

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

Université Ahmed Draia d'Adrar
Faculté Des Sciences et de la Technologies
Département Des Sciences de Technologie



Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme :

Master En Génie Civil

Option : Matériaux En Génie Civil

Présenté Par :

KESRAOUI Salem

NOUARI Mohammed Charif

THEME

**Détermination Des Caractéristiques Thermo Physico-
Mécaniques Des Matériaux Locaux : Application Aux Briques De
Terre Comprimées Stabilisées**

Soutenu Le 20/06/2018 Devant un membre de jury composé de :

| | | |
|--------------------------------|-------------|------------------|
| Mr. ABDELJALIL M'hammed | Univ. Adrar | Président |
| Mr. SEMCHA Abdelaziz | Univ. Adrar | Examineur |
| Mr. ABOU Mohammed | Univ. Adrar | Encadreur |

Année Universitaire 2017-2018

DEDICACE

*Pour leur exprimer ma profonde gratitude, nous dédions ce
modeste mémoire à :*

- Allah le tout puissant ;

- Mon père ;

- ma mère;

- frères et sœurs ;

*- tous ceux qui m'ont assisté durant ma
Formation.*

KESRAOUI

NOUARI

Remerciement :

Au terme de ce modeste travail, Nous tenons à remercier en premier notre **DIEU** tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la volonté pour pouvoir continuer et réaliser ce travail.

Nous remercions vivement notre encadreur **Mr. ABBOU Mohammed**, pour l'intéressante documentation qu'il a mise à notre disposition, pour ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'il nous a apportées durant notre étude.

Mr : ABDELDJALIL M'hammed qui on a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire. **Dr : SEMCHA Abdelaziz** d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous remercions **Mr :Younes.K** et l'ensemble des membres du **CAPterre** à Timimoun.

Nous remercions pareillement **Mr : BOUAFIA Bafdil LTPO d'Adrar** et l'ensemble des membres du laboratoire de génie civil de l'Université d'Adrar.

Merci aussi à nous collègues : **BAARBI Karima** et **ALI MOUHRI Imane**

Merci à tous et à toutes

KESRAOUI Salem

NOUARI Mohammed Charif

Sommaire

| | |
|---|------------|
| <i>Dédicace</i> | <i>I</i> |
| <i>Remerciement</i> | <i>II</i> |
| <i>Sommaire</i> | |
| <i>Liste des figures</i> | <i>III</i> |
| <i>Liste des tableaux</i> | <i>IV</i> |
| <i>Liste des notations</i> | <i>V</i> |
| <i>Résumé</i> | <i>VI</i> |
| <i>Introduction Générale</i> | <i>01</i> |
| CHAPITRE I : Synthèse Bibliographique | |
| 1. Introduction | 03 |
| 2. Généralités sur les techniques de construction en terre et leurs propriétés thermo physico- mécaniques | 03 |
| a. L'adobe | 03 |
| Fabrication d'adobe | 04 |
| b. Les pisés | 04 |
| Fabrication du pisé | 05 |
| c. Les Blocs de Terre Comprimée | 06 |
| Fabrication du BTC | 07 |
| Préparation de la terre | 07 |
| Compression | 08 |
| Le séchage | 09 |
| 3. La construction en terre dans le monde | 10 |
| 3.1. La construction en terre en Algérie | 12 |

| | |
|---|----|
| 4. Cadre géologie de la région d'Adrar | 13 |
| 5. Stabilisation | 15 |
| a. Définition | 15 |
| b. Objectif | 15 |
| c. Procédés | 15 |
| c.1. Stabilisation mécanique | 15 |
| c.2. Stabilisation physique | 15 |
| c.3. Stabilisation chimique | 15 |
| 5.1. La chaux | 16 |
| a. Définition | 16 |
| b. Cycle de la chaux | 16 |
| c. Chaux aériennes | 16 |
| c.1. Chaux vive | 16 |
| c.2. Chaux éteinte | 17 |
| 6. Les argiles | 18 |
| a. Définition | 18 |
| b. Les grands groupes d'argile | 18 |
| b.1. Groupe des KAOLINITES | 18 |
| b.2. Groupe des ILLITES | 19 |
| b.3. Groupe des SMECTITES | 20 |
| 7. Propriétés thermo physico-mécaniques | 21 |
| a. Propriétés thermique | 21 |
| b. Propriétés physique | 21 |
| c. Propriétés mécaniques | 22 |

| | |
|---|----|
| 8. Transfert thermique et méthodes de mesure de la conductivité thermique | 23 |
| a. Les méthodes en régime permanent ou stationnaire | 23 |
| b. La méthode de la plaque chaude gardée (ISO 8302) | 23 |
| c. La méthode des boîtes | 24 |
| 9. Conclusion | 26 |
| CHAPITRE II : Caractérisations Des Matériaux Utilisés | |
| 1. Introduction | 27 |
| 2. Localisation des matériaux utilisés | 27 |
| 2.1. La région de Timimoun | 27 |
| Le sol de Timimoun | 27 |
| Le sable concassé de Timimoun | 27 |
| 2.2. La région d'Adrar | 28 |
| Le sol d'Adrar | 28 |
| Le sable concassé d'Adrar | 28 |
| 2.3. La région de Reggane | 28 |
| Le sol de Reggane | 28 |
| Le sable concassée de Reggane | 28 |
| 3. Caractéristiques physiques et chimiques des matériaux utilisés | 29 |
| 3.1. Les sables concassés | 29 |
| a. La masse volumique (NF P 18 555) | 29 |
| b. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 18 560) | 31 |
| c. Module de finesse (NFP 18-304) | 33 |
| d. L'équivalent de sable (NFP 18-598) | 33 |
| e. L'essai bleu de méthylène (NF P 94-068) | 34 |

| | |
|--|----|
| 3.2. La terre utilisée | 36 |
| a. L'analyse granulométrique par sédimentométrie (NF-P94-057) | 36 |
| b. Le poids spécifique des grains solides (NF P94-054) | 38 |
| c. Les limites d'Atterberg (NF P 94-051) | 40 |
| d. La limite de retrait WR (XP P 94 060-1) | 42 |
| e. Teneur en carbonate de calcium CaCO ₃ (NF P94-051) | 43 |
| f. Essai au bleu de méthylène (NF-P94 068) | 45 |
| g. l'analyse chimique de l'eau de gâchage | 46 |
| 4. Conclusion | 48 |
| CHAPITRE III : Résultats et Interprétations | |
| 1. Introduction | 49 |
| 2. Méthodologie d'étude | 49 |
| 3. Fabrication des briques | 51 |
| Préparation de la terre | 51 |
| Le malaxage | 51 |
| Pressage et Moulage | 51 |
| Condition de la cure | 52 |
| 4. Les essais thermo physico-mécaniques | 54 |
| Essais mécaniques | 54 |
| Essais thermiques | 54 |
| 4.1. Caractéristiques physico-mécaniques | 54 |
| a. Résistance à la compression simple (NF XP- P 13 901) | 54 |
| Résultats | 57 |
| Analyse et commentaire | 59 |

| | |
|---|----|
| b. Essai d'absorption (NF XP- P 13 901) | 59 |
| Commentaire | 61 |
| c. Essai d'abrasion (NF XP- P 13 901) | 61 |
| Commentaire | 63 |
| 4.2. Partie thermiques | 63 |
| a. Préparations des plaques | 63 |
| b. La méthode de plaque chaude et plaque froide (ISO 8302) | 64 |
| Description de l'appareille H112N | 64 |
| c. La conductivité thermique λ | 65 |
| Comment calculer la conductivité thermique à l'aide de l'appareille H112N | 65 |
| Résultats | 66 |
| Commentaire | 68 |
| d. La Résistance thermique R_{th} | 68 |
| Commentaire | 70 |
| 5. conclusion | 71 |
| Conclusion général | 72 |

Liste des figures

| CHAPITRE I : Synthèses Bibliographiques | | |
|--|---|----|
| Figure.1 | Briques d'adobe | 03 |
| Figure.2 | Etapas de production d'adobe | 04 |
| Figure.3 | Mosquée en pisé édifiée en 1788(chine) | 05 |
| Figure.4 | Technique de construction en pisé | 05 |
| Figure.5 | Mur en pisé | 06 |
| Figure.6 | Brique de terre comprimée BTC | 07 |
| Figure.7 | Préparation de mélange de BTC | 08 |
| Figure.8 | Compression de BTC avec une presse manuelle | 08 |
| Figure.9 | Séchage et cure de BTC | 09 |
| Figure.10 | Différents méthode de construction en terre | 10 |
| Figure.11 | Distribution des constructions en terre dans le monde | 11 |
| Figure.12 | Construction en terre au Timimoun | 11 |
| Figure.13 | Distribution des constructions en BTC en 'Algérie | 12 |
| Figure.14 | Cadre géologie de l'Algérie | 14 |
| Figure.15 | Cycle de la chaux | 16 |
| Figure.16 | fabrication de la chaux éteinte | 17 |
| Figure.17 | Représentation en perspective d'une couche de kaolinite | 19 |
| Figure.18 | Représentation en perspective d'une structure de muscovite | 20 |
| Figure.19 | Représentation en perspective d'une structure de smectite | 21 |
| Figure.20 | Schéma de principe plaque chaude gardée | 24 |
| Figure.21 | schéma de principe méthode des boîtes | 25 |
| CHAPITRE II : Caractéristiques Des Matériaux | | |
| Figure.22 | Zone de prélèvement d'argile et de sable concassé (Timimoun). | 27 |
| Figure.23 | Zone de prélèvement d'argile et de sable concassé (Adrar). | 28 |
| Figure.24 | Zone de prélèvement d'argile et de sable concassé (Reggan). | 29 |
| Figure.25 | Essai la masse volumique apparente. | 30 |
| Figure.26 | Essai la masse volumique absolue. | 30 |

| | | |
|--|--|----|
| Figure.27 | Essai Analyse granulométrique du sable concassé. | 31 |
| Figure.28 | Courbe granulométrique de sable concassée. | 32 |
| Figure.29 | Essai d'équivalent du sable. | 34 |
| Figure.30 | Essai de bleu méthylène. | 35 |
| Figure.31 | Résultat d'essai bleu méthylène. | 35 |
| Figure.32 | Matériel de l'essai sédimentométrie. | 36 |
| Figure.33 | Courbes granulométrique des sols étudiés. | 37 |
| Figure.34 | Essai le poids spécifique des grains. | 39 |
| Figure.35 | Limites d'Atterberg. | 40 |
| Figure.36 | Détermination de WL et WP | 40 |
| Figure.37 | Classification des sols étudiés sur le diagramme de Casagrande. | 42 |
| Figure.38 | Mode d'opérateur de limite de retrait. | 42 |
| Figure.39 | Appareille de Calcimètre Dietrich – Fruhling. | 44 |
| Figure.40 | Résultat de l'essai de bleu méthylène. | 45 |
| CHAPITRE III : Résultats et Interprétations | | |
| Figure.41 | Méthodologie de l'étude | 50 |
| Figure.42 | l'appareil AURAM 3000 au CAPTERRE | 52 |
| Figure.43 | Brique à l'air libre | 53 |
| Figure.44 | Brique à l'étuve | 53 |
| Figure.45 | Variation de la masse en fonction du temps de séchage (Argile-Sable). | 54 |
| Figure.46 | Méthode de préparation de brique | 55 |
| Figure.47 | Les étapes de préparation. | 56 |
| Figure.48 | Essai d'écrasement. | 56 |
| Figure.49 | Variation de la résistance à la compression simple en fonction de l'âge. | 57 |
| Figure.50 | Variation de la résistance à la compression simple en fonction de l'âge. | 57 |
| Figure.51 | Variation de la résistance à la compression simple en fonction de l'âge. | 57 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Figure.52 | Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage de la chaux à 7j. | 58 |
| Figure.53 | Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage de la chaux à 14j. | 58 |
| Figure.54 | Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage de la chaux à 28j. | 58 |
| Figure.55 | Schémas de l'Essai d'absorption | 60 |
| Figure.56 | Essai d'absorption. | 60 |
| Figure.57 | changement du coefficient d'absorption en fonction de la teneur en chaux. | 61 |
| Figure.58 | Essai d'abrasion | 62 |
| Figure.59 | Dispositif d'essai d'absorption. | 62 |
| Figure.60 | changement du coefficient d'abrasion en fonction de la teneur en chaux. | 63 |
| Figure.61 | préparation des plaques. | 63 |
| Figure.62 | L'appareille de mesure la conductivité thermique H112N. | 64 |
| Figure.63 | Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en chaux. | 66 |
| Figure.64 | Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en chaux. | 67 |
| Figure.65 | Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en chaux. | 67 |
| Figure.66 | Variation de la résistance thermique en fonction de la teneur en chaux. | 69 |
| Figure.67 | Variation de la résistance thermique en fonction de la teneur en chaux. | 69 |
| Figure.68 | Variation de la résistance thermique en fonction de la teneur en chaux. | 70 |

Liste des tableaux

| CHAPITRE I : synthèses bibliographiques | | |
|--|--|----|
| Tableau.1 | Les avantages et les Inconvénients d'adobe. | 04 |
| Tableau.2 | Les avantages et les inconvénients de pisé. | 06 |
| Tableau.3 | Les avantages et les inconvénients des blocs de terre comprimée. | 09 |
| Tableau.4 | Différentes réalisations de constructions en terre en Algérie (CNERIB 2003). | 13 |
| Tableau.5 | Les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé, BTC). | 22 |
| Tableau.6 | Comparaison de la conductivité thermique (théorique, exp). | 26 |
| CHAPITRE II : Caractéristiques des matériaux | | |
| Tableau.7 | Résultats de la masse volumique apparente et absolue | 31 |
| Tableau.8 | Résultats de l'analyse granulométrique des sables utilisés | 32 |
| Tableau.9 | Résultats de module finesse des sables concassées | 33 |
| Tableau.10 | Catégorie des Sables | 33 |
| Tableau.11 | Résultats d'essai de l'équivalent de sable | 34 |
| Tableau.12 | Valeurs bleu méthylène et de SST des sables concassé | 35 |
| Tableau.13 | Granularité des sols étudiés | 38 |
| Tableau.14 | Poids spécifiques des différents sols étudiés | 39 |
| Tableau.15 | Valeurs de Gs pour différents types de sols à 20° C | 39 |
| Tableau.16 | Résultats des limites d'Atterberg | 41 |
| Tableau.17 | Classification des argiles selon Atterberg, 1973 | 41 |
| Tableau.18 | Résultats de limite de retrait | 43 |
| Tableau.19 | Valeurs de l'indice de retrait des sols étudiés | 43 |
| Tableau.20 | Teneur en CaCO ₃ de quelques sols | 43 |
| Tableau.21 | Valeurs de la teneur en carbonate de calcium | 44 |
| Tableau.22 | Résultats de bleu méthylène VB et de SST des sols étudié | 46 |
| Tableau.23 | Classification des sols d'après Philipponat | 46 |
| Tableau.24 | Composition chimique de l'eau de gâchage utilisé | 46 |
| Tableau.25 | Paramètres physico-mécaniques et chimiques des matériaux étudiés | 47 |

Abréviation et Symboles :

| | |
|-------------------------|---|
| BTCS : | Brique de terre comprimée et stabilisée. |
| BTC : | Brique de terre comprimée. |
| CRATerre : | Centre internationale de la construction en terre. |
| O : | Oxygène. |
| T-O : | Tétraédrique- octaédrique. |
| T-O-T : | Tétraédrique- octaédrique- Tétraédrique. |
| T-O-T-O : | Tétraédrique- octaédrique- Tétraédrique- octaédrique. |
| L.C.P.C : | Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées. |
| USCS : | Unified soil classification system (Classification Américaine). |
| γ_s : | Poids spécifique des particules solides. |
| Υ_w : | Poids volumique de l'eau à 20°C. |
| ES : | Equivalent de sable. |
| ES_v : | Equivalent de sable visuel. |
| ES_p : | Equivalent de sable piston. |
| W : | Teneur en eau (%). |
| W_L : | Limite de liquidité (%). |
| W_P : | Limite de plasticité (%). |
| W_R : | Limite de retrait(%). |
| IP : | Indice de plasticité. |
| IR : | Indice de retrait. |
| SST : | Surface spécifique totale (m ² /g). |
| VB : | Valeur du bleu de méthylène. |
| Y_d : | Le poids sec (g/cm ³). |

| | |
|----------------------------------|---|
| ρ_{app} : | Masse volumique apparente |
| ρ_{abs} : | Masse volumique absolue. |
| M_f : | Module de finesse |
| Rc : | Refus cumulés (%) |
| Tc : | Tamisât cumulés (%) |
| D : | Diamètre (mm) |
| AA : | Argile d'Adrar |
| AT : | Argile de Timimoun |
| AR : | Argile de Reggan |
| SCR : | Le sable concassé de Reggan |
| SCT : | Le sable concassé de Timimoun. |
| SCA : | Le sable concassé d'Adrar. |
| CaCO₃ : | Carbonate de calcium. |
| MAC : | Le mélange (Argile +Sable +la chaux) de la région Adrar. |
| MTC : | Le mélange (Argile +Sable +la chaux) de la région Timimoun. |
| MRC : | Le mélange (Argile +Sable +la chaux) de la région Reggan. |
| RC : | La résistance a la compression simple (MPa). |
| Cb : | Coefficient d'absorption (g/cm ² *t). |
| Ca : | Coefficient d'abrasion (cm ² /g). |
| R : | La résistance thermique. |
| Cp : | Capacité thermique. |
| λ : | Conductivité thermique (W/m.K) |
| CP : | Chaleur spécifique (kJ/m ³ .K), (J/kg.K) |
| C : | Capacité thermique (J/K) |
| U : | Coefficient de transmission calorifique (W/m ² .K) |

| | |
|-------------------------------|--|
| Φ : | Densité de flux (W/m^2) |
| D : | Diffusivité thermique (m^2/s) |
| e : | Epaisseur d'éprouvette (cm) |
| E : | Effusivité thermique ($W/m^2.K.s^{0,5}$) |
| φ : | Flux thermique ($W/cal.s$) |
| h : | Hauteur (cm) |
| CAPTERRE : | Centre Algérien du Patrimoine Culturel Bâti en Terre .Timimoun |

Résumé :

Les matériaux économiques à base des produits naturels locaux représentent un intérêt certain en tant que matériaux de substitution ainsi que la réduction de la consommation énergétique dans le secteur de bâtiments présente aujourd'hui une priorité primordiale dans les politiques des pays industrialisés.

Cependant la wilaya d'Adrar est située au niveau de la plateforme saharienne, dans ce contexte la région d'Adrar présente une richesse énorme dans les ressources minières pouvant être exploitées dans le secteur BTP.

Notre travail ayant pour but de la conception d'un matériau de construction à base des matériaux locaux qui ont prouvé leur usage depuis des millénaires, à travers des sites patrimoniaux remarquables. Nous avons ciblé dans cette étude, la conception de brique de terre comprimées stabilisée (BTCS) avec la chaux éteinte à partir d'argiles prélevées sur des sites sélectionnés tel que la région d'Adrar, la région de Reggane et la région de Timimoun, ainsi que du sable concassé.

Dans un premier temps une connaissance des propriétés physiques et mécaniques des trois échantillons de terre, extraits à partir des trois gisements. Ces gisements d'argile et de sable concassé sont situés au niveau de la région d'Adrar, Timimoun et Reggane.

Ensuite, la campagne expérimentale menée sur deux types de brique de terre comprimée BTC et BTCS, On a utilisé la presse manuelle de type AURAM 3000 (CAPTerre à Timimoun), a mis en évidence les bienfaits de la terre crue, et principalement la conductivité thermique, De plus l'effet de dosage de chaux éteinte sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques de ces briques a été étudié.

Enfin une étude de performance des briques vis à vis à l'abrasion et à l'absorption est présentée.

Mots clés : BTC, BTCS, résistance à la compression, conductivité thermiques

Introduction générale

La terre, matière première naturelle, est utilisée par l'homme dans la construction, depuis des milliers d'années. plus d'un tiers des habitants du globe vit aujourd'hui dans des habitats en terre. on dénombre de très nombreux modes de construction qui traduisent l'identité des lieux et des cultures : adobes, pisé, torchis, façonnage, bauge, blocs comprimées, des blocs taillés...

De nombreuses méthodes de fabrication de briques en terre ont été mises en œuvre, en relation avec le niveau de développement de l'habitat en milieu urbain et rural.

Les techniques de la brique de terre comprimée stabilisée (BTS) à base d'argile et sable de carrière offrent une adaptation à l'environnement désertique des zones arides et répond aux critères de la durabilité, dans ces régions telle qu'Adrar, Reggane et Timimoun.

Nous avons organisé notre mémoire comme suivant :

- **Le premier chapitre** présente les généralités sur quelques techniques de construction en terre le plus utilisé (comme l'adobe, le pisé et le bloc de terre comprimée) et leurs distribution au niveau de monde et au niveau de l'Algérie

Le présent chapitre présente les méthodes de stabilisation et particulièrement la stabilisation à la chaux. ainsi que des générales sur les argiles et leurs caractéristiques.

Finalement les propriétés thermiques, mécaniques et physiques de ces techniques et les méthodes de mesures de conductivité thermique sont présentés.

- **Le deuxième chapitre** est consacré pour l'identification des matériaux utilisés pour la fabrication des briques de terre comprimées, ces matériaux ont été prélevés au niveau des gisements sélectionnés, le sable concassé et le sol de nature argileux.

- **Dans le troisième chapitre** vise l'évolution des caractéristiques mécaniques et thermiques des briques de terre comprimées en fonction des différents dosages de chaux éteinte (2%, 4%,6% et 8%). Cependant les critères de la durabilité (l'absorption et l'abrasion) des briques de terre comprimées stabilisées sont étudiés.

Enfin, la conclusion générale.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

1. Introduction :

Depuis 10000ans, la terre a été employée comme matériau de construction. A l'heure actuelle, un tiers de la population mondiale vit dans des constructions en terre.

Dans ce chapitre nous avons présentés des informations général sur les matériaux terre crus et leurs différentes techniques de fabrication au niveau de monde, ainsi que les avantages et les inconvénients. en plus ont donné un bref historique sur l'utilisation des briques de terre creux comme l'adobe ,pisé et blocs de terre comprimé à travers le monde et en l'Algérie tel que le Sahara Algérienne comme notre région (Wilaya d'Adrar).

2. Généralités sur les techniques de construction en terre et leurs propriétés thermo physico-mécaniques :**a. L'adobe :**

Les premiers éléments de construction préfabriqués utilisés par l'homme étaient des briques moulées en terre crue appelées « adobes », on est une technologie utilisée depuis des millénaires partout à travers le monde [1].



Figure.1: Briques d'adobe.

L'adobe est un matériau de construction fait d'un mélange de sable, d'argile, une quantité du paillé hachée ou d'autre fibre. De nature assez argileuse (jusque à30% de fraction fine), mais très sableuse, ajoutée d'eau jusqu'à obtenir un état de pate semi ferme (15à30%d'eau). Chaque élément du mélange joue son rôle.

❖ **Fabrication d'adobe :**

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 [1].



Figure.2 : Etapes de production d'adobe.

Tableau.1: Les avantages et les Inconvénients d'adobe [2] :

| Avantages | Inconvénients |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Matière première facilement et localement disponible. - Equipement de production peu coûteux. | <ul style="list-style-type: none"> - Consomme beaucoup d'eau. - Temps de séchage en fonction du climat. - Faible résistance à l'eau. |

b. Les pisés :

Le pisé, technique séculaire de mise en œuvre de terre crue, offre des qualités d'habitabilité et d'adaptation exceptionnelles mais nécessite une attention et un suivi régulier. Bien construit et protégé, le bâtiment en pisé traverse les siècles et s'adapte tout naturellement aux divers besoins des hommes [1].

Traditionnellement, les bâtiments en pisé portent de « bonnes bottes » et un « bon chapeau ». (Figure.3) c'est-à-dire que le soubassement est traité de manière à éviter les remontées capillaires, (le plus souvent en galets, en pierre ou en briques

de terre cuites maçonnées) et le débord de toiture est suffisant pour éviter le ruissellement de l'eau sur la façade. Le pisé, quant à lui, est en fait la compaction d'un volume de terre à l'intérieur d'un coffrage de façon manuelle en utilisant un pilon ou à l'aide de machinerie spécialisée [1].



Figure.3 : Mosquée en pisé édifée en 1788(chine) [3].

❖ **Fabrication du pisé :**

Le mode de production du pisé est d'un principe assez simple : la terre est déversée dans un coffrage puis compactée.

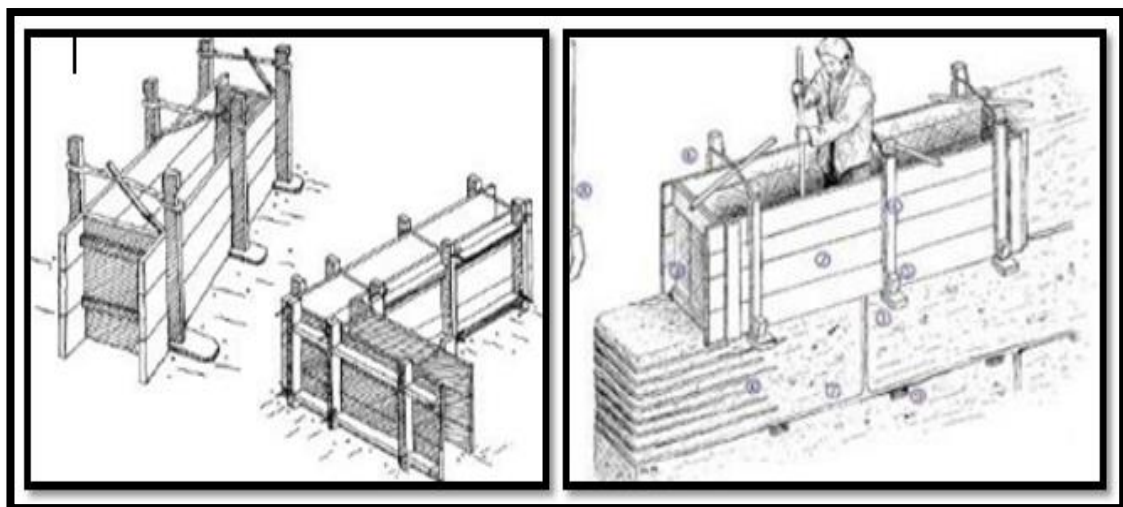


Figure.4 : Technique de construction en pisé [1].



Figure.5 : Mur en pisé [3].

Tableau.2 : Les avantages et les inconvénients de pisé [2].

| Avantages | Inconvénients |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">- La construction en pisé était une construction peu chère et solide.- Le matériau est pris in situ. La terre extraite du sol était quasiment prête à l'emploi, elle ne nécessitait presque aucune transformation ni séchage. | <ul style="list-style-type: none">- Très spécifique, la construction en pisé nécessitait beaucoup de main d'œuvre. |

c. Les Blocs de Terre Comprimée :

Le bloc de terre comprimée est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe. L'idée de compacter la terre pour améliorer la qualité et la résistance de bloc de terre moulée est pourtant ancienne et à l'aide de pilons de bois que l'on réalisait les premiers blocs de terre comprimée [4].

Le BTC est très régulier en forme et en dimension, ils sont pleins ou perforés ce qui permet de réaliser des travaux de maçonnerie très variés.

Les blocs de terre comprimée, sont fabriqués à partir de terre humide et compactée dans une presse manuelle.



Figure.6 : Brique de terre comprimée BTC.

Le bloc de terre comprimée peut être stabilisé. Dans ce cas on parle alors de « bloc de terre comprimée stabilisée ». Stabiliser la terre, c'est modifier les propriétés d'un système terreau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec des applications particulières [4].

❖ **Fabrication du BTC :**

La production du BTC est un processus en trois étapes

- Préparation de la terre.
- Compression.
- Séchage et cure.

➤ **Préparation de la terre :**

La sélection d'une terre avec une bonne granularité et une bonne cohésion est essentielle .en général, la matière première doit subir une préparation avant la phase de compression.

Les principales opérations sont :

- Pulvérisation de la matière première et élimination par criblage des plus gros grumeaux d'argile, des pierres éventuelles pour obtenir un mélange pulvérulent avec lequel le stabilisant pourra se mélanger au mieux.
- Mélange de la terre et du stabilisant puis humidification du mélange.
-



Figure.7 : Préparation de mélange de BTC.

➤ **Compression :**

Va donner sa forme calibrée à la brique et aussi assurer sa résistance mécanique. On distingue tout d'abord les presses manuelles qui utilisent un bras de levier agissant sur un piston qui comprime le béton de terre contenu dans un moule. Elles présentent un faible rendement car elles nécessitent plusieurs manipulations.



Figure.8 : Compression de BTC avec une presse manuelle.

➤ **Le séchage :**

C'est une phase importante dans la chaîne de fabrication des briques en terre compressée. En effet c'est au cours de cette étape que la prise de la chaux aura lieu. La phase de séchage est doit être progressive puisque l'évaporation de l'eau présent dans les briques doit se lentement. Pour ne pas perturber le cycle du séchage, les briques doivent être mises à l'abri des intempéries mais aussi du vent. Ce dernier pourrait entraîner un séchage trop rapide.



Figure.9 : Séchage et cure de BTC.

Tableau.3 : Les avantages et les inconvénients des blocs de terre comprimée [5].

| Avantages | Inconvénients |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - 100% naturel, - respect de l'environnement, - isolation acoustique intéressante grâce à leur densité, - qualités d'inertie thermique et d'assainissement, - Très bon régulateur hygrométrique, - Ne nécessite pas forcément l'application d'un enduit ou d'une peinture de finition, - Finition lisse, | <ul style="list-style-type: none"> - matériau relativement difficile à trouver, - Fabrication des briques longue et fatigante, - main d'œuvre importante (même sur une petite surface, le besoin en terre étant toujours très important), - Fragilité: au moindre choc la brique se brise ou s'effrite, - limite architecturale contraignante |

Quelque chiffre :

- 50 % de la population mondiale vit dans une habitation en terre crue ;
- Elle représente 17% des édifices classés au patrimoine par l'UNESCO ;
- 15 % du patrimoine bâti français.

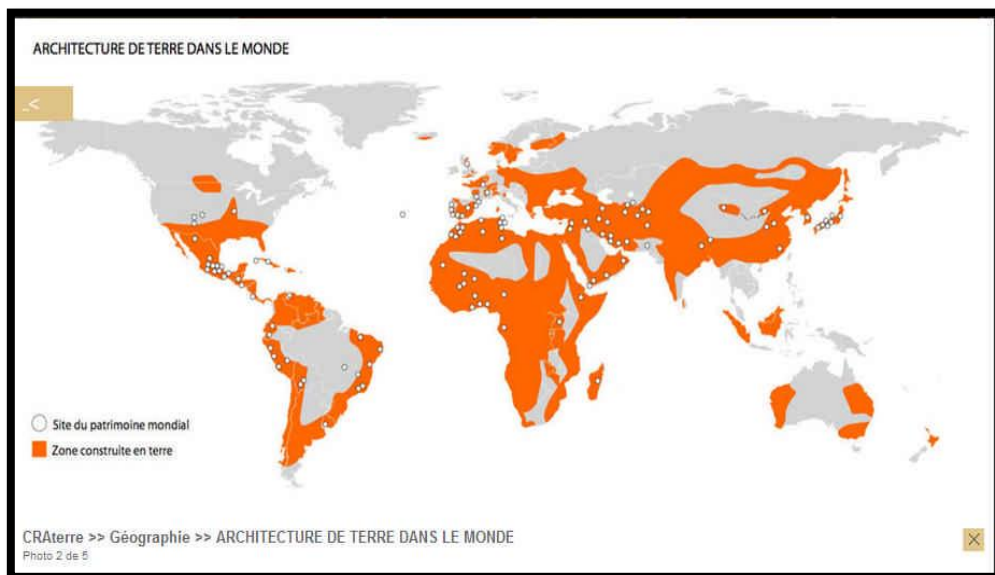


Figure.11 : Distribution des constructions en terre dans le monde [3].

On peut citer ici quelques exemples fascinants : Construction en terre au Timimoun (Figure.12)

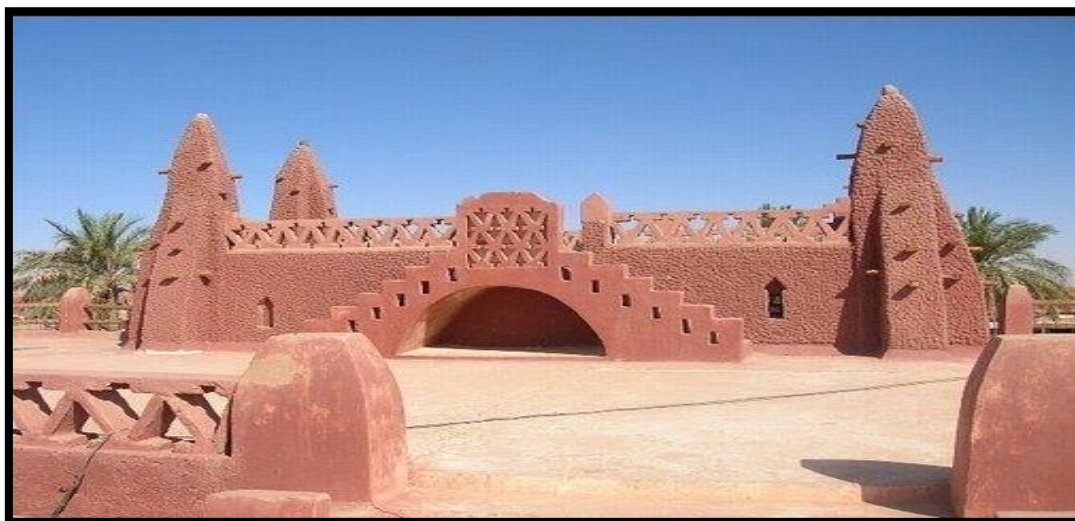


Figure.12 : Construction en terre au Timimoun.

3.1. La construction en terre en Algérie :

La terre comme matériau de construction a été largement utilisé en Algérie par l'habitat traditionnel. Diverses régions du pays en témoignent encore de l'utilisation séculaire de ce matériau sous diverses techniques de construction. La figure.13 est présentée les zones qui sont utilisées la construction terre en Algérie.

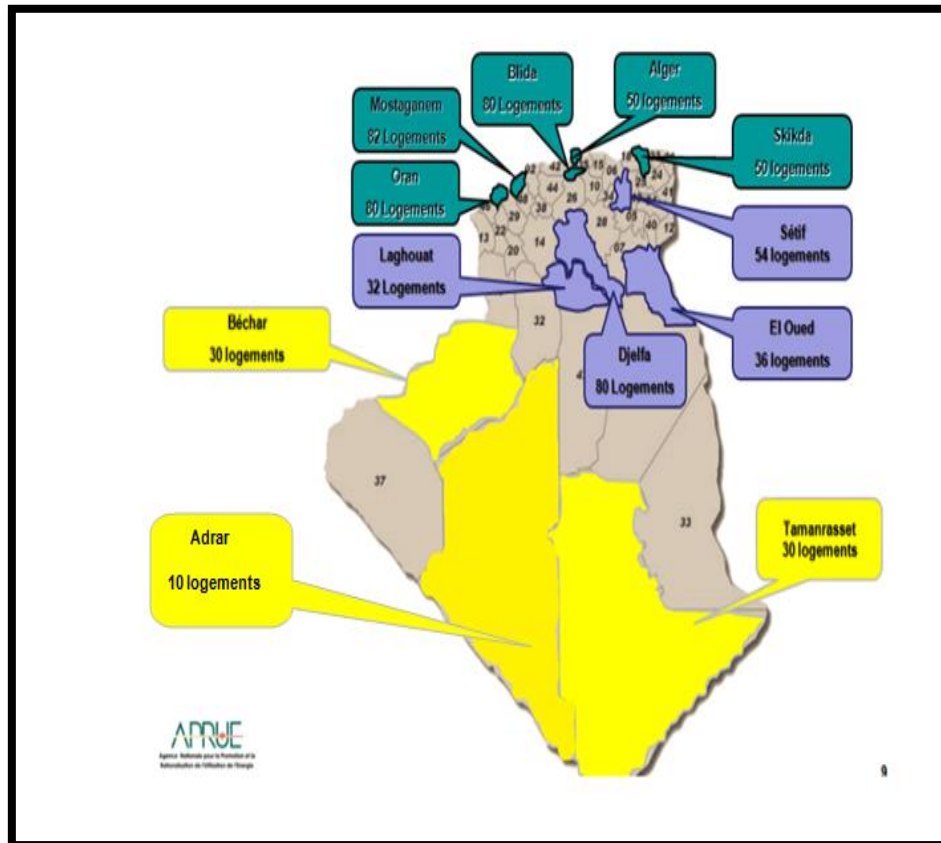


Figure.13 : Distribution des constructions en BTC en 'Algérie [2].

L'Algérie a manifesté très tôt son intérêt pour la revalorisation des matériaux locaux qui sont biodégradables et qui ne nuisent pas à l'environnement.

Le Décret exécutif n : 12-79 du 19 Rabie El Aouel 1433 correspondant au 12 février 2012 portant création du Centre Algérien du Patrimoine culturel bâti en Terre **CAPTerre** à la ville de Timimoun (Appeler Oasis Rouge) et fixant son organisation et son fonctionnement. L'un des objectifs du centre est Concevoir ou réaliser un édifice contemporain qui utilise le matériau terre.

Le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du bâtiment, regroupe plusieurs projets réalisés en terre crue et en BTC qui ont pu voir le jour tels que (Tableau.4) [12].

Tableau.4 : Différentes réalisations de constructions en terre en Algérie (CNERIB 2003).

| | |
|-----------|--|
| 1969-1970 | 136 logements en pisé à Bouhiletprés de Batna |
| 1971-1973 | Village d'Abadla, en terre rempissante |
| 1972 | Habitations à Zéralda en pisé stabilisé (banché coulé) |
| 1973-1975 | Village de Mostafa Ben Brahim en pisé |
| 1976 | 100 logements à Felliacheprés de Biskra, en BTS. |
| 1980 | 120 logements à Madher, Boussaâda en BTS |
| 1981 | 40 logements à Chéraga, en blocs de terre comprimés (BTC) |
| 1984 | Prototypes bioclimatiques en BTC, à Tamanrasset et à Souidania |
| 1986 | 10 logements en BTC à Adrar et 10 à Reggan |
| 1994 | 30 logements en BTC, à Tamanrasset |
| 1998 | Prototype expérimental en pisé à Souidania |

4. Cadre géologie de la région d'Adrar :

D'une façon générale, les dépôts du primaire et du secondaire au Sahara sont d'origine marine. Les dépôts du tertiaire et du quaternaire sont continentaux. Les deux périodes de sédimentation sont séparées par une phase orogénique majeure au cours de laquelle se sont formés les Atlas et les hauts plateaux : phase du plissement hercynien.

Dans la dépression de TOUAT, région se trouvant au sud-Ouest d'Alger à environ 1400km, affleure essentiellement l'accumulation de différents dépôts (des grès quartzites, des grès à débris de reptiles et des argiles gréseuses).

Les calcaires du crétacé terminal aussi bien que les formations gypso lagunaire ne se font observer qu'en certaines parties de la région en formant la continuité stratigraphique appartenant aussi au continental intercalaire.

L'accumulation de sable éolien (sable de dune) est d'une part originale de la région se faisant sentir de long de la route nationale N°6.

Le crétacé inférieur tel que défini par les études stratigraphiques s'érige sous forme de petits plateaux étagés dont leurs bordures gisent sous un pendage assez net, mettant à jour des grès hétérogènes peu argileux, couverts par endroits par des alluvions limoneux rougeâtre du quaternaire.

L'aspect morphologique de la région est tout simplement l'image d'une large étendue pénéplainisée couverte totalement en surface par les terrains du continental intercalaire parfois eux-mêmes surmontés par les dépôts du Reg quaternaire où les affleurements des argiles, grès organiques et sable villa-franchien s'étalent en dépôts minces et réguliers [2].

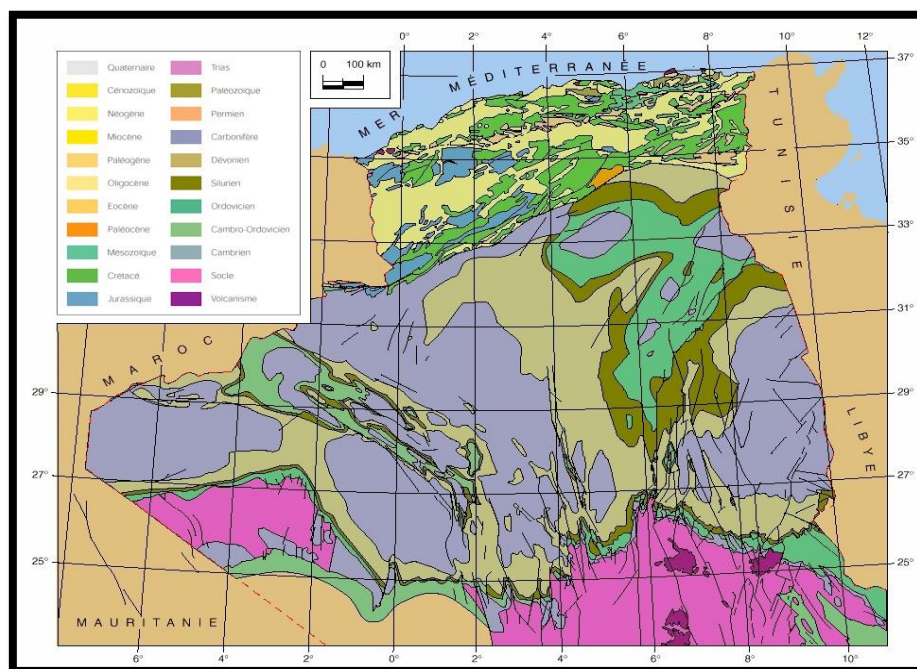


Figure.14 : Cadre géologie de l'Algérie [2].

5. Stabilisation :**a. Définition :**

La stabilisation est l'ensemble des procédés permettant d'améliorer les caractéristiques d'une terre, afin de créer un matériau permettant la fabrication des blocs de terre comprimée [4].

b. Objectif :

En stabilisant, nous intervenons sur la texture et structure de la terre. Cinq opérations possibles sont :

- ✓ La réduction de volume de vide entre les particules ;
- ✓ La fermeture des vides qui ne peuvent être supprimés ;
- ✓ L'augmentation des liens entre les particules.
- ✓ Améliorer les caractéristiques mécaniques de la terre (résistance à la compression, cohésion) en réduisant les vides entre les particules, en améliorant ou en créant des liaisons entre les particules.
- ✓ Réduire la sensibilité à l'eau (gonflement, retrait) et la perméabilité en bouchant les vides entre les particules [4].

c. Procédés :

Trois procédés permettent de stabiliser la terre :

c.1. Stabilisation mécanique : le compactage de la terre modifie sa densité, sa résistance mécanique ainsi que sa compressibilité, sa perméabilité et sa porosité.

c.2. Stabilisation physique : les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur sa texture, c'est-à-dire en mélangeant judicieusement des fractions de grains de taille différentes.

c.3. Stabilisation chimique : d'autres matériaux ou des produits chimiques peuvent être ajoutés à la terre. Les liants (ciment et chaux éteinte) créent entre les grosses particules du sol des liaisons mécaniquement résistantes même si le matériau se trouve ensuite en présence d'eau [4].

5.1. La chaux :

a. Définition :

Est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique (pyrolyse) du calcaire. Elle est utilisée depuis l'Antiquité, notamment dans la construction. Chimiquement, c'est un oxyde de calcium avec plus ou moins d'oxyde de magnésium mais la désignation usuelle de chaux peut englober différents états chimiques de ce produit [6].

b. Cycle de la chaux :

Les produits dérivés du calcaire (CaCO_3) possèdent la capacité unique d'être transformés et de reprendre leur forme originale. Le cycle de la chaux consiste à cuire le calcaire pour former la chaux vive (CaO). La chaux éteinte (Ca(OH)_2) peut alors être produite en ajoutant de l'eau à la chaux vive. Le dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère peut alors réagir avec la chaux éteinte pour la reconvertir en calcaire [4].

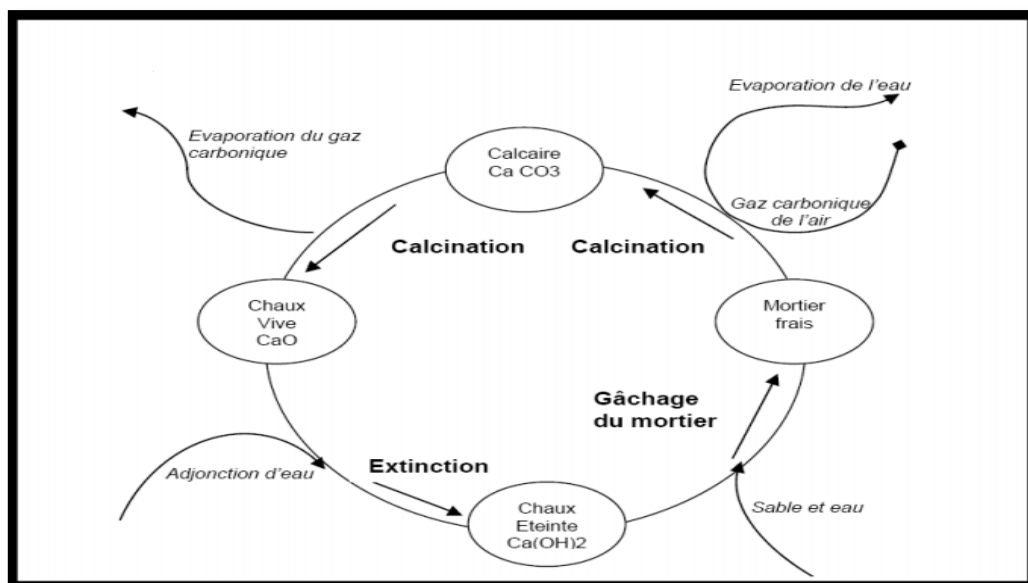


Figure.15 : Cycle de la chaux [6].

c. Chaux aériennes :

La chaux aérienne, que l'on trouve sous l'appellation standard CAEB (chaux aérienne éteinte pour le bâtiment) est déterminée par la norme NFP 15510. elle correspond à la chaux aérienne, très pure.

c.1. Chaux vive :

$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (chaux vive).

$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{Q}$ (chaux hydratée-ou Éteinte).

c.2. Chaux éteinte :

La chaux est obtenue à partir d'un calcaire très pur, qui, porté à une température d'environ 1000 degré, et suite à une réaction chimique se décompose en chaux vive (CaO) et en gaz carbonique.



Après cuisson, la chaux vive garde le même aspect physique mais sa masse volumique apparente devient plus faible. Elle réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur, puis se transforme en une poudre blanche appelée chaux éteinte (Ca(OH) 2 [7].

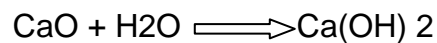


Figure.16 : fabrication de la chaux éteinte [7].

6. Les agriles :

L'argile est définie comme étant un matériau cohérent dont l'état physique dépend de la quantité d'eau ajoutée au matériau et passe de l'état liquide à l'état solide. Elle est formée de particule invisible à l'œil nu de dimensions inférieures à $2\mu\text{m}$ en général [8].

a. Définition :

L'argile est définie comme étant un matériau cohérent dont l'état physique dépend de la quantité d'eau ajoutée au matériau et passe de l'état liquide à l'état solide. Elle est formée de particule invisible à l'œil nu de dimensions inférieures à $2\mu\text{m}$ en général [8].

b. Les grands groupes d'argile :

Parmi les différents groupes d'argiles, citons-les plus connus :

- les kaolinites,
- les illites,
- les smectite.

b.1. Groupe des KAOLINITES :

La formule générale du groupe des kaolinites est $(\text{Si}_2)(\text{Al}_2)\text{O}_5(\text{OH})_4$ (extrait de Grimm 1968).

Les feuillets Si et Al sont fortement liés du fait de l'oxygène qu'ils mettent en commun (Figure.17). Les faces inférieures des feuillets Si sont chargées par des oxygènes, et les faces supérieures des feuillets Al par des groupes hydroxyles OH^- , ce qui permet la création de liens hydrogènes puissants entre les couches successives. Les feuillets presque en contact empêchent les molécules d'eau, dont le diamètre de $2,7 \text{ \AA}$ est important, de pénétrer.

En microscopie électronique, les minéraux de kaolinite se présentent sous forme de plaquettes hexagonales correspondant à un empilement de 10^3 à 10^6 feuillets élémentaires parfois remarquablement bien développées ; cependant on constate certaines déformations et en particulier des élongations. D'autre part, les

cristaux peuvent manifester des altérations plus ou moins marquées, se traduisant par une exfoliation des feuillets ou une corrosion du cristal [10].

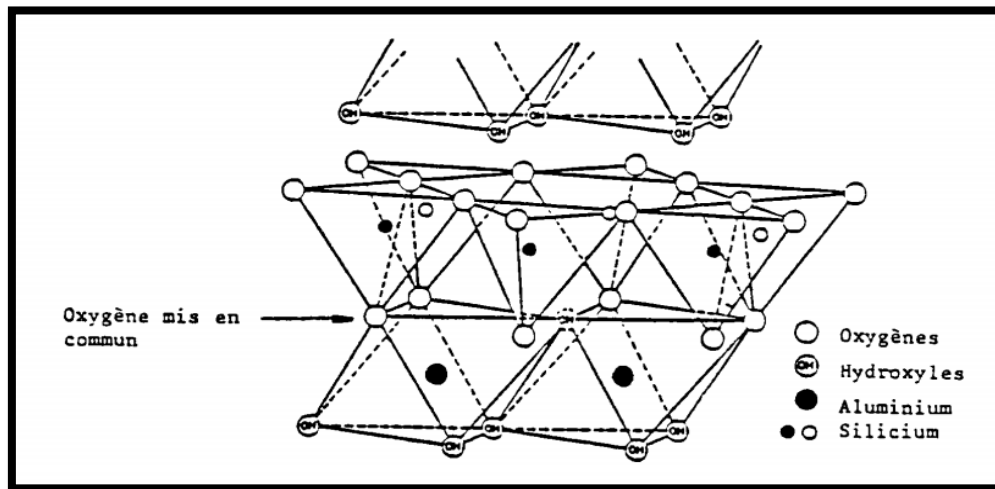


Figure.17 : Représentation en perspective d'une couche de kaolinite [10].

b.2. Groupe des ILLITES :

Les couches de ces minéraux sont constituées de deux feuillets de tétraèdres Si qui mettent en commun leur oxygène avec une couche d'octaèdres d'Al (au milieu, (Figure.18).

L'équilibre électrique est assuré par un nombre adéquat de OH^- et O^{2-} . Quand Si^{4+} est remplacé par Al^{3+} , de gros ions K^+ viennent s'intercaler entre les couches pour assurer l'électro neutralité.

En microscopie électronique les illites sont caractérisées par de très fines particules de quelques centaines d'Angströms de diamètre, souvent équidimensionnelles mais pouvant s'allonger légèrement dans certains cas et prendre la forme de lattes [10].

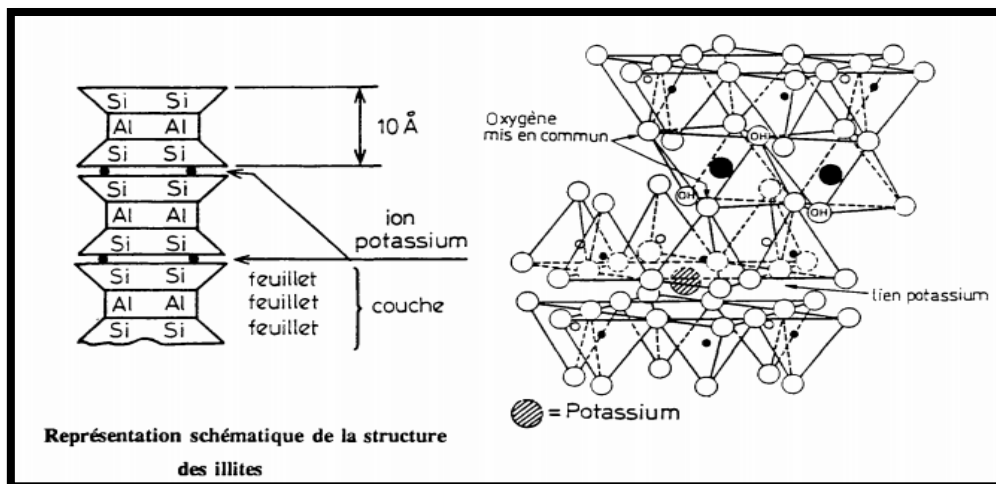


Figure.18 : Représentation en perspective d'une structure de muscovite [10].

b.3. Groupe des SMECTITES :

La caractéristique essentielle de ce minéral (Figure.19) est de posséder entre des couches de même constitution que l'illite un certain nombre de couches d'eau, si bien que la distance entre deux couches est très variable. Cette capacité d'absorption d'eau est réversible, le matériau gonfle et peut atteindre plusieurs fois son volume sec. Plusieurs substitutions sont possibles, surtout dans la couche octaédrique, et peuvent créer un déficit de charge annihilé par l'adsorption d'ions extérieurs Na^+ ou Ca^{2+} .

En microscopie électronique, les smectites se présentent sous la forme de feuillets très étendus ayant souvent un aspect fripé ou des bords enroulés. La taille des particules est nettement inférieure au micromètre, et leur épaisseur est très faible, quelques dizaines d'Angströms, c'est à dire ici quelques feuillets. Il arrive fréquemment que les argiles rencontrées dans la nature soient constituées d'un mélange de deux ou plusieurs minéraux argileux appartenant à différents groupes. On les appelle alors des inters stratifiés [10].

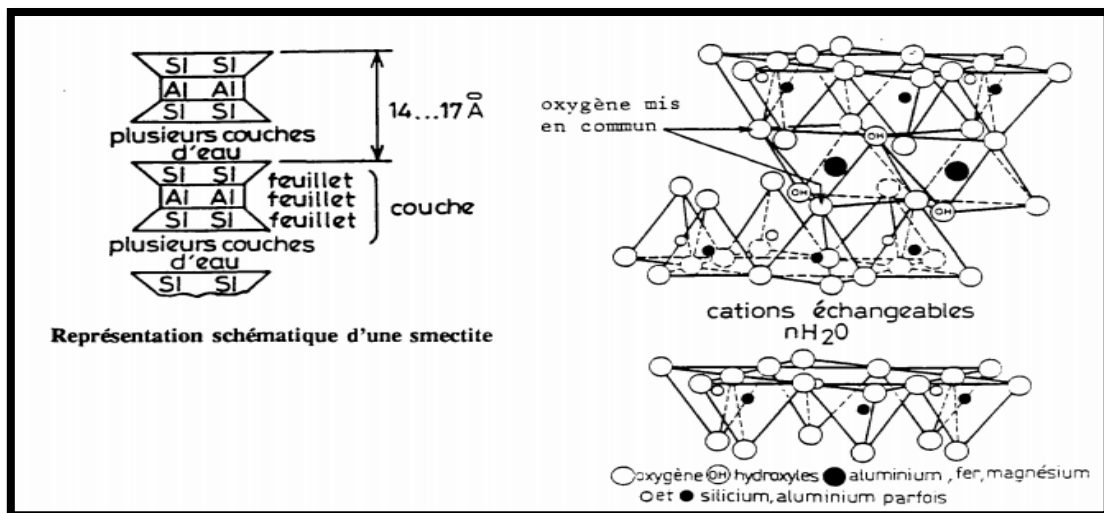


Figure.19 : Représentation en perspective d'une structure de smectite [10].

7. Propriétés thermo physico-mécaniques :

Pour les matériaux de construction Il existe trois caractéristiques :

a. Propriétés thermique :

a.1. La Conductivité thermique (λ) : est l'une des propriétés thermo physiques recherchées pour les matériaux de stockage. Elle mesure la capacité d'un matériau à conduire de la chaleur. Elle dépend de la nature du matériau et de la température.

a.2. Capacité thermique massique (chaleur spécifique ; chaleur massique) (C_p) : On appelle capacité thermique massique la quantité de chaleur qu'il faut appliquer à 1kg de matière pour élever sa température de 1K. Elle s'exprime en $(J.kg^{-1}.K^{-1})$ ou $(cal.kg^{-1}.K^{-1})$.

a.3. Capacité thermique : La capacité thermique est l'énergie qu'il faut apporter à un corps pour augmenter sa température de un kelvin (1K). Elle s'exprime en (J/K) . C'est une grandeur extensive : plus la quantité de matière est importante plus la capacité thermique est grande.

b. Propriétés physique :

b.1. La Masse volumique : est définie comme le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume occupé par la matière solide, compris les vides contenus dans les grains (volume réel) ($\rho = M / V$).

b.2. Absorption d'eau : est le processus par lequel des molécules de gaz ou de liquide mise en contact avec un matériau solide s'incorporent dans la totalité de son volume.

b.3. Retrait au séchage : est une action qui consiste à revenir sur un état antérieure ou sur un état normal.

c. Propriétés mécaniques :

Résistance à la compression : est la capacité d'un matériau ou d'une structure a supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par compression (écrasement).

Tableau.5 : Les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé, BTC) [1].

| 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 | < 2,4 | < 2,4 |
| 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 |
| Retrait au séchage (mm/m) | 1 | 1 – 2 | 0,2 – 1 |

8. Transfert thermique et méthodes de mesure de la conductivité thermique :**a. Les méthodes en régime permanent ou stationnaire :**

Ces méthodes ne s'occupent que de la mesure de la conductivité thermique des matériaux.

Elles reposent sur un principe qui consiste à instaurer un gradient de température stationnaire et monodimensionnel au sein du matériau et à déterminer ensuite la conductivité thermique à l'aide de la loi de Fourier [9].

Si on considère un échantillon d'épaisseur e on peut déduire la conductivité en utilisant l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{S \cdot \phi}{e \cdot (T_1 - T_2)}$$

Avec :

S : la surface traversée par le flux (m²)

T₁-T₂ : la différence de température (K)

e : épaisseur du matériau (m)

b. La méthode de la plaque chaude gardée (ISO 8302) :

Le principe du montage expérimental consiste à maintenir une différence de température ΔT entre deux plaques, A et B, planes, parallèles et portées respectivement aux températures constantes T_A et T_B. Un échantillon du matériau à étudier, solide faiblement conducteur, est placé entre les deux plaques (Figure.20). La méthode de la plaque chaude gardée a été développée pour la mesure des faibles conducteurs thermiques (Gustafson et al 1981 ; Pradhan et al 1991) [9].

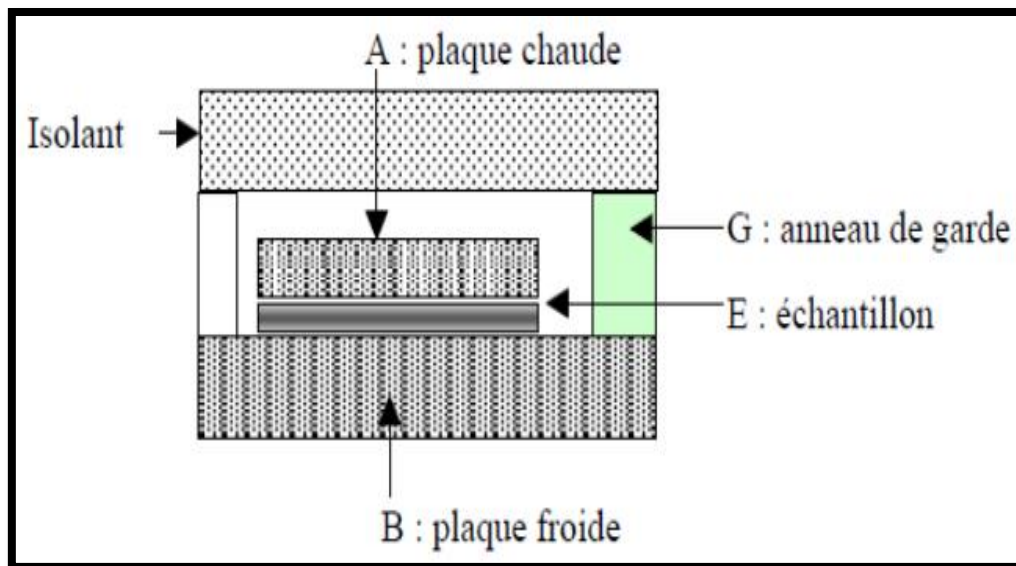


Figure.20 : Schéma de principe plaque chaude gardée [9].

Soit e l'épaisseur de l'échantillon et le flux thermique en régime stationnaire par unité de surface, transféré d'une plaque à l'autre.

La conductivité thermique λ du matériau est donnée par :
$$\lambda = \frac{e \cdot \Phi}{\Delta T}$$

Avec : $\Delta T = T_A - T_B$

Afin d'éviter les phénomènes de bord, la plaque A est entourée d'un anneau porté à la même température T_A . L'intervalle qui sépare l'anneau de garde de la plaque A est suffisamment petit pour éviter une perturbation trop importante du flux thermique sur les bords de la plaque.

La précision de la mesure dépendra de celles des quantités figurants dans l'équation [9].

Dans cette méthode on utilise l'appareille de mesure la conductivité thermique des matériaux solides (Apparatus.P.A. Hillton Ltd England). Version H112N.

c. La méthode des boîtes :

Le principe de cette méthode, mise au point par le Laboratoire d'Etudes Thermique et Solaires de l'université Claude Bernard de Lyon, est schématisé sur la figure.21 [9].

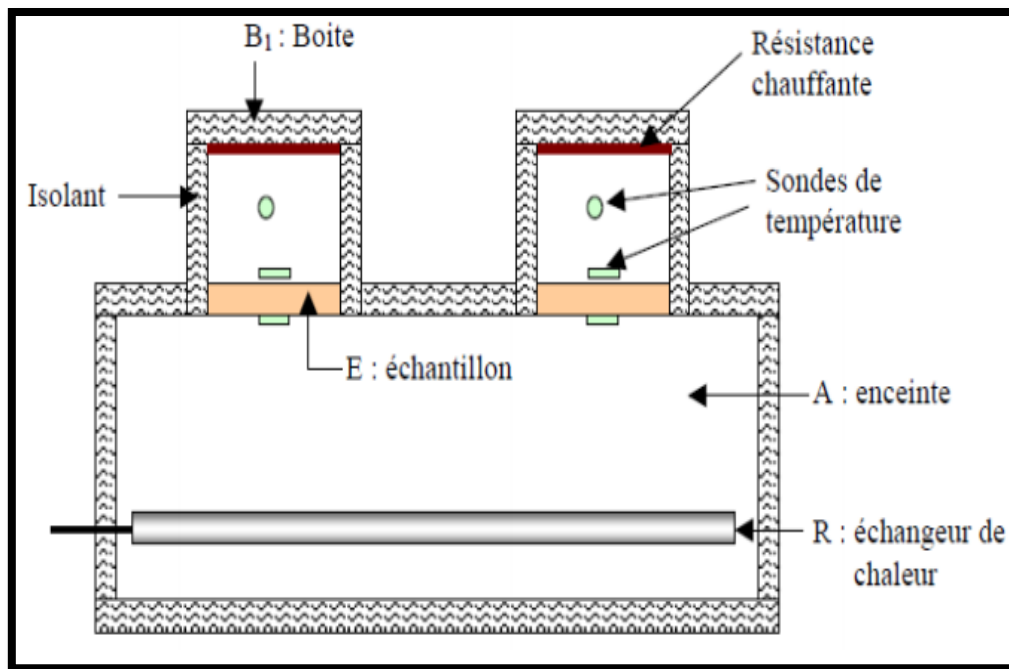


Figure.21 : schéma de principe méthode des boîtes [9].

C'est une méthode qui permet de déterminer la conductivité thermique par un bilan énergétique :

- l'effet Joule produit par l'élément chauffant C : $\Phi_j = \frac{VJ}{R}$

- les déperditions thermiques à travers la boîte B :

$$\Phi_d = C_1 \cdot (T_B - T_{am})$$

- le flux conductif à travers l'échantillon : $\Phi_c = \frac{\lambda s}{e} (T_c - T_f)$

On sait que : $\Phi_j = \Phi_d + \Phi_c$

Donc on déduit que :

$$\lambda = \frac{e}{s(T_c - T_f)} \left(\frac{V^2}{R} - C_1 \cdot (T_B - T_A) \right)$$

Cette méthode a été utilisée pour déterminer la conductivité thermique de la terre stabilisée au ciment, utilisée dans la construction au nord Maroc, du liège granulaire et compact et du mortier à base du ciment et de sable. Un étalonnage réalisé sur le polystyrène expansé donne des résultats satisfaisants [9].

Tableau.6 : comparaison de la conductivité thermique (théorique, exp) [9].

| λ littérature (W/m.K) | λ exp |
|-------------------------------|---------------|
| 0.043 | 0.04357 |

La conductivité thermique est donnée par la relation :

$$\lambda = \frac{\Phi}{4\pi * l * \tan\alpha}$$

9. Conclusion :

Dans ce chapitre a permis de présenter la construction en terre crue et les différentes techniques de fabrication des briques de terre crue, ainsi que leurs propriétés mécaniques, physiques et les différentes techniques de mesure de la conductivité thermique. Auparavant les techniques de stabilisation comme ainsi que les différents types d'argiles sont présentées.

Par ailleurs, nous avons constaté l'intérêt de l'Algérie d'utiliser et revalorisation des matériaux locaux dans la construction en terre crue, cela la construction en terre comporte une palette très large d'avantages : propriété mécanique, propriété thermique avec une excellente isolation, hygiénique, respect de l'environnement. Donc la terre est le matériau écologique par excellence.

Chapitre II

**Caractérisation des matériaux
utilisés**

1. Introduction :

La brique de terre comprimée reste le matériau par excellence qui contribue à un environnement bâti sain, durable et performant en matière de confort intérieur. L'argile est le matériau de base qui est utilisé dans la fabrication des BTC [1].

Le présent chapitre regroupe les essais d'identification et les caractéristiques géotechniques des différents matériaux utilisés dans la composition des briques de terre comprimée, et leurs interprétations.

2. Localisation des matériaux utilisés :

Dans notre étude, nous avons ciblé deux matériaux différents. Le premier c'est la terre et le deuxième c'est le sable concassé.

Notre travail est focalisé sur trois régions, Timimoun, Adrar et la région de Reggane.

2.1. La région de Timimoun :**✓ Le sol de Timimoun:**

Le site est situé au Sud de la ville de Timimoun dans le côté gauche de la route menant vers la wilaya d'Adrar.

✓ Le sable concassé de Timimoun :

Le gisement est situé à 16km au Nord – Est de la commune de Charouine et à 750m au Nord de l'RN°51, en direction de Timimoun (Figure.22) [2].

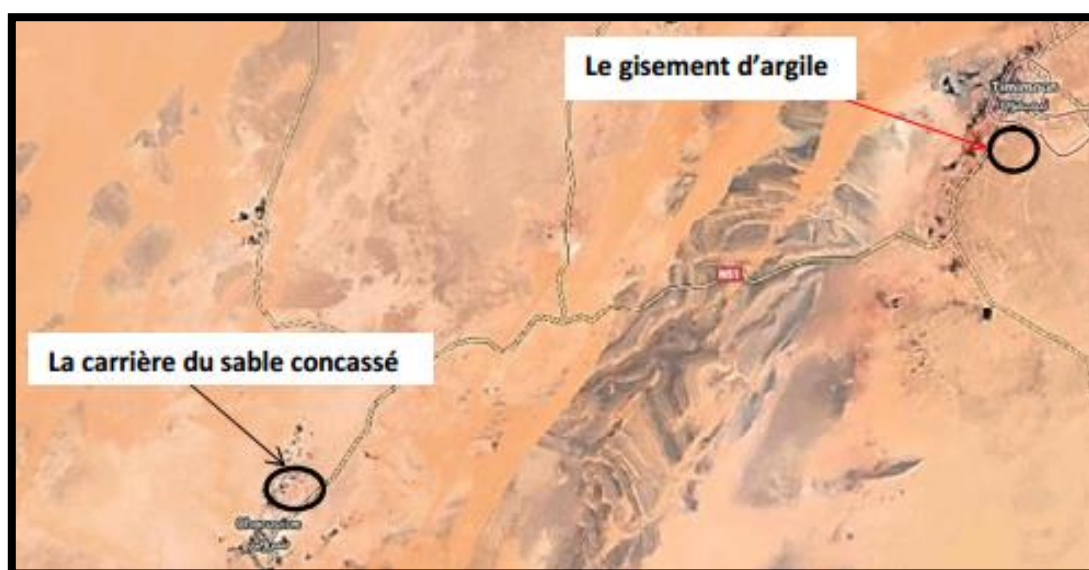


Figure.22 : Zone de prélèvement d'argile et de sable concassé (Timimoun).

2.2. La région d'Adrar :

✓ Le sol d'Adrar :

Le gisement est situé au Nord de la ville d'Adrar dans le côté gauche de la route nationale N°6 éliant Adrar à Béchar.

✓ Le sable concassé d'Adrar :

La carrière est localisée sur la partie Sud de centre de ville d'Arar, les pistes menant vers le gisement sont d'une accessibilité facile (Figure.23) [2].

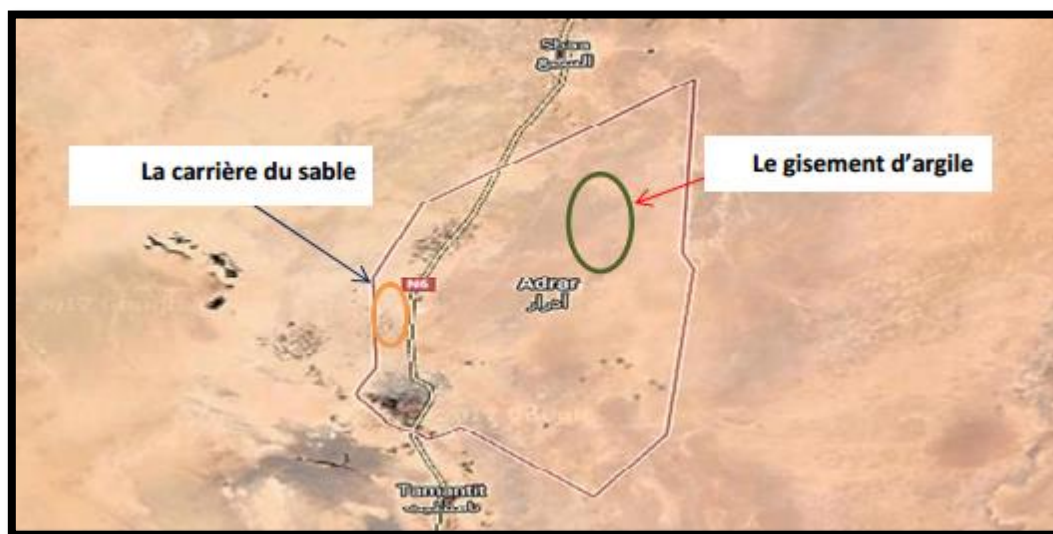


Figure.23 : Zone de prélèvement d'argile et de sable concassé (Adrar).

2.3. La région de Reggane :

✓ Le sol de Reggane :

La carrière est située au Nord - Ouest de la commune de Reggane dans le côté droit en allant vers Reggan (Figure.24) [2].

✓ Le sable concassée de Reggane :

Le gisement de sable utilisé est situé à 30km à vol d'oiseau à l'Est de la localité de Reggane, on y accède en empruntant la nationale N°52 (30km Reggan-Aoulef) et une piste carrossable de 8km vers au Sud (Figure.24) [2].



Figure.24 : Zone de prélèvement d'argile et de sable concassé (Reggane).

3. Caractéristiques physiques et chimiques des matériaux utilisés :

Nous avons effectué des prélèvements des échantillons, qui sont soumis à une chaîne des essais d'identification suivants.

3.1. Les sables concassés :

- La masse volumique (apparente, absolue) (NF-P 18 555).
- L'analyse granulométrique par tamisage (NF-P 18-560).
- Le Module de finesse (NF-P 18 304).
- L'équivalent de sable (NF-P 18 598).
- L'essai de bleu de méthylène (NF-P94 068).

a. La masse volumique (NF P 18 555) :

a.1 – masse volumique apparente :

- Elle a pour but de déterminer la masse volumique apparente ρ_{app} d'un sable sec.

$$\rho_{app} = \frac{M_p - M_v}{V}$$

M_p= masse total (1+2) ; **M_v**= masse 2 ; **V**= volume 2

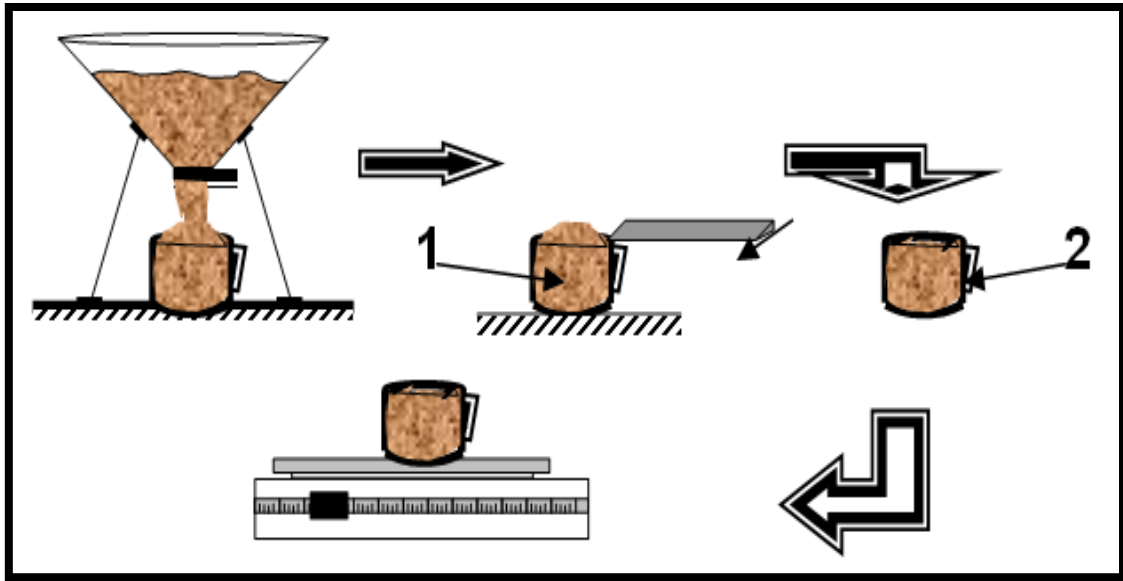


Figure.25 : Essai de la masse volumique apparente.

a.2 – masse volumique absolue :

- Détermination de masse volumique absolue ρ_{abs} d'un sable sec par la méthode de l'éprouvette graduée, cette dernière est basée sur la lecture de volume

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

1= masse **M** ; **V1**= volume initial ; **V2**= volume final

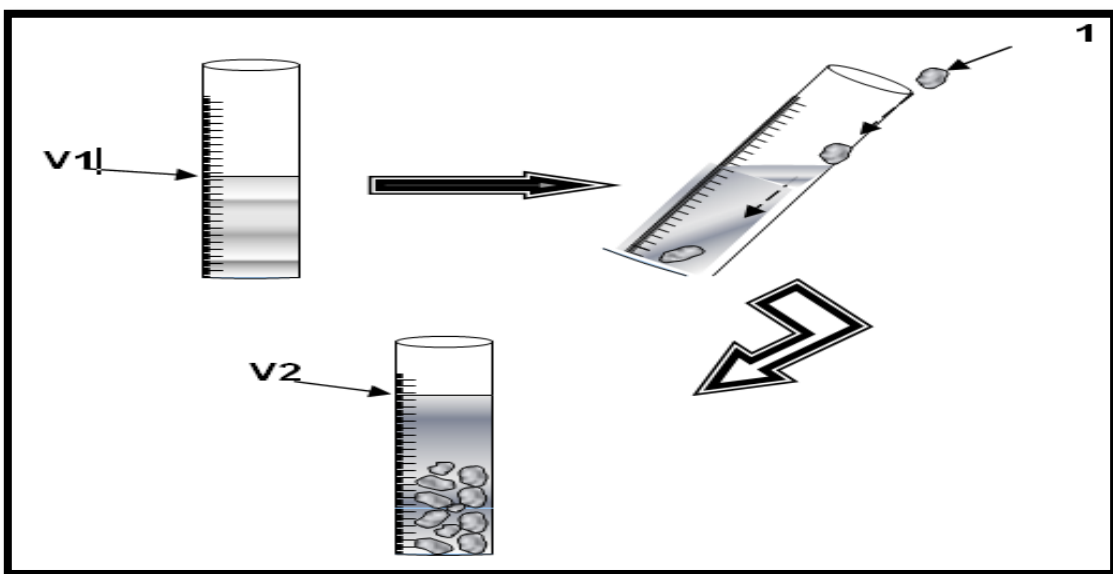


Figure.26 : Essai de la masse volumique absolue.

Tableau.7 : Résultats de la masse volumique apparente et absolue des sables utilisés.

| | ρ_{abs} (g/cm ³) | ρ_{app} (g/cm ³) |
|-----|--|--|
| SCT | 2,5 | 1,56 |
| SCA | 2,5 | 1,48 |
| SCR | 2,7 | 1,67 |

b. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 18 560) :

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



Figure.27 : Essai de l'analyse granulométrique du sable concassé.

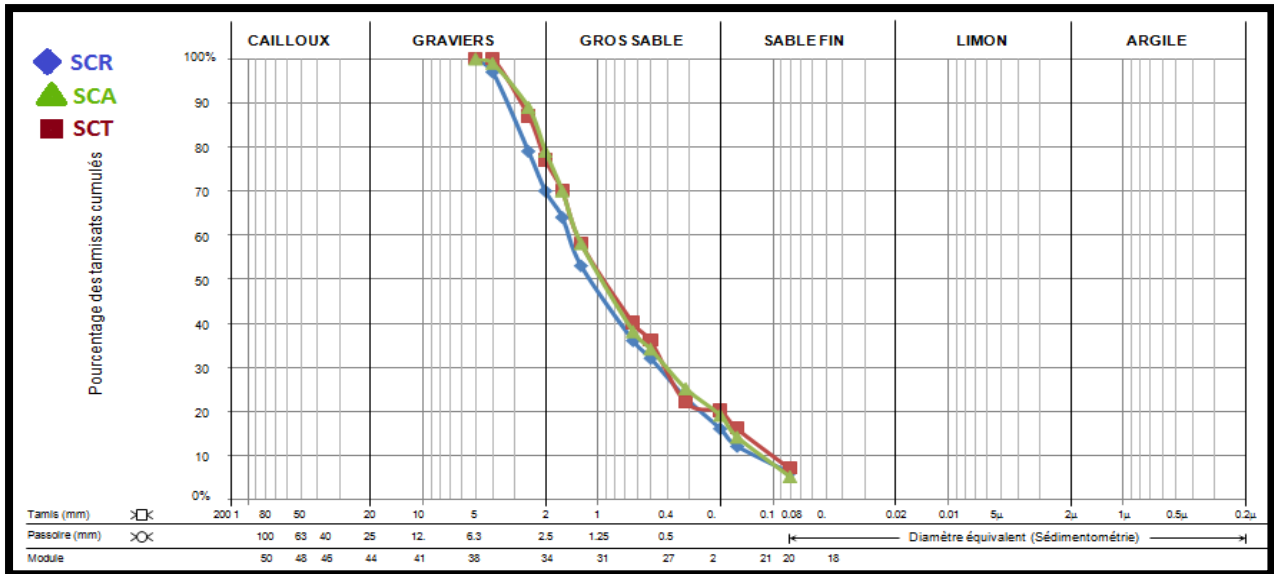


Figure.28 : Courbe granulométrique de sable concassé.

Nous pouvons déterminer un certain nombre des paramètres utiles à la connaissance de nos sables. Parmi ces paramètres on peut citer :

Le coefficient d'uniformité, noté C_u et donné par la relation :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Le coefficient de courbure noté C_c et donné par la relation :

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}}$$

Tableau.8 : Résultats de l'analyse granulométrique des sables utilisés.

| | SCT | SCA | SCR |
|-------|------|-------|--------|
| D10 | 0,10 | 0,175 | 0,16 |
| D30 | 0,40 | 0,40 | 0,5 |
| D60 | 1,3 | 1,3 | 1,5 |
| C_u | 13 | 7,42 | 9,37 |
| C_c | 1,23 | 0,70 | 1,04 |
| d/D | 0/3 | 0/3 | 0/3,15 |

Selon les valeurs de C_c et C_u obtenues la granulométrie des sables est étalée contenue.

c. Module de finesse (NFP 18-304) :

Le module de finesse est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 ... mm

$$MF = 1/100 * \sum(\text{Refus cumulés en \% des tamis}\{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 \dots\})$$

Tableau.9 : Résultats de module finesse des sables concassées.

| Les échantillons | MF |
|------------------|------|
| SCT | 2,77 |
| SCA | 2,76 |
| SCR | 2,97 |

Tableau.10 : Catégorie des Sables.

| Sable Très fin | Sable Fin | Sable Moyens | Sable Grossier |
|----------------|---------------|---------------|----------------|
| Mf de 1 à 1,5 | Mf de 1,5 à 2 | Mf de 2 à 2,5 | Mf > 2,5 |

Selon la classification ci-dessus, les sables concassés ont été classés comme des sables grossier.

d. L'équivalent de sable (NFP 18-598) :

L'équivalent de sable est consisté à séparer le sable des particules très fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage.

$$Esv(\%) = \frac{H2}{H1} 100$$

$$Esp(\%) = \frac{H'2}{H1} 100$$

H 1 : hauteur de sable avec les fins.

H 2 : hauteur de sable visuel.

H'2 : hauteur de sable avec piston.



Figure.29 : Essai de l'équivalent de sable.

Tableau.11 : Résultats d'essai de l'équivalent de sable.

| | ESP % | ESV % |
|-----|-------|-------|
| SCT | 50 | 52 |
| SCA | 34 | 40 |
| SCR | 67 | 77 |

Les résultats obtenus de ES sont insérés dans la fourchette prescrite.

e. L'essai bleu de méthylène (NF P 94-068) :

L'essai au bleu de méthylène permet de le faire dans des conditions simples et rapides, en utilisant la propriété de la molécule du bleu de méthylène de s'adsorber sur la surface des particules minérales.

L'essai est effectué en ajoutant successivement des doses d'une solution de bleu de méthylène dans une suspension aqueuse de matériau et par vérification de l'absorption de la solution colorée par un test à la tâche sur papier filtre pour déceler la présence de colorant libre.



Figure.30 : Essai de bleu de méthylène.



Figure.31 : Résultats d'essai de bleu de méthylène.

Tableau.12 : Valeurs de bleu de méthylène et de SST des sables concassés.

| Echantillons | VB | SST (m ² /g) |
|--------------|-----|-------------------------|
| SCT | 0,5 | 20,93 |
| SCA | 0,5 | 20,93 |
| SCR | 0,5 | 20,93 |

Les valeurs de VB obtenues sont acceptables pour l'utilisation de sable concassé dans notre travail.

3.2. La terre utilisée :

Pour notre étude nous avons utilisé la terre de la région de Timimoun, Adrar et Reggane. Nous avons procédé aux essais d'identification suivants :

- L'analyse granulométrique par sédimentométrie (NF-P94-057).
- Le poids spécifique des grains solides (NF P94-054).
- Les limites d'Atterberg (NF P 94-051).
- La limite de retrait WR (XP P 94 060-1).
- Teneur en carbonate de calcium CaCO_3 (NF P94-051).
- Essai au bleu de méthylène (NF-P94 068).
- L'analyse chimique de l'eau de gâchage.

a. L'analyse granulométrique par sédimentométrie (NF-P94-057) :

Cet essai consiste à déterminer la répartition en poids des grains du sol suivant leur dimension. Pour les particules de dimensions supérieures à $80 \mu\text{m}$, la séparation se fait par tamisage. Pour les fines ($< 80 \mu\text{m}$), on doit pratiquer l'essai de sédimentométrie.



Figure.32 : Essai granulométrique par sédimentométrie.

❖ **Pourcentage des éléments inférieurs à D :**

Le pourcentage est donné par la formule suivante :

$$P = \left[100 * \frac{V_s}{m} * \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} * \rho_w \right] (R_t - R_B)$$

Tel que :

V_s : Volume de la suspension 1000L.

m : Masse du sol sec utilisé (m = 20 g).

ρ_s : Masse volumique des grains solides = 2,65 g/cm³

ρ_w : Masse volumique de l'eau

R_t : Lecture de l'éprouvette A au temps t

R_B : Lecture de l'éprouvette B (Eprouvette témoin).

❖ **Calcul des diamètres des particules non décantée :**

Le diamètre des particules qui sont en suspension est donné par la relation :

$$D = F \sqrt{\frac{Ht}{t}}$$

F: est un facteur donné par l'abaque .

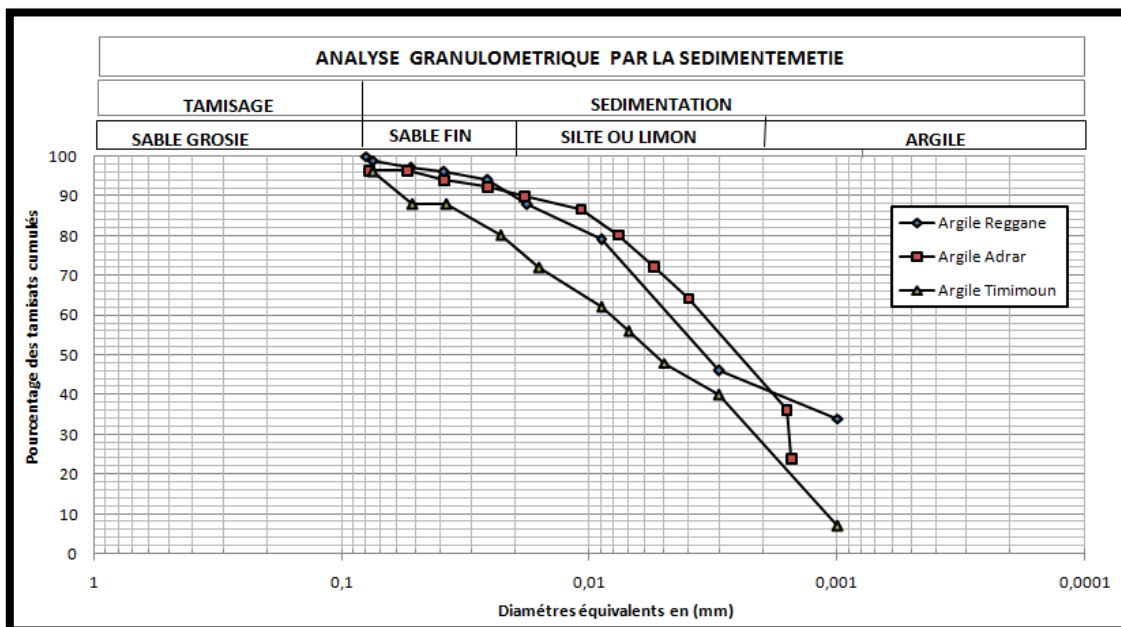


Figure.33 : Courbes granulométrique des sols étudiés.

Tableau.13 : Granularité des sols étudiés.

| | AT | AA | AR |
|----------------------|----|----|----|
| Sable (>0,02mm) | 20 | 10 | 10 |
| Limon (0,02-0,002mm) | 50 | 46 | 48 |
| Argile (<0,002mm) | 30 | 44 | 42 |

Le tableau ci-dessus représente les valeurs de l'analyse granulométrique par sédimentation. Suivant la classification Américaine (USCS), nous pouvons dire que les sols AA, AR et AT sont des sols fins avec leur pourcentage de particules de diamètre inférieurs à $80\mu m$ supérieurs 99%. avec la présence des éléments argileux variant de 30% à 44%. Donc les sols étudiés ont été classés comme un sol argile-limoneux ou bien limon-argileux.

Suivant la forme des courbes granulométriques, et suivant la norme USCS (unified soil classification system), nous pouvons conclure que tous les échantillons prélevés sont d'une distribution dimensionnelle continue ainsi que nous pouvons dire que toutes ces terres sont d'une granulométrie étalée. En fait il n'y a pas d'interruption granulométrique. Tous les diamètres de particules sont représentés.

b. Le poids spécifique des grains solides (NF P94-054) :

Le poids spécifique des particules solides du sol (γ_s) est le rapport de la masse de ces particules solides (M_s) par leur volume absolu (V_s).

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s}$$

γ_s : Poids spécifique des particules solides.

M_s : Poids du sol sec.

V_s : Volume des particules solides.

Le poids spécifique des particules solides est obtenue par pesage le volume est mesuré au pycnomètre (Figure.34).

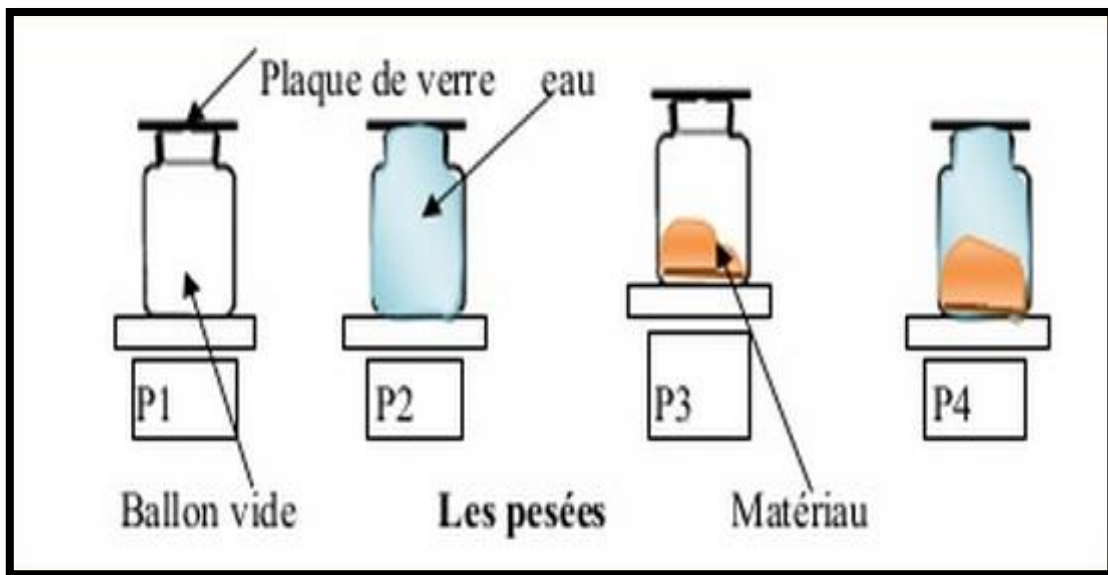


Figure.34 : Essai du poids spécifique des grains.

$$\gamma_s = \frac{\gamma_w * (P_2 - P_1)}{P_4 + P_2 - P_1 - P_3}$$

P1 : Pycnomètre vide.

P2 : Pycnomètre + l'eau désilé jusqu'a le repère

P3 : Pycnomètre + échantillon.

P4 : Pycnomètre +échantillon + l'eau

$\gamma_w = 1 \text{g/cm}^3$

Tableau.14 : Poids spécifiques des différents sols étudiés.

| Régions | AT | AA | AR |
|-------------------------------------|------|-----|------|
| $\gamma_s \text{ (g /cm}^3\text{)}$ | 2,61 | 2,6 | 2,66 |

Tableau.15 : Valeurs de Gs pour différents types de sols à 20° C.

| Argile | $\gamma_s \text{ (KN/m}^3\text{)}$ |
|-----------------|------------------------------------|
| Quartz | 26,6 |
| Calcite | 27,2 |
| Dolomite | 28,5 |
| Kaolinite | 26,1 à 26,4 |
| Illite | 26,0 à 28,6 |
| Montmorillonite | 27,5 à 27,8 |

Suivant le tableau ci-dessus les sols contiennent de mélange kaolinite, illite et quartz.

c. Les limites d'Atterberg (NF P 94-051) :

Sont des teneurs en eau pondérales, caractéristique du sol. Elles correspondent à des comportements particuliers de celui-ci sous l'action de variation de la teneur en eau.

Ces limites sont déterminées sur la fraction du sol passant à travers les tamis de 400µm.

Les limites utilisées sont :

- Limite de liquidité notée WL : limite de liquidité (teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide et un état plastique)
- Limite de plasticité WP : limite de plasticité (teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide).
- Indice de plasticité noté IP : cet indice définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et plasticité :

$$IP = WL - WP.$$

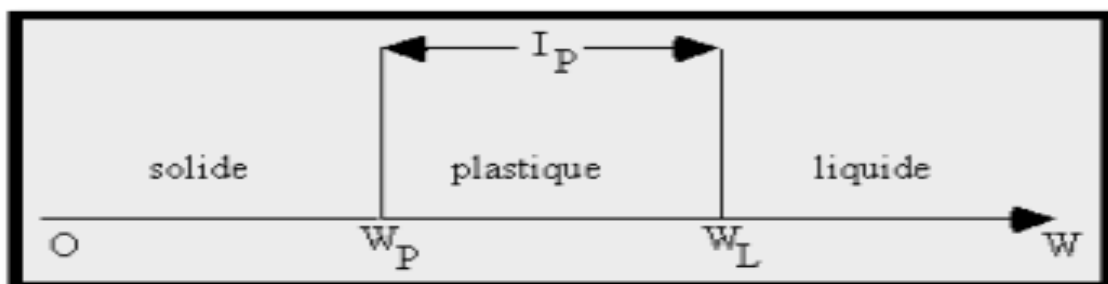


Figure.35 : Limites d'Atterberg.



Figure.36 : Détermination de WL et WP.

Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs de consistance obtenues.

Tableau.16 : Résultats des limites d’Atterberg.

| | WL | WP | IP |
|----|------|-------|-------|
| AT | 47 | 26,88 | 20,12 |
| AA | 96 | 40,93 | 55,07 |
| AR | 61,5 | 32,27 | 29,23 |

Tableau.17 : Classification des argiles selon Atterberg, 1973.

| IP | Plasticité |
|--------|------------|
| <7 | Faible |
| 7 à 17 | Moyenne |
| >17 | Elevée |

- **Classification de Casagrande :**

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le diagramme de plasticité ci-après (Figure II.16). Selon la position dans le diagramme du point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité et pour ordonnée l'indice de plasticité.

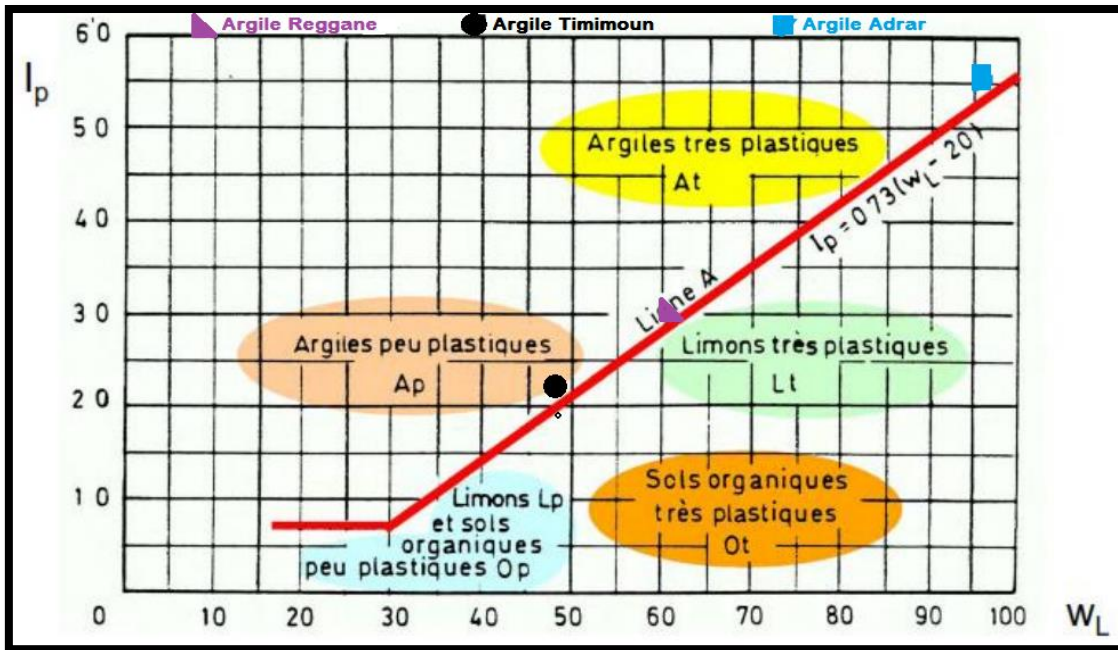


Figure.37 : Classification des sols étudiés sur le diagramme de Casagrande.

Suivant le diagramme nous pouvons dire que le sol d'Adrar est une argile très plastique, par rapport les sols de Reggane et de Timimoun sont des argiles peu plastiques.

d. La limite de retrait WR (XP P 94 060-1) :

La limite de retrait représente la teneur en eau du passage de l'état solide avec retrait à l'état solide sans retrait.

La limite de retrait (WR) est une valeur obtenue à partir d'un échantillon dont la teneur en eau initiale est proche de celle de la limite de liquidité.

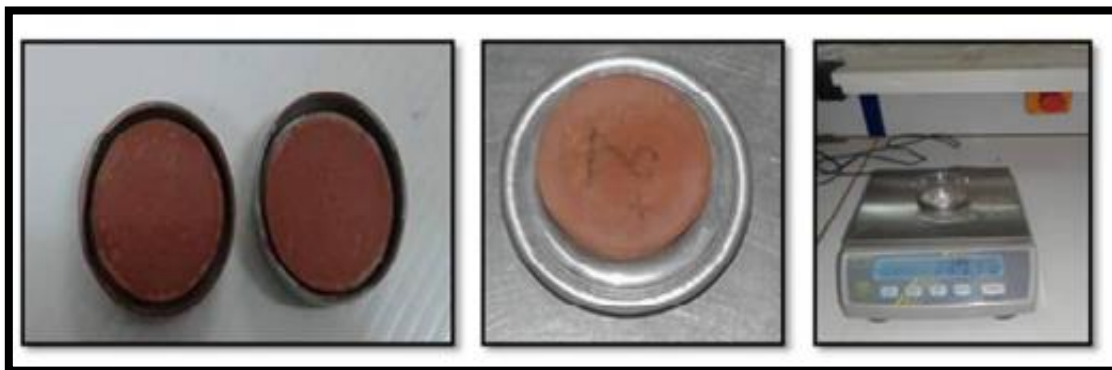


Figure.38 : Mode d'opérateur de limite de retrait.

Tableau.18 : Résultats de limite de retrait.

| Région | AT | AA | AR |
|--------|-------|-------|-------|
| WR(%) | 27,27 | 23,55 | 24,09 |

On définit I_R comme étant l'indice de retrait on a : $I_R = W_L - W_R$

Tableau.19 : Valeurs de l'indice de retrait des sols étudiés.

| Région | AT | AA | AR |
|--------|-------|-------|-------|
| IR | 19,73 | 72,45 | 37,41 |

e. Teneur en carbonate de calcium CaCO_3 (NF P94-051) :

La teneur en carbonate de calcium CaCO_3 d'un sol est déterminée par attaque à l'acide chlorhydrique d'une certaine quantité de sol sec. La mesure de la quantité de gaz carbonique dégagé permet de calculer la masse de carbonate de calcium dissoute et donc la teneur en carbonates de calcium du sol CaCO_3 , exprimée en pourcentage de la masse de la phase solide du sol.

Les sols fins contenant du carbonate de calcium peuvent être désignés comme indiqué dans (tableau.20) en complément de leur classification géotechnique.

Tableau.20 : Teneur en CaCO_3 de quelques sols.

| Pourcentage de CaCO_3 | Dénomination |
|--------------------------------|------------------|
| 0 à 10 | Argile ou limon |
| 10 à 30 | Argile Calcaire |
| 30 à 70 | Marne |
| 70 à 90 | Calcaire marneux |
| 90 à 100 | Calcaire |

La teneur en carbonate de calcium CaCO_3 est représentée par la formule suivante :

$$\text{CaCO}_3 = \frac{\text{Volume de gaz carbonique (CO}_2\text{) dégagé par 0,5g d'échantillon}}{\text{Volume de gaz carbonique (CO}_2\text{) dégagé par 0,5g deCaCO}_3}$$

La réaction qui se produit est de forme :

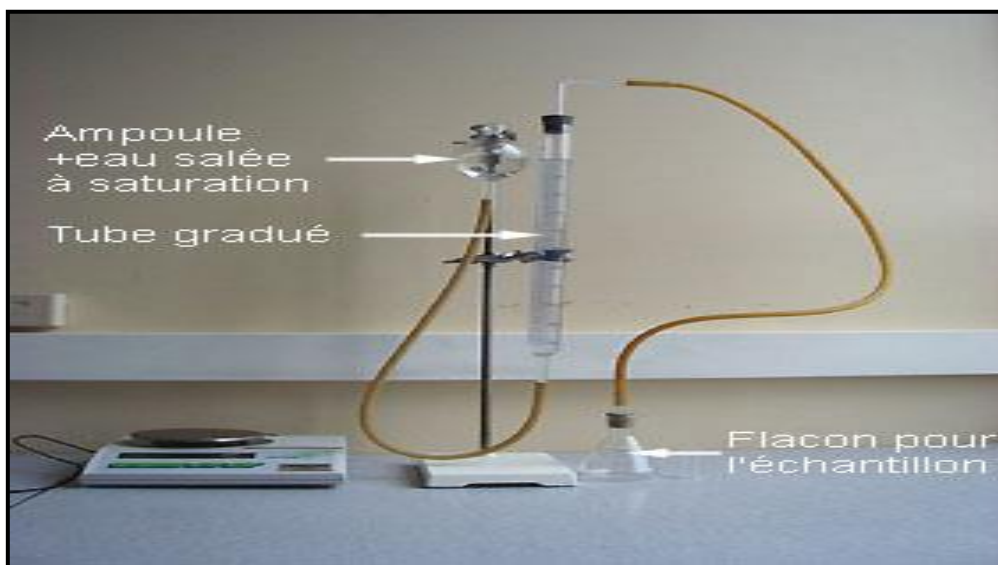
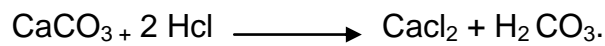


Figure.39 : Appareille de Calcimètre Dietrich – Fruhling.

Tableau.21 : Valeurs de la teneur en carbonate de calcium.

| Région | AT | AA | AR |
|-----------------------|-----|-----|-----|
| CaCO ₃ (%) | 2,7 | 3,6 | 4,5 |

Les valeurs de CaCO₃ des terres étudiées varient de 2,7 à 4,5, donc les résultats obtenus sont insérés dans fourchette d'un sol argileux ou limoneux.

f. Essai au bleu de méthylène (NF-P94 068) :

Le bleu de méthylène a la propriété d'être absorbé préférentiellement par les argiles et les matières organiques. Une masse connue de fines est dispersée dans l'eau distillée à laquelle on ajoute des doses croissantes de bleu de méthylène.

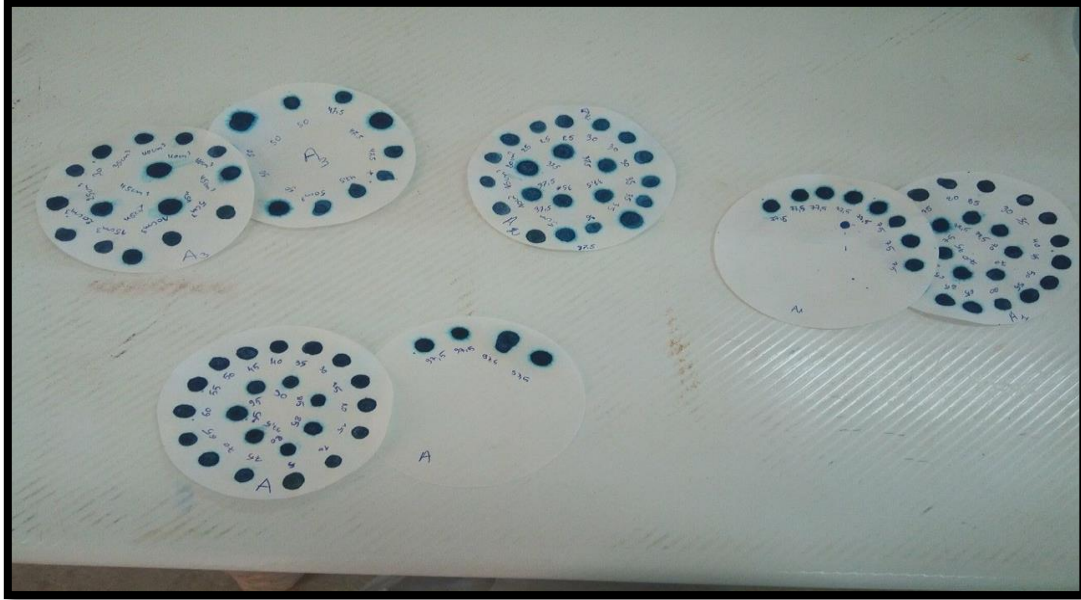


Figure.40 : Résultat de l'essai de bleu de méthylène.

Calcul de la valeur de bleu de méthylène : $VB=10 \cdot V/M$

Avec :

VB : valeur de bleu de méthylène.

M : est la masse de l'échantillon, en grammes.

V : est le volume total de solution de colorant injectée, en centimètres cube.

La surface spécifique totale SST d'argile :

$$SST \text{ (m}^2\text{/g)} = 20,93 \cdot VB.$$

Les valeurs de VB et SST obtenues sont regroupées dans le tableau suivant (Tableau.22).

Tableau.22 : Résultats de bleu de méthylène VB et de SST des sols étudiés.

| Echantillon | VB | SST (m ² /g) |
|-------------|------|-------------------------|
| AT | 3,75 | 78,49 |
| AA | 9,75 | 204,07 |
| AR | 5 | 104 ,65 |

Tableau.23 : Classification des sols d'après Philipponat.

| La valeur de bleu | Type de sol |
|-------------------|------------------------|
| VB < 0,2 | Sols sableux |
| 0,2 < VB < 2,5 | Sols limoneux |
| 2,5 < VB < 6 | Sols limoneux argileux |
| 6 < VB < 8 | Sols argileux |
| VB > 8 | Sols très argileux |

Selon le tableau ci-dessus, nous pouvons dire que le sol de Reggane et de Timimoun sont des sols limoneux argileux et le sol d'Adrar est un sol très argileux.

g. l'analyse chimique de l'eau de gâchage :

L'eau utilisée est celle du robinet du laboratoire de génie civil de l'université d'Adrar 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 (ANRH) d'Adrar..

Tableau.24 : Composition chimique de l'eau de gâchage utilisé.

| Composants | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | Na ⁺⁺ | Ka ⁺⁺ | Cl ⁻ | So4 ⁻⁻ |
|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| Valeurs (%) | 200,00 | 150,00 | 200,00 | 12,00 | 500,00 | 400 |

Tableau.25 : Paramètres physico-mécaniques et chimiques des matériaux étudiés.

| Paramètres | Symboles | Unités | Valeurs | | |
|----------------------------|--------------|-----------------------|---------|--------|--------|
| Sols | | | AT | AA | AR |
| Densité des grains solides | γ_s | g/cm^3 | 2,61 | 2,60 | 2,66 |
| Limite de liquidité | W_L | % | 45,5 | 95,6 | 63,10 |
| Limite de plasticité | W_P | % | 32,49 | 40,93 | 45,86 |
| Limite de retrait | W_R | % | 27,27 | 23,55 | 24,09 |
| Indice de plasticité | I_P | - | 13,01 | 54,67 | 17,24 |
| Indice de retrait | I_R | - | 18,23 | 72,05 | 39,01 |
| Surface spécifique | SST | m^2/g | 78,49 | 204,07 | 104,65 |
| Valeur de bleu | VB | - | 3,75 | 9,75 | 5 |
| CaCO_3 | - | % | 2.7 | 3.6 | 4.5 |
| Sables concassés | | | SCT | SCA | SCR |
| Equivalent de sable | ESP | % | 50 | 34 | 67 |
| Masse volumique absolue | ρ_{abs} | g/cm^3 | 2,5 | 2,5 | 2,7 |
| Masse volumique apparente | ρ_{app} | g/cm^3 | 1,56 | 1,48 | 1,67 |
| Module de Finesse | MF | - | 2,77 | 2,76 | 2,97 |
| Valeur de bleu | VB | - | 0,5 | 0,5 | 0,5 |

4. Conclusion :

A la lumière des résultats obtenus, Nous avons tirés les conclusions suivantes :

- Les essais effectués sur les sols montrent que ces sols sont constitués par d'éléments quartz, illite et kaolinite.
- La plasticité des sols étudiés est très élevée.
- La valeur de bleu de méthylène mesurée montre que nos sols sont de nature argileuse et limoneuse.
- Les essais effectués sur les sables concassés montrent que ces sables sont serrés et d'une répartition granulaire contenues
- ainsi que l'équivalent de sable variant de 34 à 77 donc les valeurs sont insérées dans les fourchettes prescrites.
- Le module de finesse variant de 2,76 à 2,97 ; donc : sable grossier
- La masse volumique absolue moyenne est de l'ordre de $2,57\text{g/cm}^3$
- La masse volumique apparente moyenne est égale $1,57\text{ g/cm}^3$.

Chapitre III

Etude expérimentale

1. Introduction :

L'étape expérimentale de notre travail consiste à une confection d'une brique de terre comprimée stabilisée avec la chaux éteinte, puis différents essais ont été effectués sur ces briques.

L'objectif de cette étude est de renforcer les caractéristiques thermiques, physiques et mécaniques des BTC à travers une stabilisation à la chaux éteinte. Pour des conditions pratiques et économiques, nous nous sommes fixés dans le cadre de notre étude à des taux de chaux éteinte allant de 2 % à 8 %.

2. Méthodologie d'étude :

Dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, nous avons focalisé notre étude sur le sol argileux (Argile) comme matériau de base et d'utilise le sable concassé comme un ajout cela pour adapter la granulométrie d'une part, puis on a ajouté la chaux éteinte comme stabilisant chimique pour améliorer certaine caractéristiques d'autre part (figure.41).

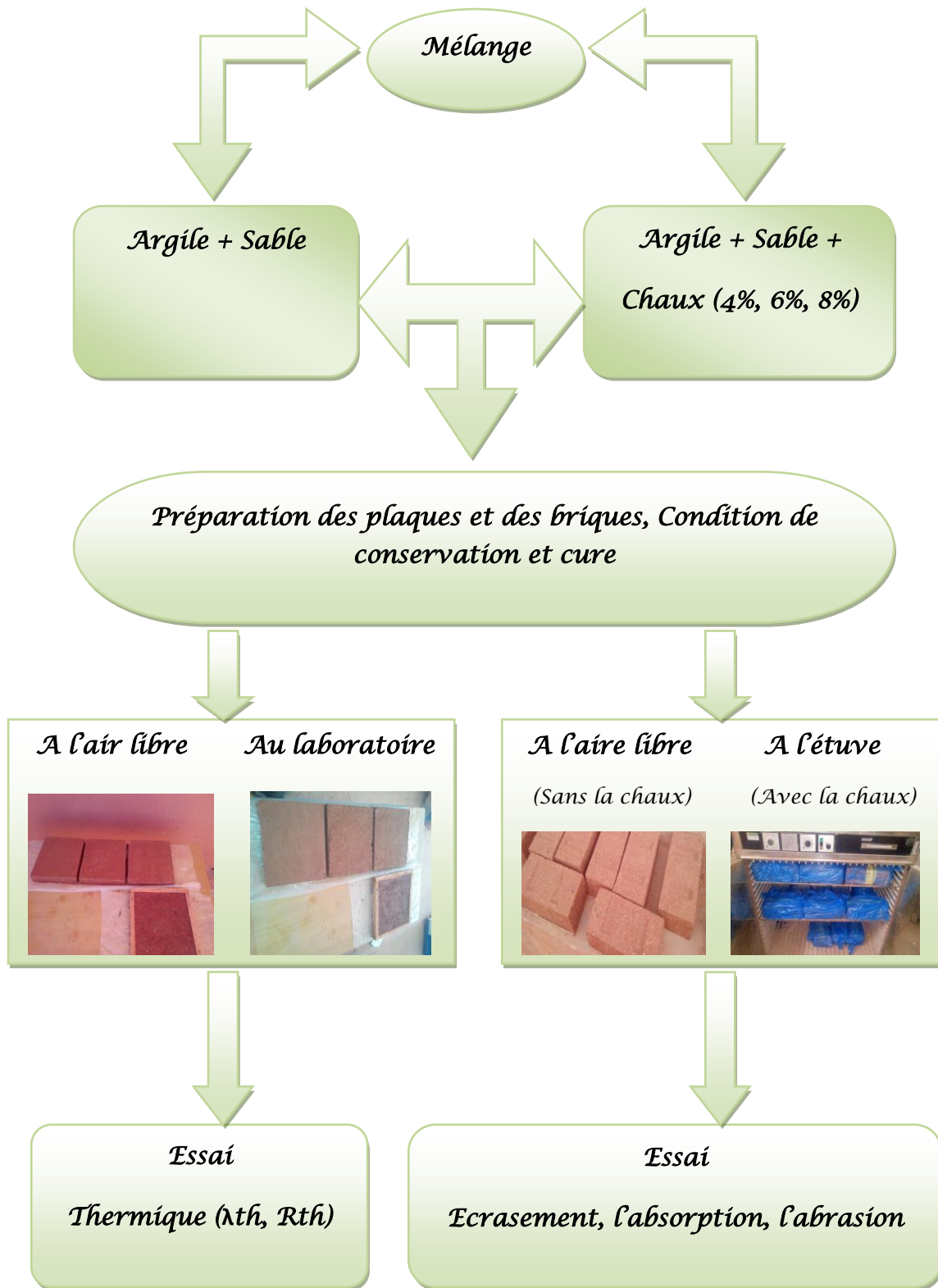


Figure.41 : Méthodologie de l'étude

3. Fabrication des briques :

Nous avons présenté les trois étapes principales de fabrication de BTC.

➤ Préparation de la terre :

La préparation est presque indispensable pour les blocs stabilisés afin de garantir une bonne répartition du stabilisant qui ne peut agir efficacement si la terre est en mottes. Même pour des blocs non stabilisé, les mottes ou nodules de terre empêcheront une compression homogène et seront des points faibles à l'intérieur des blocs. La préparation va aussi permettre de corriger les éventuels défauts de granularité.

➤ Le malaxage :

Le malaxage est la préparation sont des opérations importantes dans la fabrication de BTC. La répartition de stabilisant doit être homogène pour que son effet soit égal pour tout le mélange. Cette homogénéité est conditionnée par le malaxage. Plus il sera homogène et plus le taux de stabilisation pourra être réduit soit une baisse de coût pour une persistance de qualité. Le mélange se fait d'abord à sec s'il faut ajouter à la terre des matériaux secs (chaux, sable concassé).

➤ Pressage et Moulage :

Le pressage est l'action qui consiste à resserrer les grains. Cette densification s'obtient par la mise en œuvre d'efforts de resserrement, statique ou dynamique. Les paramètres qui définissent le contact inter granulaire sont la texture et la structure de la terre. Le contact de la texture dépend du choix granulaire, mais le contact de la structure dépend de la densité de la terre.

L'amélioration de la densité c'est-à-dire la diminution de la porosité de la terre est obtenue en comprimant la terre avec une presse.

On a utilisé la presse manuelle de CAPTERRE de type AURAM 3000 (figure.42).



Figure.42 : L'appareil AURAM 3000 (CAPTERRE)

➤ **Condition de la cure :**

Les conditions de conservation des briques dans le temps jouent un rôle très important dans l'évolution de leur résistance. Des soins apportés dans la fabrication et la conservation peuvent éviter des baisses et des dispersions importantes des résistances. Pour les blocs stabilisés à la chaux éteinte, la présence d'eau à l'intérieur des blocs est indispensable pour que le stabilisant atteigne sa résistance maximale, une température élevée va également contribuer. Les blocs doivent non seulement être abrités du soleil et du vent, mais aussi être maintenus en ambiance humide et chaude : risque de dessèchement trop rapide en surface pouvant provoquer la formation de fissures de retrait.

Pour notre cas, les briques stabilisées sont stockées à l'étuve, humidifiées par recouverte d'un film de plastique qui maintient une élévation bénéfique et donnant une humidité relative proche à 100%.

La durée de cure est de 28 jours pour les BTCS (Figure.44). Après cette période les briques sont laissées à l'air libre. Les essais d'écrasement en compression se font dans l'intervalle de 7 à 28 jours d'âge (MTC, MAC et MRC).

Par ailleurs, les briques non stabilisées sont stockés à l'abri (MT, MA et MR). Ainsi que la durée de cure est en fonction de temps de séchage des briques (jusqu'à une masse constante) (figure.43).



Figure.43 : Briques à labri (MT, MA et MR).



Figure.44 : Briques à l'étuve (MTC, MAC et MRC).

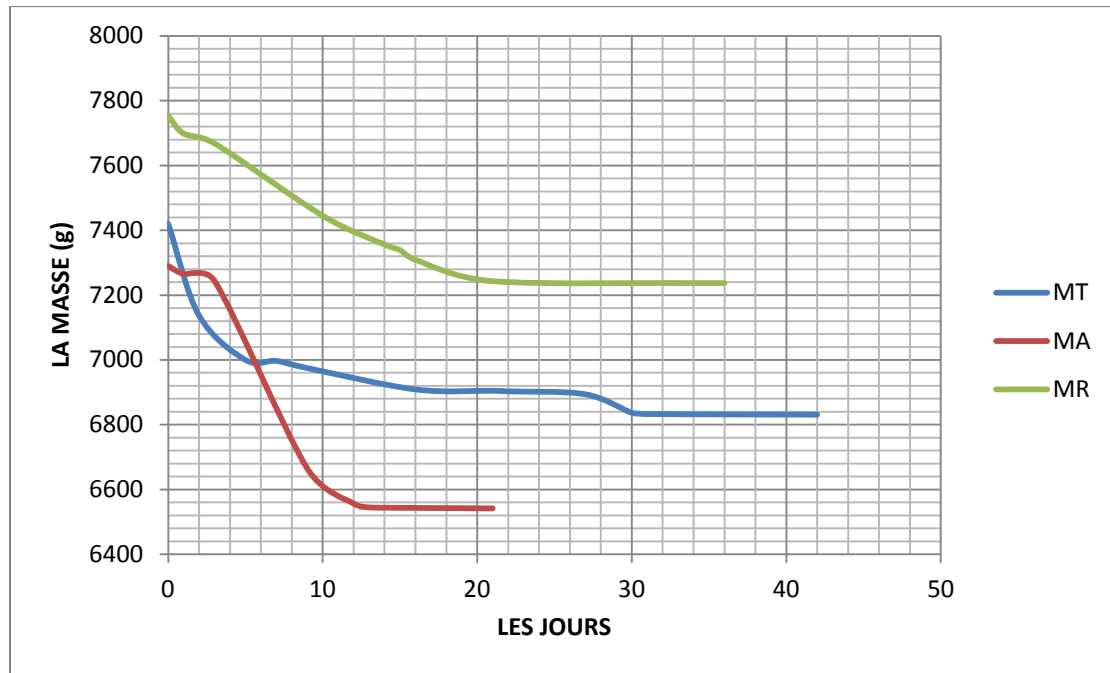


Figure.45 : Variation de la masse en fonction du temps de séchage (BTC).

La figure ci-dessus représente la durée de cure, cette durée en allant jusqu'à 40 jours selon la composition et la nature de l'argile utilisée.

4. Les essais thermo physico-mécaniques :

Nous avons effectué les essais suivants :

✓ Essais mécaniques :

- L'essai de compression
- L'essai d'Absorption
- L'essai d'Abrasion

✓ Essais thermiques :

- Conductivité thermiques ;
- Résistances thermiques ;

4.1. Caractéristiques physico-mécaniques :

a. Résistance à la compression simple (NF XP- P 13 901) :

❖ Préparation de l'échantillon :

Découper transversalement par sciage chacun des blocs en deux parties égales ou casser les blocs en deux de la manière suivante : Poser le bloc sur un lit

de sable fin, tracer une entaille sur les quatre faces du bloc indiquant l'endroit de la cassure.

Poser un couteau en acier sur l'une des entailles et donner un coup de massette sur le couteau pour obtenir les deux demi-blocs. Puis en superposer les deux moitiés entre eux par une couche de mortier de ciment ou mortier terre de 10 mm d'épaisseur maximale. Le mortier est constitué par un mélange de sable et de ciment a raison de 1 volume de ciment pour 5 volume de sable, de manière à ce que l'essai puisse se faire après 48 h de cure (Figure.47 et figure.48).

L'expression de la résistance à la compression exprime par la formule :

$$R(\text{MPa})=F/S_b \times 10$$

Avec :

F : la charge de la rupture en deca newton.

S_b : la section brute de la brique.

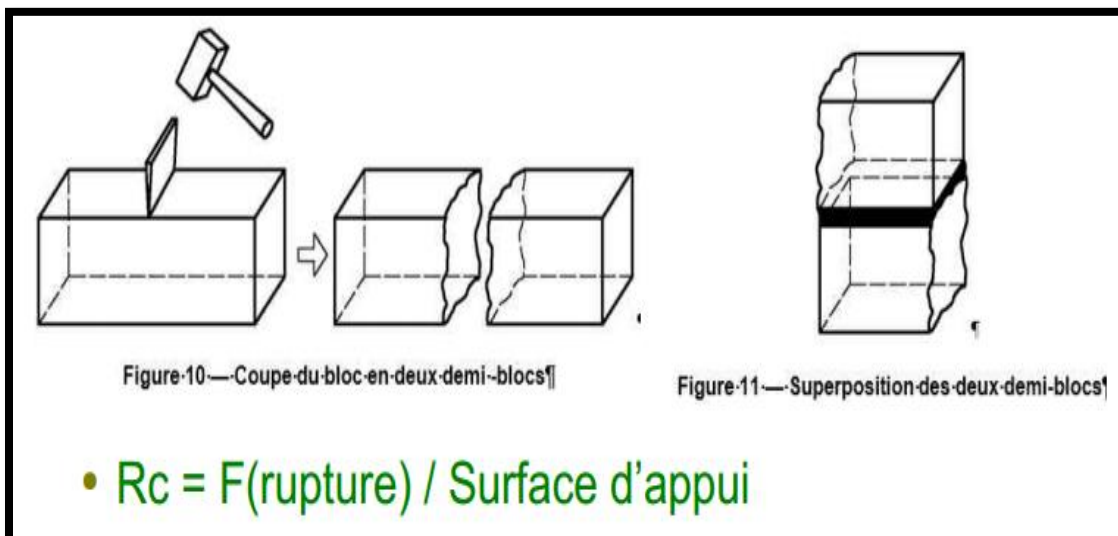


Figure.46 : Méthode de préparation de brique [13].



Figure.47 : Les étapes de préparation.



Figure.48 : Essai d'écrasement.

Les figures Figure.49, Figure.50 et Figure.51 représentent l'influence de l'ajout de chaux éteinte sur la résistance mécanique des briques, ainsi que l'âge de conservation.

❖ Résultats :

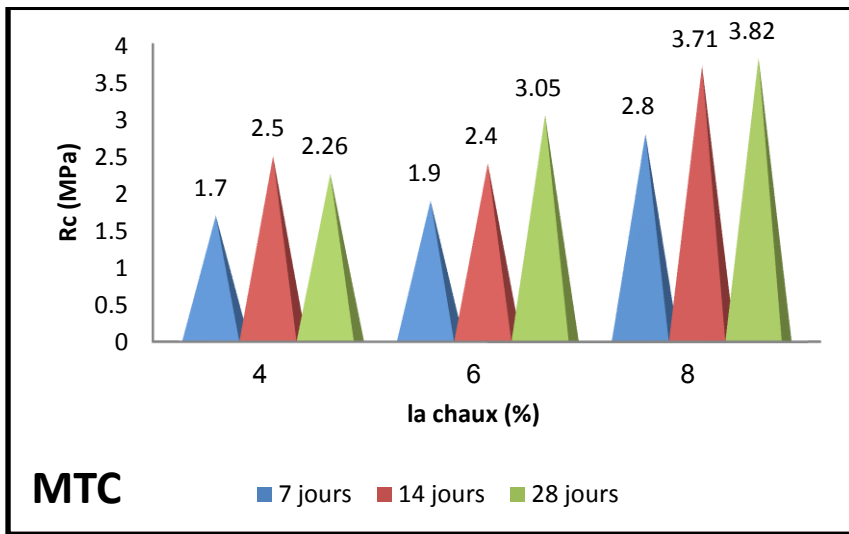


Figure.49 : Variation de la résistance à la compression simple en fonction de l'âge.

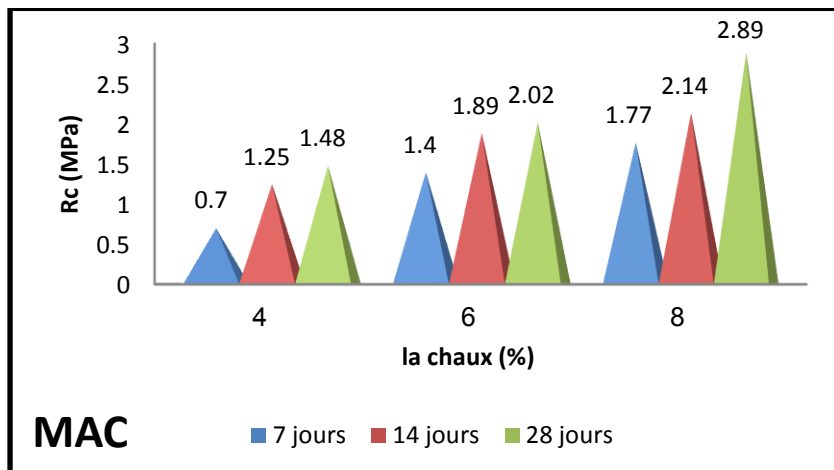


Figure.50 : Variation de la résistance à la compression simple en fonction de l'âge.

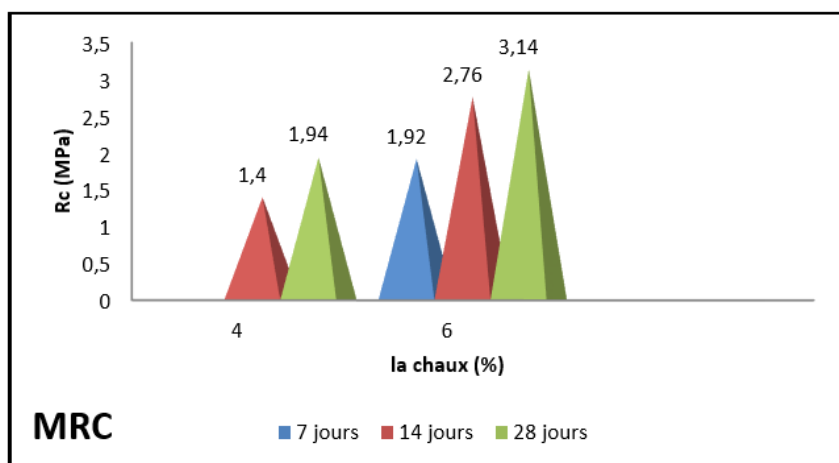


Figure.51 : Variation de la résistance à la compression simple en fonction de l'âge.

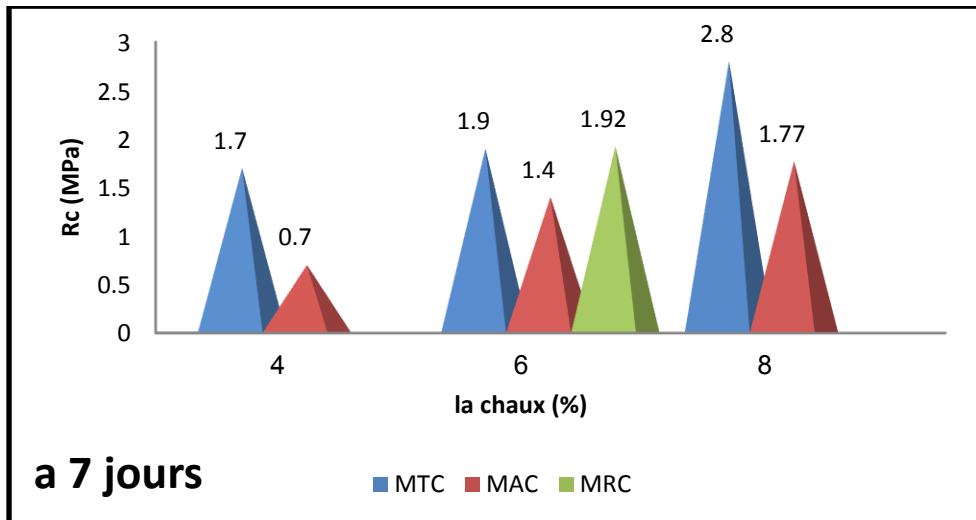


Figure.52 : Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage de la chaux à 7j.

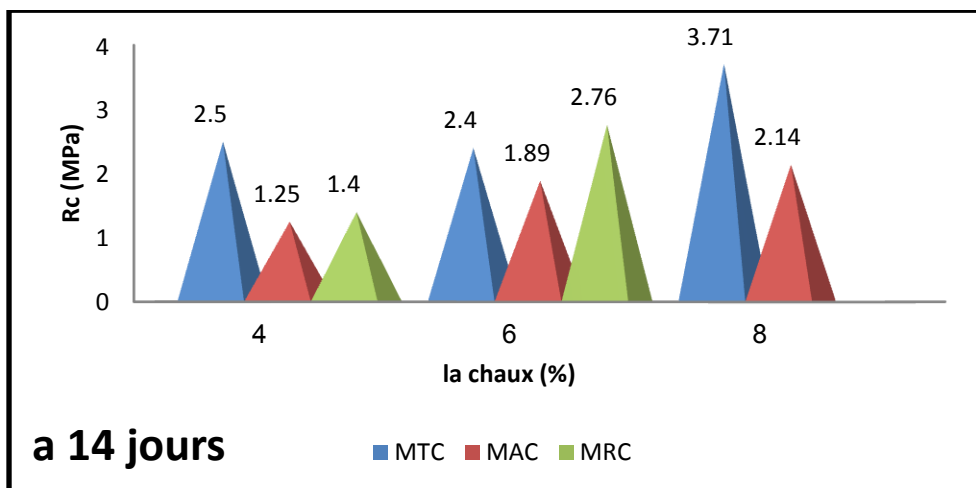


Figure.53 : Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage de la chaux à 14j.

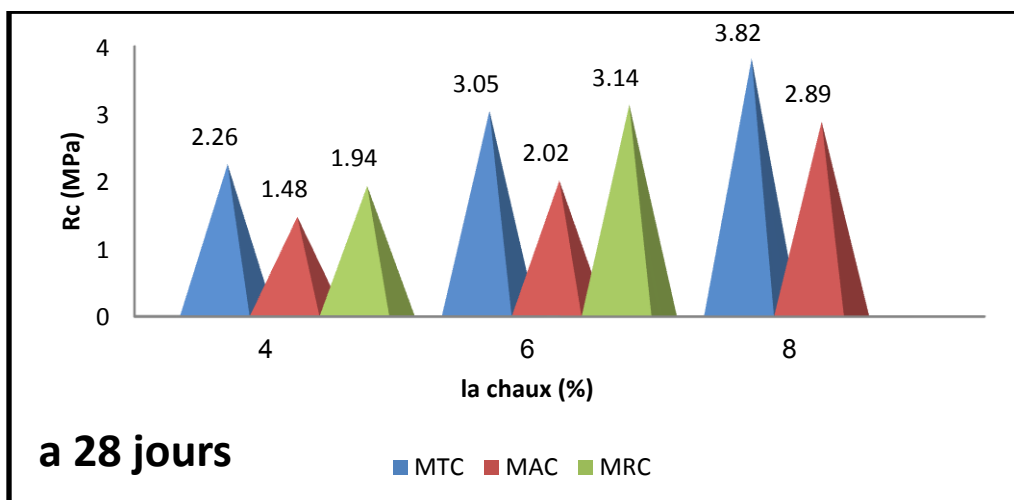


Figure.54 : Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage de la chaux à 28j

❖ Analyse et commentaire :

Les figures 49, 50 et 51 présentent l'influence d'ajout de la chaux éteinte sur la résistance des briques de trois régions Adrar, Timimoun et Reggane. Les résultats obtenus sont montrés que le temps de conservation (l'âge) fait une amélioration positive sur la résistance mécanique.

La RC des briques stabilisées de la région de Timimoun est variée entre 1,7MPa et 3,82MPa selon l'âge et le taux de la chaux.

Cependant les valeurs de la RC des briques stabilisées d'Adrar sont insérées dans la fourchette de 0,7 à 2,89MPa.

Par ailleurs la valeur maximale de la RC des briques de Reggane est obtenue Avec un dosage de 8% de chaux éteinte.

D'après les résultats des figures 52, 53 et 54 nous pouvons observer que l'augmentation de la résistance à la compression est fonction de la variation de la teneur en chaux.

Donc on peut dire que l'augmentation des pourcentages de la chaux éteinte fait une amélioration de la résistance à la compression simple.

Cependant les valeurs de la résistance obtenues des briques non stabilisées de trois régions sont variées de 1,4 à 1,08 MPa.

b. Essai d'absorption (NF XP- P 13 901) :**➤ Préparation de l'échantillon**

Après dessécher la brique jusqu'à une masse constante, en laisser stabiliser au laboratoire durant 6 heures, puis en peser la brique soit : P_0 (en grammes).

Immerger la face lisse de parement de façon qu'elle soit 5 mm au-dessous de niveau de l'eau. Réaliser cette immersion en posant la brique sur des supports réglables dans le fond de bac de façon que l'eau circule sur l'ensemble de la face immergée, après 10 min retirer la brique et essuyer avec une ligne humide ou peau de chamois, le peser soit : P_1 (en grammes) Figure.55.

L'expression du coefficient d'absorption C_b d'eau de la brique est Conventionnellement exprimé par :

$$C_b = 100 \times (P_1 - P_0) / \sqrt{10 \times S}$$

Avec :

P_1 et P_0 : la masse de la brique après et avant.

S : la surface de la face immergée.

t : la durée d'immersion.

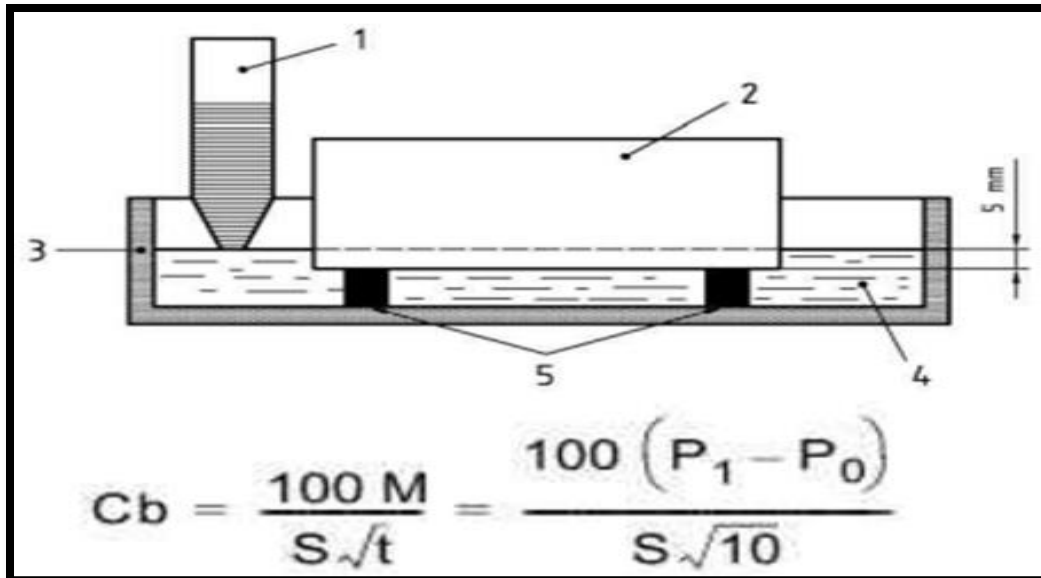


Figure.55 : Schémas de l'essai d'absorption [13].



Figure.56 : Essai d'absorption.

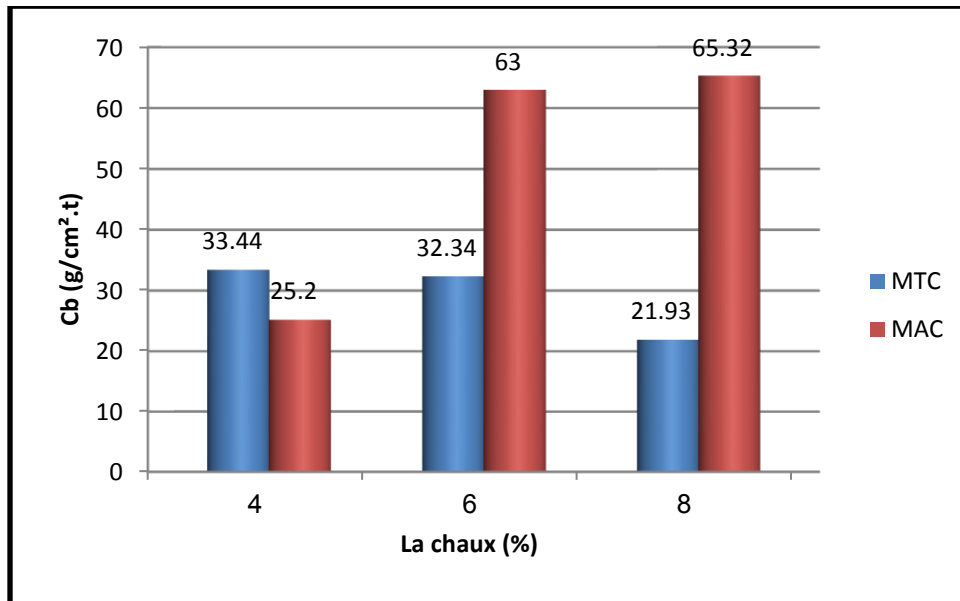


Figure.57 : Changement du coefficient d'absorption en fonction de la teneur en chaux à 28 jours

❖ **Commentaire :**

A court terme, la résistance à l'absorption est faible, cela peut être aux erreurs probables pendant la réalisation d'essai, vue clairement dans les résultats obtenus des briques d'Adrar MAC, et en plus le nombre des essais insuffisants.

c. Essai d'abrasion (NF XP- P 13 901) :

➤ **Préparation de l'échantillon :**

Après la conservation jusqu'à une masse constante, en laisser stabiliser durant 24 heures au moins, peser la brique soit : m_0 (en grammes).

Poser la brique sur un plan horizontal pour le brossage, la brosse métallique sera posé sur la brique, puis en brosser la face de la brique a raison d'un aller-retour par seconde pendant une minute (soit 60 aller-retour) sans appliquer de force verticale sur la brosse au cours de la manipulation.

A la fin du brossage la brique est nettoyer les éléments qui sont détacher puis un nouveau peser soit : m_1 .

L'expression du coefficient d'abrasion Ca est conventionnellement exprime par :

$$Ca \text{ (cm}^2 / \text{g)} = S / (m_0 - m_1)$$

Avec :

M_0 et m_1 : la masse de la brique avant et apres l'essai.

$S=L \times l$ (en centimètres).

L : longueur de la face brossée de la brique.

l : largeur de la brosse (en principe 2,5 cm).

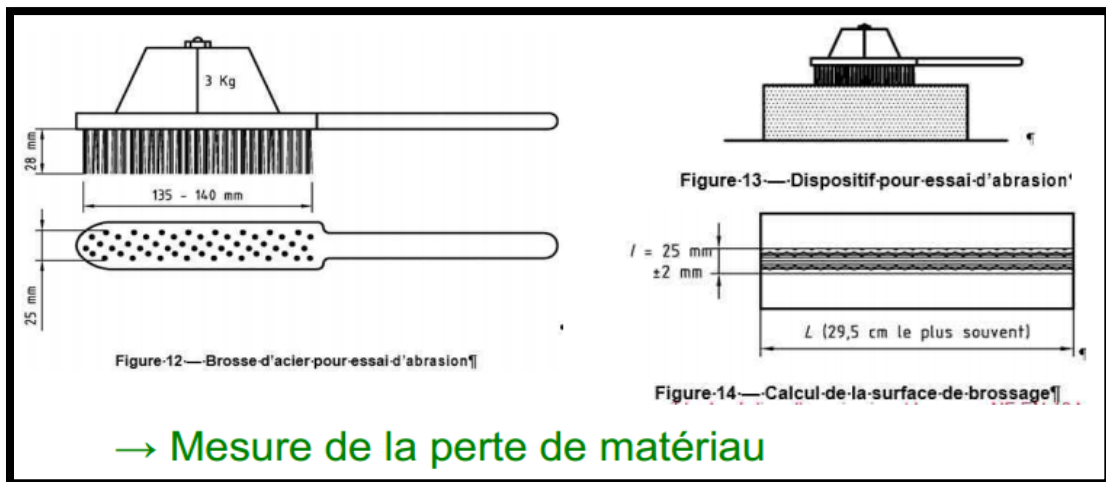


Figure.58 : Essai d'abrasion [13].



Figure.59 : Dispositif d'essai d'absorption.

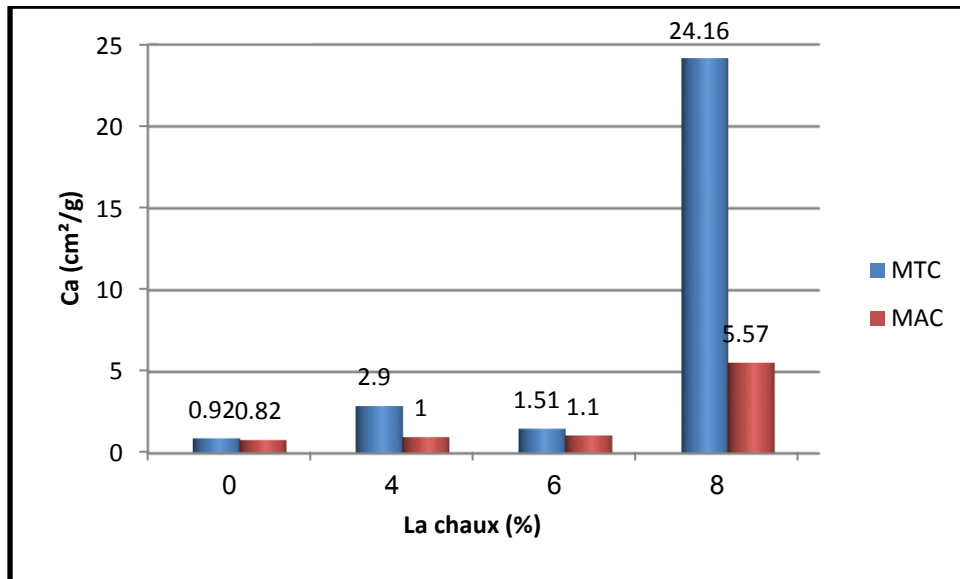


Figure.60 : Changement du coefficient d'abrasion en fonction de la teneur en chaux.

❖ **Commentaire :**

Suite aux résultats obtenus la résistance à l'abrasion des briques est acceptable.

La résistance à l'abrasion croit de façon exponentielle 0,92 à 24,16 (BTCS Timimoun) même les BTCS d'Adrar.

4.2. Partie thermiques :

a. Préparations des plaques :

Nous avons servi d'un moule (30X30X4) cm, on a utilisé les mêmes mélanges qui ont été exploités pour la fabrication des BTCS, sauf le taux de la chaux est 2%,4% et 6%.

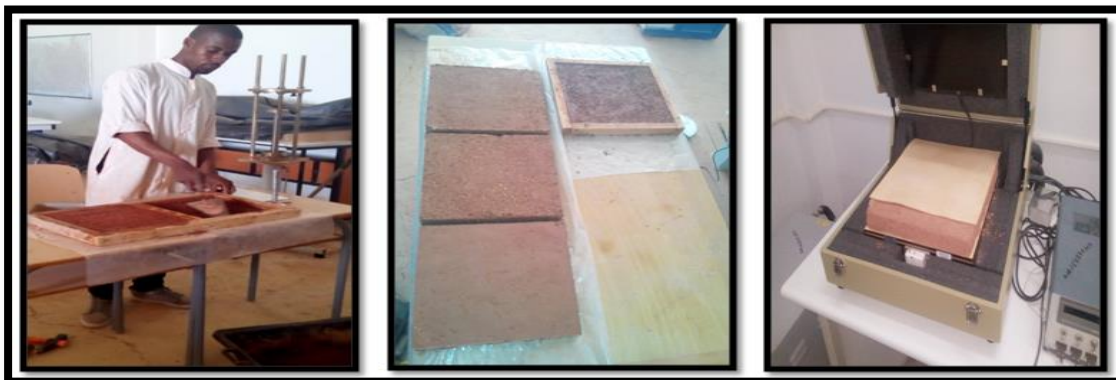


Figure.61 : préparation des plaques.

b. La méthode de plaque chaude et plaque froide (ISO 8302) :

Dans cette méthode on a utilisé l'appareille de mesure la conductivité thermique des matériaux solides (Apparatus.P.A. Hillton Ltd England). **Version H112N**

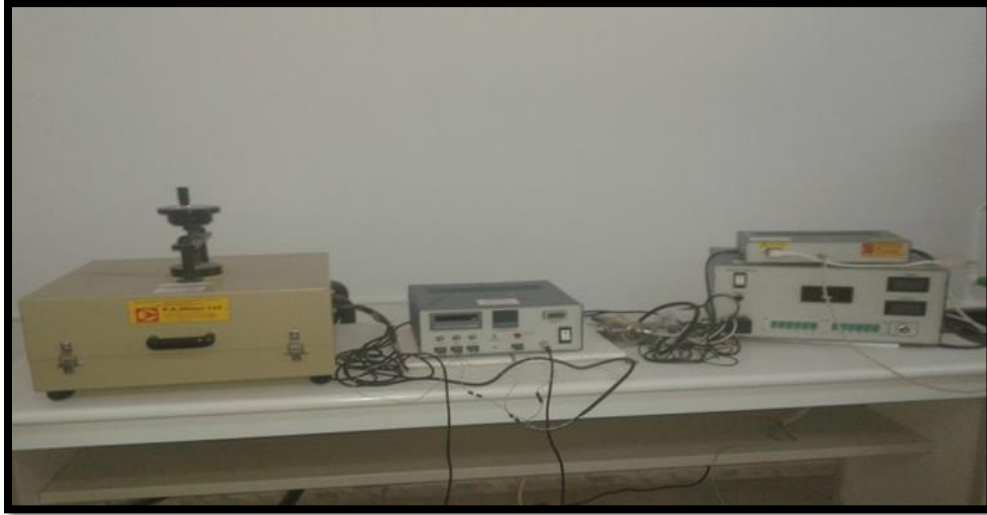


Figure.62 : L'appareille de mesure la conductivité thermique H112N.

➤ **Description de l'appareille H112N :**

Un haut accessoire de banc conçu pour permettre aux élèves d'étudier facilement les conductivités thermiques relatives des matériaux de construction typiques. Le H112N utilise une plaque plane chauffage électrique PID contrôlée et refroidie à l'eau plaque plane avec un débitmètre de chaleur intégré et très sensible.

Les 30 cm x 30 cm échantillon sous test sont prise en sandwich entre les plaques chauffées et refroidies. L'ensemble est contenu dans une enceinte thermiquement isolée pour réduire au minimum les pertes de chaleur. Le débitmètre de chaleur donne une sortie à un indicateur numérique de la commande spéciale et la console d'instrumentation.

Thermocouples spéciaux sont agencés de manière à mesurer la température moyenne de chaque côté de l'éprouvette, ce qui permet le gradient de température à travers l'échantillon et par conséquent la conductivité thermique doit être déterminée.

Dans cette étude on utilise l'appareille de mesure de la conductivité thermique des matériaux solides (Apparatus.P.A. Hillton Ltd England). Version H112N, dans laboratoire de Génie civil d'université d'Adrar.

Le dispositif se compose d'un essai de chambre dimensions de l'échantillon (30 cm X 30 cm) Hauteur et variable en fonction de l'échantillon ne pas dépasser (7,5 cm), Représenter plaque inférieure froide de la plaque et la capacité thermique comprise entre l'élément chauffant 20 W / min à 500 watts / min et reliée à la plaque de la partie supérieure de la tige filetée se termine poignée décharge manuelle commande la plaque chauffante montée et de descente.

Pour toucher l'échantillon d'essai dans la chambre. L'extrémité avant du compartiment est le contrôle fermé et ouvert à travers la pièce qui est verrouillé en serrant les serrures fixé sur les bords avant du couvercle en pierre.

Le dispositif comporte des capteurs de température par thermocouples de type PT 100.Elle contient également son pilote et le programme logiciel est préparé par le fabricant doit fournir [14].

c. La conductivité thermique λ :

La conductivité thermique λ s'exprime en watt par mètre et kelvin, ($W/m.K$ ou $W.m^{-1}.K^{-1}$). La conductivité thermique sera d'autant plus faible que le matériau est un bon isolant. Pour l'isolation il faut donc choisir des matériaux dont les conductivités thermiques sont très faibles [15].

Comment calculer la conductivité thermique à l'aide de l'appareille H112N :

La conductivité thermique λ est exprimée par la formule :

$$\lambda = \frac{e[(k_1 + (k_2 \times \bar{T})) + ((k_3 + (k_4 \times \bar{T})) \times HFM) + ((k_5 + (k_6 \times \bar{T})) \times HFM^2)]}{dT}$$

D'où :

λ : la conductivité thermique en (W/mC°).

e : l'épaisseur du La Plaque Thermique en (m).

HFM : lecture de débit thermique (mv).

dt : la différence entre les deux températures T2 et T1 en (C°).

\bar{T} : la moyenne entre les deux températures T2 et T1 en (C°).

Les constants:

K1= -31.7383.

K2= 0.4792.

K3= -31.7383.

K4= 0.0558.

K5= 0.0279.

K6= -0.0005.

Le coefficient de conductivité thermique : $\mu = 1/R$ par (w/m².K).

Le flux thermique \emptyset par (J/m³.K).

Renvoyé à la calibration de l'équation sur le papier de test sont disponibles avec la machine H112N constantes.

La chaleur de la plaque de degré maximum à chaud: La température maximale de la plaque chaude à 100 ° C, mais il est souhaitable de maintenir la valeur maximale du changement sans infusion ° C.

Recommandé par le fabricant de l'appareil d'avoir une différence de température. Entre plaques froides et chaudes: Il est conseillé d'avoir au moins la différence Ola 15 °C.

❖ **Résultats :**

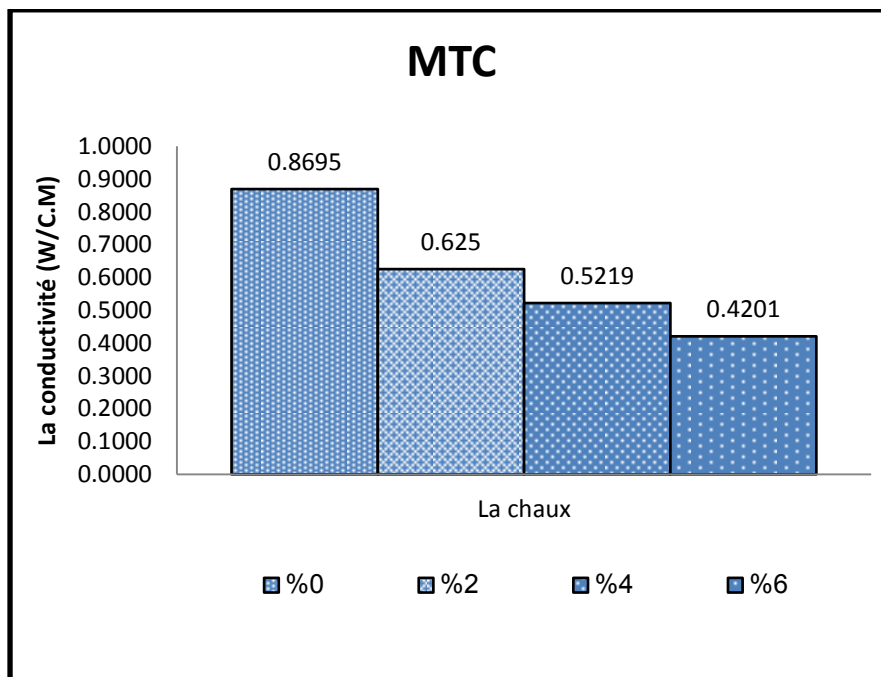


Figure.63 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en chaux éteinte.

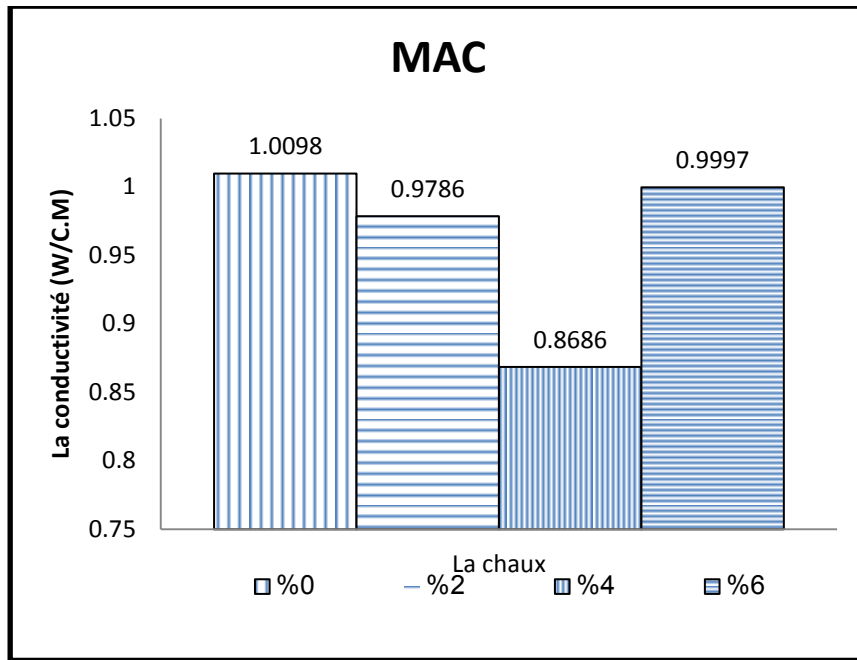


Figure.64 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en chaux éteinte.

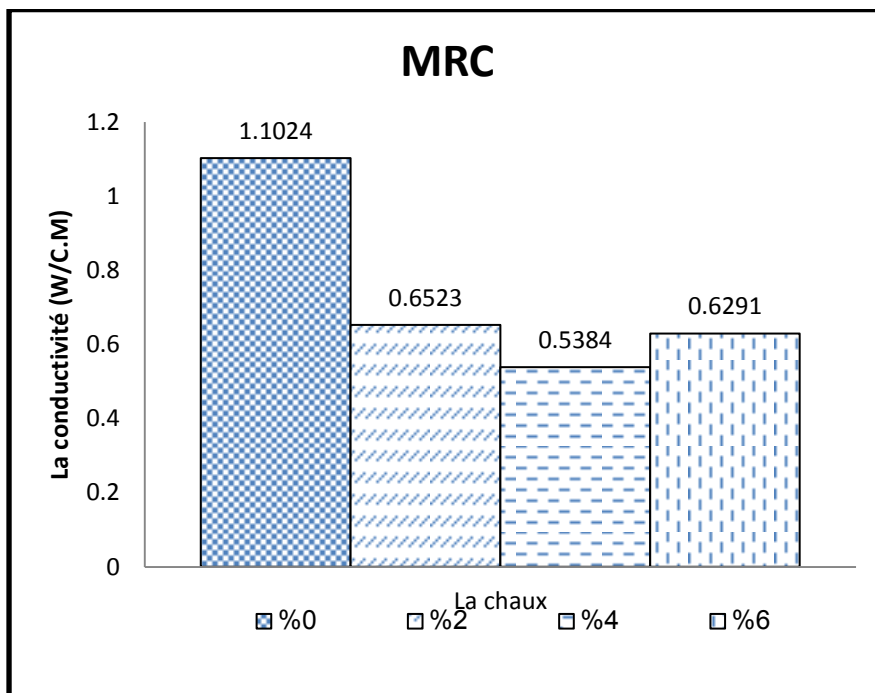


Figure.65 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en chaux éteinte.

Commentaire :

Les résultats obtenus montrent que la diminution de la conductivité thermique est en fonction de la variation de la teneur en chaux éteinte.

Pour les BTCS de Timimoun la conductivité est diminuée en fonction de l'augmentation des pourcentages de chaux éteinte.

La valeur optimale de la conductivité est obtenue avec un dosage de 4% de chaux éteinte pour MAC et MRC.

d. La Résistance thermique Rth :

La résistance thermique mesure la capacité d'isolation d'une couche de matériau : plus la couche sera isolante plus la résistance thermique sera élevée. L'outil donnera en plus du calcul de la résistance thermique de la paroi, la valeur de sa déperdition thermique appelée aussi le coefficient de transmission thermique de la paroi; plus celui-ci est faible plus la paroi sera isolante [16].

La résistance thermique est mesurée en mètre carré kelvin par watt ($m^2.K.W^{-1}$ ou $m^2.K/W$) est égale au rapport entre l'épaisseur e en mètre (m) et la conductivité thermique du matériau λ en watt par mètre et par kelvin ($W.m^{-1}.K^{-1}$ ou $W/m.K$) : $R = e / \lambda$

Avec :

e : l'épaisseur de la plaque.

λ : la conductivité thermique

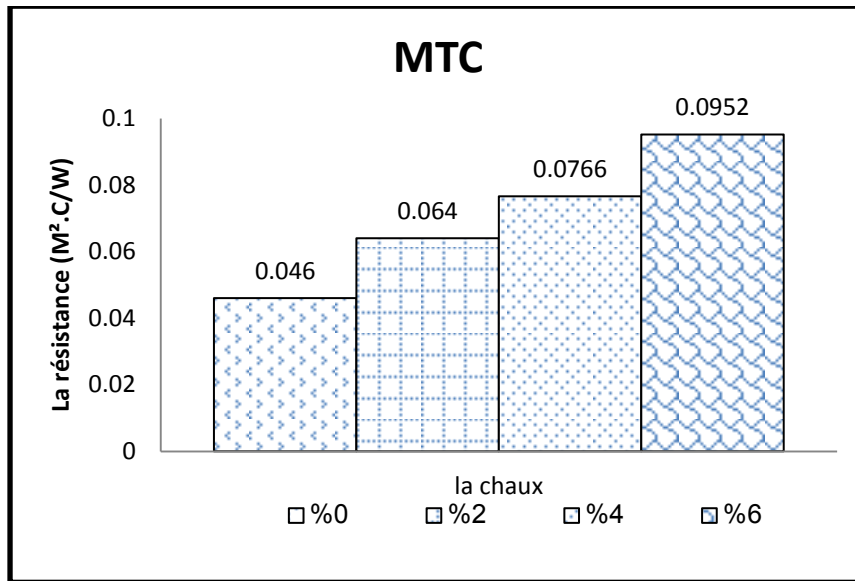


Figure.66 : Variation de la résistance thermique en fonction de la teneur en chaux.

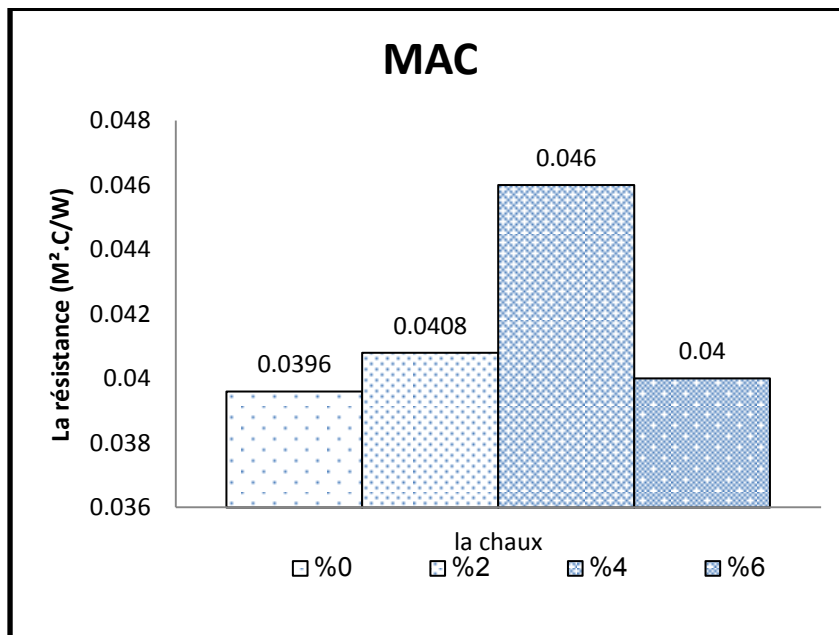
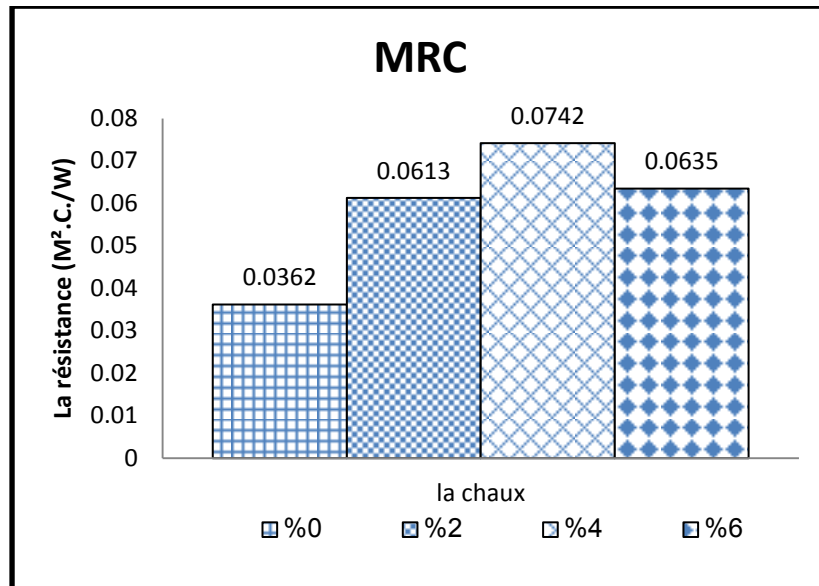


Figure.67 : Variation de la résistance thermique en fonction de la teneur en chaux éteinte.



. **Figure.68** : Variation de la résistance thermique en fonction de la teneur en chaux éteinte.

Commentaire :

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la résistance thermique est en fonction de l'augmentation de la teneur en chaux pour les BTCS (MTC).

La valeur maximale de la résistance thermique est obtenue avec un dosage de 4% de chaux éteinte pour les BTCS (MAC et MRC).

5. Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter les paramètres mécaniques et thermiques des blocs de terre comprimé de la région d'Adrar, Timimoun et Regagne ainsi que d'avoir l'effet de l'ajout de la chaux éteinte sur les propriétés thermiques, physiques et mécaniques comme suivante :

- La résistance à la compression simple est améliorée par l'ajoute de la chaux cela en fonction de l'âge de la conservation.
- La diminution de la conductivité thermique est en fonction de l'augmentation de dosage de chaux éteinte pour la BTCS de Timimoun.
- On a une valeur optimale de la conductivité thermique (MAC et MRC).
- Les valeurs de la résistance thermique obtenues sont proportionnelles avec les valeurs de la conductivité thermique.
- Le coefficient de l'absorption (C_b) diminue avec l'augmentation de dosage de chaux cela pour les BTCS de Timimoun.
- Les valeurs du coefficient d'abrasion obtenues sont généralement acceptables.

Conclusion générale :

A travers le patrimoine mondial de construction en terre, nous avons dénombré plusieurs techniques d'utilisation de la terre pour la construction : l'adobe, le pisé, le torchis, la terre-paille, la bauge, la terre façonnée, la terre extrudée, la terre comprimée...etc.

Par rapport à l'histoire de la construction en terre, la technique du bloc de terre comprimée (BTC) est une technique récente, qui est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe. Comparé à l'adobe, le BTC est très régulier en formes et en dimensions, plus dense et présente une meilleure résistance à la compression et à l'eau.

Cette étude a permis d'utiliser des matériaux locaux, et d'identifier les caractéristiques physico-mécanique et chimique de l'argile de la région d'Adrar, Reggane et de Timimoun ayant pour objet de conception des briques comprimées à base de l'argile et le sable concassé.

Le premier chapitre est réservé à une synthèse bibliographique, à travers laquelle nous avons réalisé, un état de l'art sur les techniques de construction en terre crue, en se focalisant sur la technique des briques de terre comprimées. Le chapitre 1 décrit aussi les techniques pour stabiliser la terre crue.

Le deuxième chapitre a été consacré à la caractérisation des nombreuses matières premières utilisées dans ces travaux. Il s'agit :

- Les argiles de la région de Timimoun, Adrar et Reggane.
- Le sable concassé de la classe (0/3).
- La chaux éteinte.

Le troisième chapitre englobe l'ensemble des résultats obtenus et les discussions dans l'étude expérimentale. Cette étude a permis de suivre l'évolution des caractéristiques des briques de terre comprimée (argile-sable) ainsi que les briques de terre comprimées stabilisées (argile-sable –chaux), notamment la résistance mécanique à (7jours, 14jours, 28jours), l'abrasion et l'absorption.

Par ailleurs nous avons étudié la variation de la conductivité thermique et la résistance thermique du mélange argile avec sable de concassage (BTC) et le mélange avec ajout de la chaux éteinte (BTCS).

Après analyse des résultats nous pouvons formuler les conclusions suivantes :

- La diminution de la conductivité thermique est en fonction de l'augmentation de dosage de chaux éteinte.
- On a une valeur optimale de la conductivité thermique.
- Les valeurs de la résistance thermique sont proportionnelles avec les valeurs de la conductivité thermique.

Nous recommandons pour les futures recherches, que les chercheurs puissent varier les pourcentages d'argile et de sable concassée avec un stabilisant comme la chaux éteinte pour apprécier leur performance, aussi orienté les études sur les propriétés thermiques des BTC, Il faut aussi augmenter « l'âge » d'écrasement de 28 à 90 jours des BTC stabilisées pour permettre la prise relative afin de bien apprécier la résistance.

Bibliographiques

[1] : HAKKOUM Soumia, 2015, Etude des caractéristiques thermiques et mécaniques des briques en terre cuite traditionnelles dans les régions de la wilaya de Ouargla, Mémoire de Magister, Université de Ouargla.

[2] : GHANDJOURI Yamina, GHAITAOUI Hanane, 2017, Valorisation des matériaux de la région d'Adrar en technique des BTC Stabilisées, mémoire de master, Université d'Adrar.

[3] : C. Delbecque, 21 octobre 2011, Approche contemporaine de la construction en terre, Histoire de la construction en terre.

[4] : MAHAMAT Saleh IBRAHIM Yacoub, 2010, Etude Comparative Entre L'amélioration Des Briques En Terre Comprimée Stabilisée Par Le Ciment Et La Chaux Eteinte, Mémoire de Master, Institut International en Ingénierie de l'eau et de l'environnement.

[5] : www.eco-construction-limousin.com, Fiche technique sur les matériaux isolants, Brique de terre crue compressée.

[6] : KRAMI Abderraouf, REGGADI Sidi Mohamed, 2011, Étude des briques de terre gypso-calcaire stabilisée par le ciment ou par la chaux, Mémoire de Master, Université de Ouargla.

[7] : BOKOR Youssouf Sakine, 2011, Vérification des caractéristiques des BTC Stabilisées avec la chaux, Mémoire de Master, Institut International En Ingénierie de l'eau et de l'environnement.

[8] : SAOUS Malika, DJERIFILI Tahra, 2017, Etude des propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux locaux des trois régions, mémoire de master, Université d'Adrar.

[9] : SEVERIN Tchini Tanoh, 2011, Mesure des propriétés thermo physiques des matériaux réfractaires à voie solaire, Mémoire de Master, Institut International en Ingénierie de l'eau et de l'environnement.

[10] : VERONIQUE Boucly Norotte, 1991, Évolution des caractéristiques mécaniques et de la perméabilité de matériaux argileux sous l'effet des Sollicitations thermiques, Thèse de Doctorat, Ecole National des Ponts et Chaussées.

[11] : HUGO Houben, HUBERT Guillaud, CRATerre Traité de Construction en Terre, Editions Parenthèses.

[12] : ABBOU Mohammed, 2012, Utilisation des matériaux locaux comme d'Eco matériaux de Construction, Vi^{ème} Séminaire International Innovation et Valorisation en Génie Civil et Matériaux de Construction.

[13] : J. Ndione, S. Gaye, V. Sambou, M. Adj, D. Azilion, A. Vianou, 25-30-06-2006, Optimisation des propriétés Thermiques et Mécaniques du Béton à Base de Pierre Ponce, Journal des Sciences Pour L'ingénieur.

[14] : J. Craslaw, H. Jaeger, Londres 1959, Construction of Heat in Solids, E. Oxford Science Publications.

[15] : Guide For Soil Thermal Résistivity Measurement, 1981, PE-IEEE Power and Energy Society.

La liste des normes

NF P 94-057 : Sols : Reconnaissance et essai analyse granulométrique des sols par la méthode sédimentation.

NF P 94-054 : Sols : Reconnaissance et essai détermination de la masse volumique des particules solides des sols par la méthode du pycnomètre.

NF P 94-051 : Sols : Reconnaissance et essai détermination des limite d'atterberg (limite de liquidité à la coupelle et limite de plasticité au rouleau).

NF P 18-560 : Reconnaissance et essai analyse granulométrique des sols par tamisage à sec.

NF P18 598: Essai d'équivalent de sable.

NF P 18 555: Essai de la masse volumique apparent et absolue.

XP-P 13 901 : Essais d'absorption.

XP-P 13 901 : Essais de la compression simple.

XP-P 13 901 : Essais d'abrasion.

ISO 8302 : Essai de la plaque chaude gardée.

LES ANNEXE :

Annexe.01: Fabrication des briques,



Annexe.02 : Préparation des plaques.

