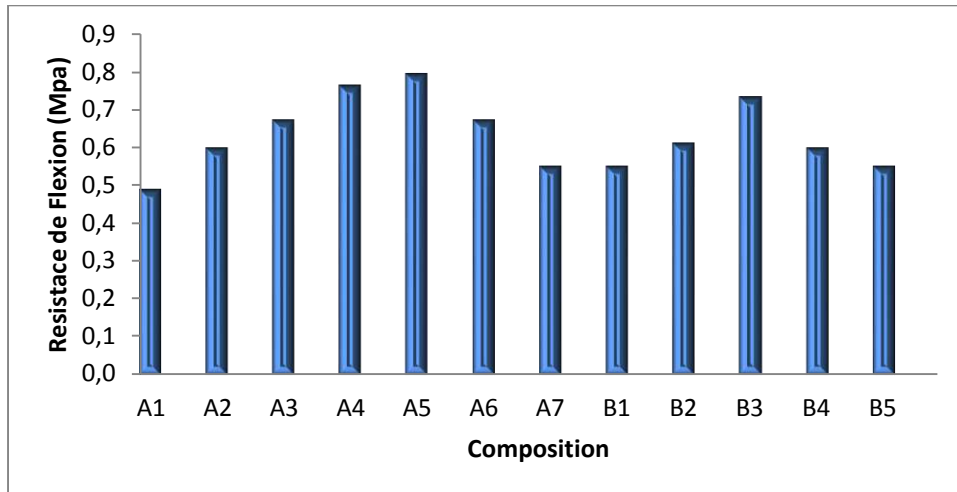


Figure III.15 Résultats de la Flexion.

A partir de la figure (III.15) nous constatons que :

- Une augmentation et une diminution dans les compositions (A) et (b), ce phénomène peut s'expliquer en deux phases;
 - Phase 1: Augmentation de la résistance à la flexion en termes d'augmentation du rapport gravier et grivlette vers le haut, grâce à la bonne cohésion du mélange.
 - Phase 2: diminution de la résistance à la flexion due à l'augmentation du taux de gravier et de gravier entraînant la création de vides
 - La résistance à la compression des échantillons (A5) et (B3) sont acceptables.
- Les résultats de l'essai de l'Ultration sont résumés dans la figure suivant :

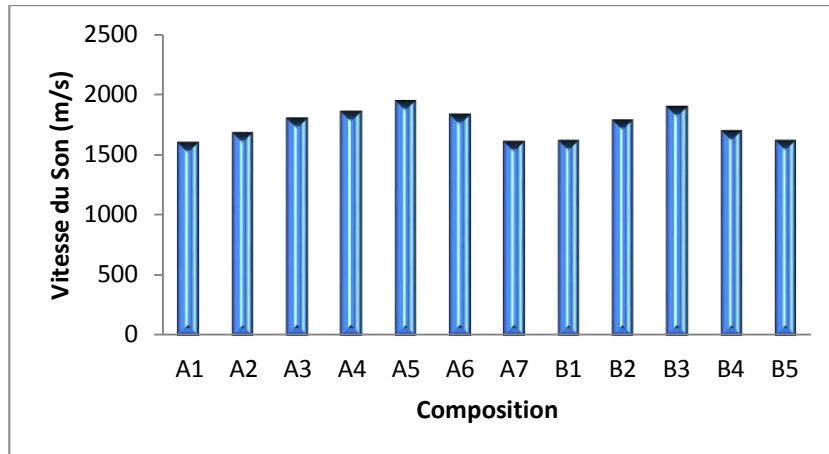


Figure III.16 Résultats de la vitesse de propagation du son.

- L'essai de la vitesse du son a confirmé les résultats de résistance à la compression et à la flexion.
- Les échantillons A5 et B3 ont donné les meilleurs résultats.
 - Tous les échantillons ont été cassés, cela est dû au transport.

Tableau III.3 : les meilleurs résultats des argiles utilisées.

| Les Essais | Pisé à base de l'argile de Beldat Amor | Pisé à base de l'argile de El Hdjira |
|--|--|--------------------------------------|
| Masse Volumique (g/cm³) | 2.12 | 1.97 |
| Résistance à la Compression (Mpa) | 2.09 | 1.83 |
| Résistance à la Flexion (Mpa) | 1.35 | 0.79 |
| Vitesse du Son (m/s) | 2361 | 1945 |
| Conductivité Thermique W.m⁻¹.°C⁻¹ | 0.28 | - |
| Résistance Thermique m².K¹.W⁻¹ | 0.44 | - |

III.6. Conclusion

Selon l'étude expérimentale sur les propriétés thermiques et mécaniques de différentes compositions, on peut tirer les conclusions suivantes:

- L'ajout de gravier augmente la masse volumique de l'échantillon.
- Les échantillons qui ont la meilleure analyse granulair nous donnent le meilleur résultat en termes de résistance à la pression et de résistance à la flexion.
- L' argile de Beldat Amor est meilleure que l'argile de El Hdjira en termes de propriétés mécaniques et thermiques.

CHAPITRE III : Résultats et Interprétations

-Sur le plan économique, l'utilisation de ces matériaux contribue à réduire la quantité de matériaux importés et à réduire la consommation d'énergie nécessaire à l'utilisation des matériaux étudiés dans la construction de maisons.

Conclusion et Perspectives

Conclusion Générale

Nous rappelons le but de ce travail consistait à la contribution de production d'un matériau local ayant de bonne propriété mécanique et thermique pour cela nous avons confectionner un pisé à base des matériaux locaux, après avoir effectué une série d'essais thermo-mécanique sur ces pisés, nous pouvons dire :

* La première partie c'est la recherche bibliographique qui s'est étalée sur un aperçu détaillé sur les techniques utilisées, ainsi que la technologie de confection des différents types des briques.

Nous avons conclu qu'il existe plusieurs types de briques et il existe plusieurs techniques qui peuvent être utilisé dans l'amélioration des performances thermiques et mécaniques des briques.

* La deuxième partie c'est la partie expérimentale, nous avons donné les caractéristiques générales des matériaux utilisés qui sont (l'argile , le sable de dune, le gravier , le grivlette et l'eau).

- L'argile extraite de gisement de Beldet Âmer daïra de Touggourt Wilaya de OUARGLA qui se caractérise par :

Une granulométrie de grande proportion de limon (90%) ;

La nature de l'argile est une argile très plastique;

- L'argile extraite de gisement de El Hdjira Wilaya de OUARGLA qui se caractérise par :

Une granulométrie de petit proportion de limon (27%) ;

La nature de l'argile est une argile très plastique;

argile est constitué essentiellement de minéraux associés de quartz et de la kaolinite.

- Le sable utilisé est un sable des dunes extrait de Sidi Khouiled qui se caractérise par :

Nous pouvons dire que le sable :

une granulométrie très serrée;

Constitué essentiellement de minéraux associés de quartz, la calcite et alumina;

ce sable est un sable très fin

- Nous avons préparé deux classes de gravier, soit 3/8 et 8/15 de Ouargla

- L'eau utilisée est celle du robinet du laboratoire de génie civil de l'université de Ouargla. avec une salinité acceptable.

* La troisième partie est une étude expérimentale. Une série d'essais est réalisée sur deux types de pisées, Pisé à base de l'argile de Beldat Amor et Pisé à base de l'argile d'El Hdjira.

Après l'expérimentation, nous avons tiré la conclusion suivante :

- L'ajout de gravier augmente la masse volumique de l'échantillon.
- Les échantillons qui ont la meilleure analyse granulaire nous donnent le meilleur résultat en termes de résistance à la pression et de résistance à la flexion.
- L'argile de Beldat Amor est meilleure que l'argile d'El Hdjira en termes de propriétés mécaniques et thermiques.
- Sur le plan économique, l'utilisation de ces matériaux contribue à réduire la quantité de matériaux importés et à réduire la consommation d'énergie nécessaire à l'utilisation des matériaux étudiés dans la construction de maisons.

Perspectives :

D'après les résultats obtenus par cette recherche, et en vue d'une future utilisation rationnelle et efficace des matériaux locaux, nous recommandons les axes suivants :

- Approfondir le choix judicieux des matériaux de construction afin de réduire les conductivités thermiques.
- étudier l'effet d'ajout de la chaux sur les thermo-mécaniques.
- Etudier l'effet de l'ajout d'autres matériaux locaux ou bien le changement de processus de fabrication pour augmenter la résistance à la compression des briques tout en gardant les propriétés thermiques assez bonnes.

Références Bibliographiques

- [1] Meukam P. ; Thèse de doctorat « Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments » université de Yaoundé 2004 ;
- [2] AVLISSET I., « Matériaux de terre cuite » Technique de l'ingénieur, 1994.
- [3] Collection mémento technique « Tuiles et briques de terre cuite » édition le moniteur, Paris 1998.
- [4] Matériaux de construction « Cours en ligne matériaux de construction »,
- [5] RHONE A. ; « Le pisé » www.ageden.org, Edition Décembre 2010.
- [6] LIVERT S., « Bâtir un mur en briques de terre compressée », Février 2011.
- [7] CRA Terre « Blocs de terre comprimée normes » Série Technologies, 1998, France.
- [8] VENUAT M. ; « Produits silico-calcaires », Technique de l'Ingénieur ,1994.
- [9] DJOUHRI M. ; « Confection d'une brique à base de sable de dune » mémoire magister.
- [10] Fiche technique Qualiremo ,« La terre crue » , « [www. tkTerreCrue.html](http://www.tkTerreCrue.html). » ,Avril 2008
- [11] Nguyen T. ; Thèse de doctorat « Etude du comportement au Feu des Maçonneries de Briques en Terre-Cuite : Approche expérimentale et Modélisation du risque d'écaillage» 2009;
- [12] Coopérative des Ouvriers du Bâtiment (C. O. B) « portrait des connaissances sur l'utilisation de la terre stabilisée dans le secteur du bâtiment au Sénégal » 2010 ;
- [13] RICHARD P., « Adobe », mémoire Maître en environnement, Université de Sherbrooke Canada, Octobre 2010.
- [14] MAKRI M. ; « Projet GE12 Construction en terre » Technologie Compiègne, 2010.
- [15] CRA Terre EAG « Bloc de terre comprimée volume I » Manuel de production.
- [16] CORPUS « Mur de briques en terre crue » Architecteur traditionnelle méditerranéenne, 2006, pages (1-7).
- [17] (fiche technique matériaux) 15/12/2010 http://oci.cstb.fr/simulation/choix_proc.asp
- [18] Lptr l'ESTAQUE Marseille « fiche technique mur en brique de terre crue » Collegiul Tecnic Buzau mai 2010
- [19] GORISSE F. ; « Essais et contrôle des bétons », Edition Eyrolles, vol.2, Paris ; 1978.
- [20] YVES J. ; « Transferts Thermiques », Ecole des mines Nancy, Edition 2012.
- [21] Fiche thermique, « Isolation thermique » Mairie de Paris, Edition Novembre 2009.

ANNEXE I



Photo N°1 : Argile Beldat Amor



Photo N°2 : Argile El Hdjira



Photo N°3 : Sable de dune



Photo N°4 : Le Gravier (8/15)



Photo N°5 : Le Grivlette (3/8)



Photo N°6 : Mélange des Composants



Photo N°7 : Limite d'atterberg



Photo N°8 : La densité

ANNEXE II



Photo N°1 : Mélangé le composite



Photo N°2 : Mélange dans le moule



Photo N°3 : Machine de compression



Photo N°4 : Machine de flexion



Photo N°5 : Essai de compression



Photo N°6 : Essai de flexion



Photo N°7 : Essai vitesse du son



Photo N°8 : Le moule (7x7x28)



Photo N°9 : Appareil conductivité thermique



Photo N°10 : Essai conductivité thermique