

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Abderrahmane Mira De Bejaia**



## Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Mastère en Génie Civil

Option : Structures

Thème

**Etude de l'influence des ajouts de Noyaux de Dattes Broyées (NDB) sur les caractéristiques physico- mécaniques et thermique d'une brique en terre crue comprimé (BTC)**

**Présenté par :** Belaid Fayçal

**Encadré par :** Chelouah Nasser

**Devant le jury composé de :**

- **Président :** Mr. BOUZIDI Mohammedamine
- **Encadrant :** Mr. CHELOUAH Nasser
- **Examineur :** Mme. ATTIL Souad

**Année Universitaire :** 2019/2020



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Dédicace

*Je dédie ce travail*

*A ma très chère mère que j'aime plus que tout dans cette vie, qui m'a donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance et pour qui je suis redevable d'une éducation dont je suis fier.*

*A ma grand-mère Tasadit, mes chères tentes Nacera et Kahina et son mari Rachid, à mon oncle Ahcene qui m'a toujours soutenu et motivé tout le long de mon parcours et de mes études.*

*A mes frères : Wassim, Ferhat et Yougourta pour leur encouragement.  
A mes petits cousins Aksil et Ilyasse que j'aime beaucoup.*

*A mes amis.*

## **Remerciements**

*Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force, la santé et la volonté de mettre au point ce travail.*

*Je remercie de tout cœur ceux qui ont participé à la réalisation de ce travail, et plus particulièrement mon encadreur le professeur CHELOUAH NASSER qu'il trouve ici l'expression de mes remerciements et de mon profond respect.*

*Mes sincères remerciements et gratitude à tous les enseignants du département de Génie Civil et aux membres de jury qui a bien voulu évaluer ce modeste travail.*

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

**Merci**

# Sommaire

Dédicace	I
Remerciements	II
Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur les dattes algériennes et les noyaux de dattes	3
I.1 Introduction	3
I.2 Production des dattes dans le monde et en Algérie	3
I.2.1 Production dans le monde	3
I.2.2 Production de datte en Algérie	5
I.3 Les dattes	5
I.3.1 Les variétés cultivées	6
I.4 Le noyau de datte	6
I.4.1 Composition chimique du noyau de datte	7
Conclusion	8
Chapitre II : Généralités sur les argiles utilisées pour la confection de briques en terre crue	9
II.1 Introduction	9
II.2 Les argiles	10
II.2.1 Définition et origine des argiles	10
II.2.2 Structure et composition minéralogique des argiles	11
II.2.3 Classification des minéraux argileux	12
II.3 Propriétés physico-chimiques des argiles	17
II.3.1 La Plasticité	17
II.3.2 La compressibilité	18
II.3.3 Forme et surface spécifique	18
II.3.4 Degré d'hydratation et gonflement	19
II.3.5 La capacité d'échange cationique	20
II.4 Influence de la composition minéralogique sur les argiles	21
II.5 Forces existantes entre les particules argileuses	21
II.5.1 Forces chimiques	21
II.5.2 Les forces ion-électrostatique	22
II.5.3 La capillarité (forces capillaires)	22
II.5.4 Les forces de Van der Waals	22
II.5.5 Les forces électrostatiques de (coulomb)	23
II.6 La stabilisation des argiles	23

II.6.1 Stabilisation mécanique	23
II.6.2 Stabilisation physique	24
II.6.3 Stabilisation chimique	24
Conclusion	25
Chapitre III : Généralités sur les briques en terre crue de construction	26
III.1 Introduction	26
III.2 Historique de l'emploi de la terre crue dans la construction	27
III.2.1 Le Passé	27
III.2.2 Le Présent	28
III.3 Avantages de la terre crue	28
III.3.1 Réduction de l'énergie grise	28
III.3.2 Réduction de l'énergie de fonctionnement des bâtiments	29
III.3.3 Recyclage ou élimination des déchets de démolition	30
III.3.4 Isolation sonore	30
III.3.5 La disponibilité et l'abondance	30
III.4 Les techniques de construction en terre crue	30
III.4.1 L'Adobe	32
III.4.2 Le Torchis	32
III.4.3 La bauge	33
III.4.4 Le Pisé	34
III.5 Blocs de terre comprimée (BTC)	34
III.5.1 Les étapes de production des briques en terre comprimée (BTC)	35
III.5.2 Avantages des BTC par rapport aux autres techniques	36
III.5.3 Diversités des produits de blocs de terre comprimée (BTC)	37
III.5.4 Les utilisations des BTC	38
III.5.5 Caractéristiques des BTC et des matériaux classiques (comparaison)	39
III.5.6 Les blocs de terre comprimée (BTC) stabilisée	40
III.6 Codes, normes et directives dans le domaine de la construction en terre	40
III.6.1 Dans le monde	40
III.6.2 En Europe	41
III.7 Exemples de construction en BTC	41
Conclusion	42
Chapitre IV : Matériaux et méthodes expérimentales.	43
IV.1 Introduction	43
IV.2 Confection des éprouvettes	43

IV.2.1 Principe	43
IV.2.2 Matériel utilisé	43
IV.2.3 Préparation du matériau	44
IV.2.4 Mode opératoire	45
IV.3 Matériaux utilisés	46
IV.4 Caractérisation des matériaux	46
IV.4.1 Analyses chimiques de l'argile	46
IV.4.2 Analyse minéralogique de l'argile	47
IV.4.3 L'analyse granulométrique de l'argile	50
IV.4.4 Analyse chimique des noyaux de dattes	50
IV.5 Les limites d'Atterberg	57
IV.5.1 Principe de détermination des limites d'Atterberg	57
IV.5.2 Matériels nécessaires	57
IV.5.3 Mode opératoire	58
IV.6 Méthodes expérimentales	59
IV.6.1 La résistance mécanique	60
IV.6.2 La conductivité thermique	61
IV.6.3 Le coefficient d'absorption d'eau (capillarité)	61
IV.6.4 Les pertes et retrait longitudinal de séchage	62
IV.6.5 Analyse de la porosité grâce au prosimètre à mercure	63
IV.6.6 Masse volumique apparente (densité apparente)	64
Chapitre V : Résultats et discussion	65
V.1 Introduction	65
V.2 L'effet de NDB sur les propriétés physiques des briques en terre crue	65
V.2.1 L'effet de NDB sur le retrait des briques en terre crue	65
V.2.2 L'effet de NDB sur la densité apparente des briques en terre crue	66
V.2.3 L'effet de NDB sur le coefficient d'absorption d'eau C% des briques en terre crue	67
V.3 L'effet de NDB sur les propriétés mécaniques des briques en terre crue	68
V.3.1 L'effet de NDB sur la résistance à la compression des briques en terre crue	68
V.3.2 L'effet de NDB sur la résistance à la flexion des briques en terre crue	69
V.4 L'effet de NDB sur les propriétés thermiques des briques en terre crue	69
Conclusion générale	70
Perspectives	72
Références bibliographiques	73

Annexes	80
Annexe I	80
Annexe II	81
Annexe III	82
Résumé	83
Abstract	84
ملخص	85

## Liste des figures

Figure I.1 - Classement des pays leaders mondiaux selon leur production en dattes (FAOSTAT).	4
Figure I.2 - La répartition géographique de la production mondiale de dattes (FAOSTAT).	4
Figure I.3 - La production de dattes en Algérie entre 2000 et 2018 (FAOSAT).	5
Figure I.4 - Coupe longitudinale d'une datte (Munier, 1973).	6
Figure I.5 - Morphologie et anatomie du noyau de datte (Munier, 1973).	7
Figure II.1 - Termitières géantes (Australie).	9
Figure II.3 - Processus de formation des argiles.	11
Figure II.2 - Les différents types de phyllosilicates formés au cours de l'altération [32].	11
Figure II.4 -Couche tétraédrique (T) : tous les tétraèdres pointent dans le même sens [36].	12
Figure II.5 - Couche octaédrique (O) composée d'octaèdres de gibbsite Al (OH) 3 ou de brucite Mg (OH) 2 [36].	12
Figure II.6 - Structure des minéraux argileux (Duchaufour, 1988).	13
Figure II.7 - Structure de la kaolinite [35] (à droite) , image MEB d'une kaolinite [30] (à gauche).	14
Figure II.8 - Structure de l'illite [75] (à droite),image MEB d'une illite [76] (à gauche).	14
Figure II.9 - Structure d'une montmorillonite [32] (à droite) , image MEB d'une montmorillonite [30] (à gauche).	15
Figure II.10 - Structure d'un chlorite [32] (à droite), image MEB d'un chlorite (à gauche).	15
Figure II.11 - Structure d'une sépiolite selon BAILEY 1980 (à droite), image MEB de sépiolites.	16
Figure II.12 - Structure d'une palygorskites selon BAILEY 1980 (à droite), image MEB d'Attapulgites (à gauche).	16
Figure II.13 - Représentation des limites d'Atterberg.	17
Figure II.14- Forme des particules argileuses	19
Figure II.15- Représentation schématique de la couche inter foliaire Dans le cas de cations hydratés	20
Figure III.1 - Image de quelques vestiges en terre crue classée au patrimoine mondial de l'Unesco (a) Bam en Iran, (b)Khiva en Ouzbékistan, (c) Al-Turaif en Abrie saoudite, (d)Chanchan au Pirou.	27
Figure III.2 - Construction en terre dans le monde (CRATerre).	28
Figure III.3 - Ordres de grandeur d'énergie grise de différents matériaux de construction (écoconso, 2020).	29
Figure III.4 - Schéma des différentes techniques de construction en terre établi par le groupe CRATERRE en 1986 [77]	31
Figure III.5 - Images qui illustrent le procédé de fabrication des briques crue (Adobe).	32
Figure III.6 - Image qui illustre une maison construite avec la technique du torchis.	32
Figure III.7 - Illustration qui représente les procède de mise en place des torchis.	33
Figure III.8 - Un mur réalisé avec la technique de la bague.	33
Figure III.9 - Mur construit avec la technique du pisé.	34
Figure III.10- Comparaison entre les outils traditionnels et modernes utilisés dans la construction en pisé.	34
Figure III.11 - Image qui montre le compactage d'une brique l'aide de (a) machine hydraulique (b) presse manuelle.	35

Figure III.12- Image qui représente les étapes de construction d'un mur en briques comprimées. _____	35
Figure III.13 - Les étapes de production des briques en terre comprimée (BTC). _____	36
Figure III.14 - Typologie des blocs comprimés. _____	37
Figure III.15- Images de quelques constructions faites avec des briques en terre comprimée (a) au Cameroun, (b) en Colombie, (c) au Mali, (d) au sud-Afrique. _____	41
Figure IV.1 - Matériel utilisé pour la confection des éprouvettes. _____	44
Figure IV.2 - Les différents diamètres des noyaux de dattes après broyage _____	44
Figure IV.3 - Images des étapes de confection des éprouvettes expérimentales[60], [78]. ____	45
Figure IV.4 - Schéma de principe d'un spectromètre (Spectrofluorescence X). _____	46
Figure IV.5 - Coulage de la pastille à 900°C (gauche) et dispositif de fluorescence X utilisé (droite)[62]. _____	47
Figure IV.6 - Schéma de principe de la diffraction au rayon x _____	48
Figure IV.7 - Image d'un DRX (Diffractomètre a Rayon X) (à droite), échantillons de poudres (à gauche). _____	49
Figure IV.8 - Diagramme de diffraction des rayons X de l'argile. _____	50
Figure IV.9 - Granulométrie de l'argile. _____	50
Figure IV.10 - Matériel nécessaire pour déterminer la masse sèche et la teneur en eau : une étuve (à gauche) et une balance de précision de laboratoire (à droite). _____	51
Figure IV.11 - Image de dessiccateurs halogène (à gauche) en verre (à droite). _____	52
Figure IV.12 - Schéma des attaques chimiques subies par la matière végétale lors du dosage ADF – NDF. _____	53
Figure IV.13 - Les étapes de réalisation des attaques NFD-ADF à l'aide l'appareil Fibertec system M-Hot extractor (FOSS) pour la détermination de la teneur en fibres. _____	54
Figure IV.14 - Image de Kjeltec 2200 à gauche et de Digestor 2020 à droite. _____	55
Figure IV.15 - Différentes réactions chimiques de la méthode de Kjeldahl. _____	55
Figure IV.16 - Schéma et principe de fonctionnement de l'appareil de Soxhlet. _____	56
Figure IV.17 – Image s'appareil de Casagrande _____	58
Figure IV.18 - Les étapes de détermination de la limite de liquidité (WL) selon la norme NF P94-051. _____	58
Figure IV.19 - Les étapes de détermination de la limite (WP) selon la norme NF P94-051. _	59
Figure IV.20 - Essai de flexion a 3 points. _____	60
Figure IV.21 - Essais de compression. _____	60
Figure IV.22 - Essai de détermination de la conductivité thermique. _____	61
Figure IV.23 - Schéma de l'essai d'absorption capillaire. _____	62
Figure IV.24 - déformomètre (à gauche), pied à coulisse (à droite). _____	63
Figure IV.25 - Prosimètre à Mercure PASCAL 140 et 240. _____	63
Figure IV.26 - Schéma de la structure microscopique d'une éprouvette en argile. _____	64
Figure V.1 - L'effet de NDB sur le retrait des briques en terre crue (à gauche), et la teneur en eau pour la plasticité[63]. _____	65
Figure V.2 - le processus d'absorption d'eau et le séchage des briques avec ajouts organique. _____	66
Figure V.3 - L'effet des ajouts organiques sur la densité apparente des briques crue (à gauche), brique cuite (à droite). _____	66
Figure V.4 - Résistance à la compression en fonction du diamètre et du contenu du NDB [63]. _____	68

Figure V.5 - Résistance à la flexion en fonction du diamètre et du contenu du NDB [63]. \_\_ 69  
Figure V.6 - Conductivité thermique en fonction du diamètre et du contenu du NDB [62]. \_ 70

## Liste des tableaux

Tableau I.1 - Composition chimique des noyaux de dattes des quatre principales variétés algériennes[24].	7
Tableau I.2 - Composition minéralogique d'un noyau de datte (Deglet-Nour)[25].	8
Tableau II.1 - Résumé des propriétés des différents types d'argiles.	17
Tableau II.2 - Surface spécifique des particules argileuses en m <sup>2</sup> /g [37].	18
Tableau II.3 - Relation entre les cations et le gonflement [2].	20
Tableau II.4 - Capacité d'échange de cations (C.E.C) et surface spécifique totale (Sst) de quelques argiles [33].	20
Tableau II.5 - L'influence de la composition minéralogique sur les propriétés des argiles [36].	21
Tableau III.1 - différentes techniques de construction en terre (Houben et Guillaud, 1989) [55]	31
Tableau III.2 - Différents types d'usage pour les blocs de terre comprimée (Rigassi, 1995)[56].	38
Tableau III.3- Tableau comparatif pour différentes caractéristiques, performances et quelque aspect d'utilisations en maçonnerie (Rigassi, 1995) [16].	39
Tableau III.4 - Différentes normes de construction en terre crue selon les pays.	40
Tableau III.5 - Normes en vigueur dans certains pays européens.	41
Tableau IV.1 Composition chimique de l'argile (% m)[63].	47
Tableau IV.2 - Composition minéralogique de l'argile (% m)[63].	49
Tableau IV.3 - Composition chimique des noyaux de dattes (% m)[63]	57
Tableau IV.4 - Les limites de liquidité (WL) en (%) du mélange (argile +NDB) en fonction du diamètre et pourcentage d'ajout de NDB[63].	59
Tableau V.1 - Densité apparente (g / cm <sup>3</sup> ) en fonction du diamètre et du contenu en NDB[63].	67
Tableau V.2 - Coefficient d'absorption d'eau - C (%) en fonction du diamètre et de la teneur en NDB [63].	67

## Introduction Générale

## Introduction Générale

La hausse des prix de l'énergie et l'épuisement des ressources naturelles deviennent des réalités urgentes qui ont besoin de nouvelles solutions. Par conséquent, l'élaboration de nouveaux matériaux de construction plus écologiques et moins énergivores est désormais clairement une priorité et un défi majeur pour réduire la consommation d'énergie et résoudre le problème de gestion des déchets, dans les pays développés et en voie de développement[1].

L'augmentation de la production agricole et le développement des industries agroalimentaires dans de nombreux pays du monde ont entraîné la production de grandes quantités de déchets agricoles, dont la plupart ne sont pas gérés et utilisés de manière adéquate. Les déchets agricoles ont été utilisés pour l'alimentation animale, les engrais et comme carburant pour la production d'énergie, mais peu de travaux ont été menés pour développer l'utilisation de ces déchets dans la production de matériaux de construction. La nécessité de conserver les matériaux de construction traditionnels confrontés à l'épuisement a rendu essentielle la recherche de matériaux alternatifs [2].

En effet, l'accumulation de déchets solides agro-industriels non gérés, en particulier dans les pays en développement, entraîne une préoccupation environnementale accrue. Le recyclage de ces déchets en tant que matériau de construction durable semble être une solution viable non seulement au problème de la pollution, mais également une option économique pour concevoir des bâtiments écologiques et atteindre le développement durable. Ainsi, cela pourrait répondre à la demande de surproduction nécessitant l'extraction d'une quantité importante d'argile servant de matière première dans les briqueteries [3].

De nombreux chercheurs ont présenté des articles sur la réutilisation des déchets agricoles et industriels sous forme d'ajouts incorporés lors de la fabrication des briques en argile. Cela comprend, par exemple, l'utilisation de sciure de bois, de charbon, de boues de papier et de paille[4], de cendres de riz [5], déchets de thé [6], tabac et herbe[7], graines de cerisier [5], canne à sucre cendres de bagasse [9], fibres naturelles [10], les noyaux d'olivier moulus [11].

Dans le même axe de recherche et dans la même gamme de matériaux, le noyau de datte a été choisi pour cette étude, car très abondant en Algérie. L'idée de ces recherches est d'élaborer des matériaux construction de substitution en utilisant des matières premières

renouvelables contrairement aux ajouts inorganiques dont les ressources s'appauvrissent et se raréfient.

Le but principal de cette étude était d'évaluer l'effet des noyaux de dattes concassés sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques d'une brique d'argile. À cet effet, des quantités croissantes de noyaux de dattes concassés (0, 5, 10, 15 et 20 % en poids) de différents diamètres (0-0.20mm, 0.20-0.25mm, 0.25-0.50mm, 0.50-1.00mm) respectivement seront mélangées à une argile mélangée à l'eau pour produire des briques d'argile non cuites.

Ce travail s'articule autour de cinq chapitres, le premier chapitre est consacré aux généralités sur la production de datte en Algérie, les noyaux de datte, leurs compositions chimiques, caractéristiques physiques, leurs recyclages et domaines d'application. Le second chapitre est consacré aux généralités sur les argiles utilisées pour confection de briques en terre crue. Le troisième chapitre présente les généralités sur les briques en terre crue de construction. Le quatrième chapitre est consacré aux matériaux utilisés dans cette étude, leurs caractéristiques, ainsi que les méthodes expérimentales. Le cinquième chapitre présente les résultats obtenus et leurs discussions. Pour finir, une conclusion générale et les perspectives seront présentées.



Chapitre I :  
Génialités sur les dattes algériennes et les noyaux de dattes

---

# Chapitre I : Génialités sur les dattes algériennes et les noyaux de dattes

## I.1 Introduction

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) est un arbre rustique s'adaptant aux régions les plus arides du monde. C'est une plante monocotylédone arborescente, de la famille des palmacées ou phœnicacées sous famille des coryphènes. C'est un arbre d'un grand intérêt en raison de sa productivité élevée, de la qualité nutritive de ses fruits, les multiples utilisations de ses produits et sa morphologie favorisant d'autres cultures sous-jacentes[12].

La phœniciculture est la plus importante culture des zones arides et semi-arides et le pivot central autour duquel s'articule la vie dans les régions Sahariennes, elle revêt une grande importance socioéconomique et environnementale dans de nombreux pays[13]

L'Algérie est classée parmi les principaux pays producteurs de dattes (4e rang mondial avec 11 % de la production mondiale [FAOSTAT]).

Les sous-produits du palmier dattier [Feuilles, tronc, noyaux, pédicelles... etc.] ont diverses utilisations dans les régions sahariennes, les noyaux de dattes en particulier, généré par le secteur agroalimentaire [pâte de datte, sirop, vinaigre...], sont principalement utilisés dans l'alimentation de bétail [bovin, mouton, chameaux, et les volailles] [14], [15]

De nombreux travaux de recherche sont consacrés à la valorisation du noyau de dattes sous différentes formes : charbon actif [16], supplément en alimentation de bétail [Hussein et Alhadrami, 2003], préparation de l'acide citrique et de protéines [17], en médecine traditionnelle pour ses propriétés antimicrobienne et antivirale[18] .

## I.2 Production des dattes dans le monde et en Algérie

### I.2.1 Production dans le monde

La production mondiale de dattes est estimée à plus de 8,5 millions de tonnes en 2018. Les principaux pays producteurs de dattes les plus importants sont : l'Égypte, l'Iran, l'Arabie Saoudite, l'Algérie, les Émirats arabes, l'Irak, le Pakistan et le Soudan. L'Algérie serait le quatrième producteur mondial de dattes selon les données de la (FAO) [19].

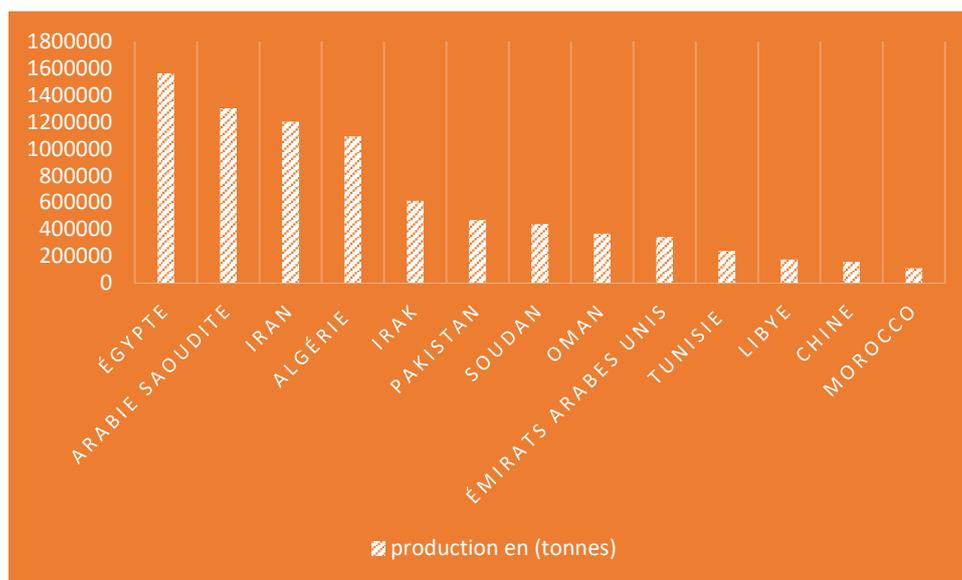


Figure I.1 - Classement des pays leaders mondiaux selon leur production en dattes (FAOSTAT).

La répartition de la production mondiale de dattes fait ressortir que l'Asie (Arabie saoudite, Bahreïn, Émirats arabes unis, Iran, l'Irak, le Koweït, Oman, Pakistan, Turkménistan et Yémen) est en première position avec 61.3% de production totale tandis que l'Afrique (Algérie, Égypte, Libye, Mali, Maroc, Mauritanie, Niger, Somalie, Soudan, Tchad et Tunisie) est en deuxième position avec 38.1% de cette dernière [19].

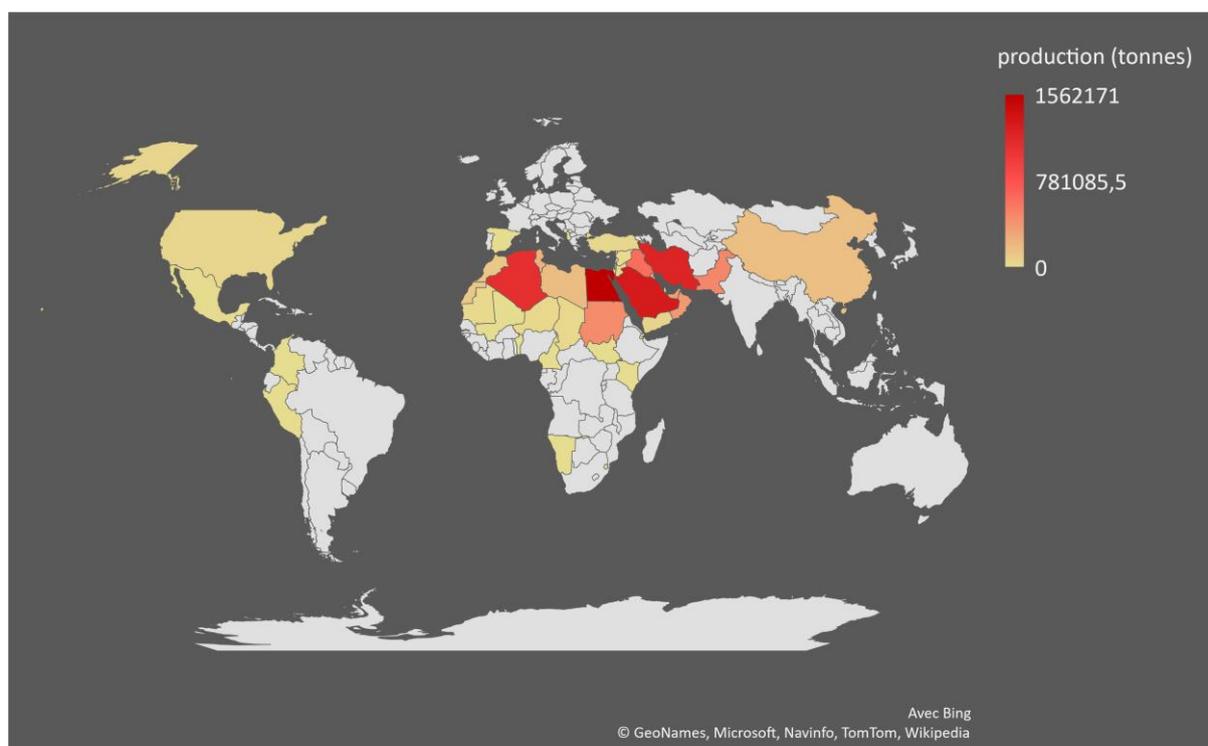


Figure I.2 - La répartition géographique de la production mondiale de dattes (FAOSTAT).

## I.2.2 Production de datte en Algérie

Avec 18 201 640 palmiers dattiers éparpillés sur une surface globale de 168855 ha et une production de 1094700 tonnes, avec un rendement estimé à 67,7 kg par palmier dattier et 86,3kg pour la variété « Deglet Nour » contre une production de 51,6kg et 58,2 kg par palmier dattier respectivement pour la Degla Beida et les dattes sèches, El Ghars et les dattes moelles[20].l'Algérie figure parmi les grands pays à fort potentiel phoenicicole.

La palmeraie nationale est essentiellement concentrée dans le Sud-est, son importance est décroissant en allant vers l'ouest et le sud. La palmeraie algérienne est située comme suit : dans le sud-est ( El Oued, Ouargla et Biskra) qui possède 67% de la palmeraie algérienne, le Sud-ouest (Adrar et Bechar) qui possède 21% de palmeraie, l'extrême Sud (Ghardaïa, Tamanrasset, Illizi et Tindouf) avec 10% et d'autres régions qui représentent 2% de la palmeraie[21].

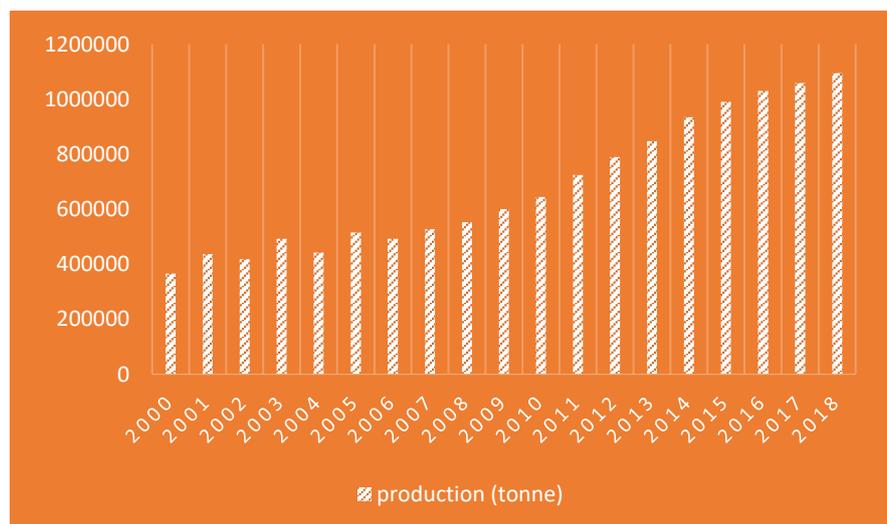


Figure I.3 - La production de dattes en Algérie entre 2000 et 2018 (FAOSAT).

## I.3 Les dattes

La datte, fruit du palmier dattier, est une baie de forme allongée, oblongue ou arrondie. Sa dimension varie de 1,5 à 8 cm de longueur et son poids varie de 2 à 8 grammes selon les variétés. Sa couleur va du blanc jaunâtre au sombre très foncé presque noir, en passant par les ambres, rouges et bruns. La datte contient une seule graine dite "noyau". La partie comestible de la datte, est dite "chair" ou "pulpe".

### a) La partie comestible (dite chair ou pulpe) :

- Un mésocarpe généralement charnu, de consistance variable selon sa teneur en sucre et de couleur soutenue.

- Un péricarpe ou enveloppe cellulosique fine dénommée peau.
- Un endocarpe de teinte plus claire et de texture fibreuse, parfois réduit à une membrane parcheminée entourant le noyau [22].

#### b) Partie non comestible :

- Formée par la graine ou le noyau, ayant une consistance dure.

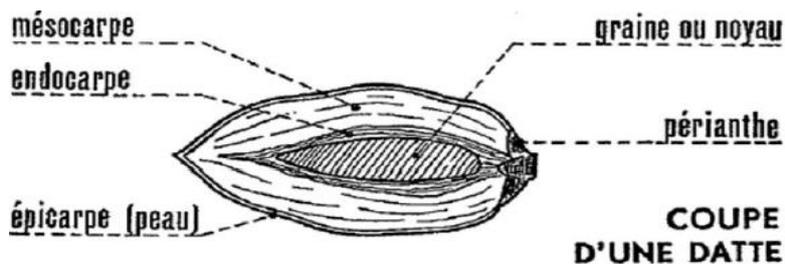


Figure I.4 - Coupe longitudinale d'une datte (Munier, 1973).

### I.3.1 Les variétés cultivées

Il existe environ 200 variétés de dattes cultivées en Algérie qui se différencient par leur qualité et leur appréciation sur le marché. Les principales variétés sont les suivantes :

- Deglet Nour.
- Degla Baida.
- Ghars.
- Hamraya.

Les autres variétés ont une importance économique très réduite, car elles sont peu appréciées dans le nord du pays et nullement à l'étranger.

### I.4 Le noyau de datte

Le noyau de datte ou encore appelé graine, est de forme allongée et de grosseur variable, son poids moyen est environ d'un gramme, et représente 7 à 30% du poids de la datte (Adrar, 2016.). Ce dernier est entouré d'un endocarpe parcheminé, généralement lisse ou pourvu de protubérances latérales en arêtes ou ailettes, avec un sillon ventral, l'embryon est dorsal, sa consistance est dure et cornée (Dammak et al., 2007). Il possède un albumen (endosperme) dur et corné dont l'embryon dorsal est toujours très petit par rapport à l'albumen de 2 à 3 mm [23].

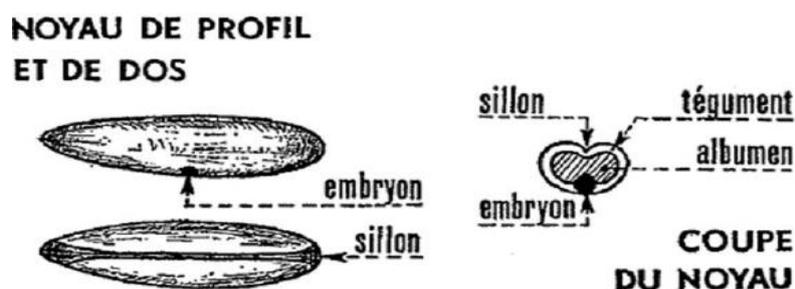


Figure 1.5 - Morphologie et anatomie du noyau de datte (Munier, 1973).

#### I.4.1 Composition chimique du noyau de datte

Les noyaux de dattes sont principalement constitués de substances caractéristiques de la matière organique (glucides, protéines et lipides), de cellulose et de cendres. Les teneurs des noyaux en eau, fibres, matière grasse, protéines, sucres et en cendres varient d'une variété à une autre [24].

Tableau I.1 - Composition chimique des noyaux de dattes des quatre principales variétés algériennes [24].

Variété/ Paramètre	Deglet Nour	Degla Baida	Ghars	Hamraya
Taux d'extraction (%)	76,00	75,00	65,00	60,00
Humidité (%)	8,08 ± 0,09	6,37 ± 0,04	12,42 ± 0,37	6,79 ± 0,02
Matière sèche (%)	91,92 ± 0,09	93,63 ± 0,04	87,58 ± 0,37	93,21 ± 0,02
Cendres (%MS)	1,08 ± 0,00	1,01 ± 0,05	0,80 ± 0,00	0,85 ± 0,01
Matière organique (%MS)	98,92 ± 0,01	98,99 ± 0,05	99,21 ± 0,00	99,15 ± 0,01
Protéines brutes (% MS)	8,59 ± 0,68	6,61 ± 0,17	6,51 ± 0,11	6,72 ± 0,29
Cellulose brute (% MS)	13,54 ± 1,17	16,27 ± 1,39	14,78 ± 0,60	13,94 ± 0,31
Sucres totaux hydrosolubles (% MS)	6,02 ± 1,24	7,09 ± 0,74	7,08 ± 0,03	7,41 ± 0,29
Matière grasse (% MS)	9,81 ± 1,78	8,72 ± 1,02	11,70 ± 1,76	10,39 ± 2,21
Glucides totaux (%MS)	66,98 ± 1,89	67,39 ± 1,59	66,21 ± 2,11	68,10 ± 0,47
Ph	5,76 ± 0,07	5,91 ± 0,19	6,12 ± 0,09	5,93 ± 0,13
Acidité grasse (%)	0,03 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,04 ± 0,00	0,02 ± 0,00

Tableau I.2 - Composition minéralogique d'un noyau de datte (Deglet-Nour)[25].

<i>Variété Deglet-Nour</i>			
<i>Potassium</i>	<i>0.238±0.001</i>	<i>Zinc</i>	<i>1.363±0.044</i>
<i>Magnésium</i>	<i>0.048±0.001</i>	<i>Cuivre</i>	<i>1.123±0.023</i>
<i>Calcium</i>	<i>0.034±0.001</i>	<i>Fer</i>	<i>1.763±0.027</i>
<i>Phosphore</i>	<i>0.058±0.01</i>	<i>Manganèse</i>	<i>0.273±0.019</i>
<i>Sodium</i>	<i>10.37±0.081</i>		

## Conclusion

La disponibilité des ressources pour les agrégats tirés directement de la nature diminue, et donc des alternatives viables à considérer sont soit des gravats recyclés, soit des granulats déchets provenant de processus agricoles.

En 2018 la production mondiale de dattes a été estimée à 8,5 millions de tonnes. L'Algérie est parmi les leaders dans production de ce fruit avec la 4e place au rang mondial. Les noyaux de dattes qui représentent environ 7 à 30 % du poids des fruits constituent un flux de déchets agricoles abondants et renouvelables très peu valorisés (alimentation de bétail, médecine traditionnelle) ce qui fait de lui un candidat parfait de substitution d'origine agricole dans notre pays.

La Composition chimique du noyau de dattes a révélé que celui-ci est majoritairement composé de Cellulose principale responsable de sa dureté et capacité à absorber l'eau, qui sont toute les deux des propriétés intéressantes pour un agrégat destiné à être utilisée dans la fabrication de briques en terre crues.

Chapitre II :  
Généralités sur les argiles utilisées pour confection de  
briques en terre crue.

## Chapitre II : Généralités sur les argiles utilisées pour la confection de briques en terre crue

### II.1 Introduction

L'observation de la nature autour de nous révèle que de nombreuses créatures vivantes habitent des maisons qui sont soit creusées dans le sol, soit faites de terre. Il s'agit de petits organismes tels que les insectes, les vers de terre, les escargots ou de plus gros animaux tels que les blaireaux, les taupes, les serpents et les tortues. L'un des exemples les plus intéressants est fourni par les termites africains (aussi surnommés Fourmies blanche), qui utilisent de la boue pour construire des abris thermorégulés qui amortissent les grandes fluctuations de température de la savane et assurent le maintien d'une température et hygrométrie intérieure stable et optimale pour le nid[26]. Ces structures en terre sont extrêmement durables, comme le démontre la découverte de monticules de termites bien conservés qui datent de plusieurs centaines d'années.

Manifestement pour édifier leurs termitières ces fourmis vont utiliser l'argile mélangée avec leurs excréments pour confectionner des mortiers, en profitant des propriétés de rétention d'eau de la plasticité et de l'adhésion du minéral colloïde, pour ensuite étaler, maçonner et juxtaposer des boudins de ce mortier en utilisant de la salive et leurs mandibules[27].

Ces observations ont également été corroborées par des recherches récentes, qui ont fourni un soutien croissant à l'utilisation de l'argile dans la construction pour améliorer l'efficacité énergétique et le confort des bâtiments. (argile stabilisée [2], [8], briques en terre comprimée BTC[28], [29]).



Figure II.1 - Termitières géantes (Australie).

## II.2 Les argiles

### II.2.1 Définition et origine des argiles

Le mot « argile » englobe deux connotations, l'une liée à la taille des grains [30] et l'autre à la minéralogie[31]. En effet l'appellation argile diffère en fonction des disciplines et des domaines d'étude. Elles se fondent sur les propriétés physiques étudiées, par exemple la plasticité, sur l'emploi qui en est fait ou encore sur la structure cristallographique. Ainsi en géotechnique, où l'on s'intéresse avant tout au comportement mécanique des sols, on désigne par argile les matériaux de granulométrie inférieure à 2  $\mu\text{m}$ . Par contre dans le domaine de l'ingénierie où l'intérêt se porte sur la propriété plastique de l'argile le terme est utilisé pour décrire les phyllosilicates et plus particulièrement les minéraux argileux. Quelle que soit la discipline, la structure cristalline des argiles est importante, car elle est responsable des propriétés spécifiques du minéral.

De manière générale, les argiles sont des matériaux sédimentaires issus de la couche superficielle de l'écorce terrestre. Ces matériaux sont issus de la dégradation physique ou chimique des minéraux de roches telles que le granite ou le basalte par l'action des eaux surfaciques. Ils vont ensuite être déplacés par différents moyens (eau, vent) pour se déposer dans des bassins de sédimentation[31]. Leur structure résultante dépend du climat (température et humidité), de l'altitude, des minéraux présents dans leur environnement et de plusieurs facteurs géologiques (éruption volcanique, présence d'eau et des sels, etc.). En climat froid : l'altération est faible, les minéraux argileux sont identiques ou peu différents des minéraux de la roche (illite et chlorite), ils sont hérités de la roche d'origine. En climat chaud et humide, l'hydrolyse est poussée, la kaolinite se forme en milieu drainé, les smectites en milieu confiné. En fonction des roches-mères et du climat, les minéraux argileux résultants sont différents[32].

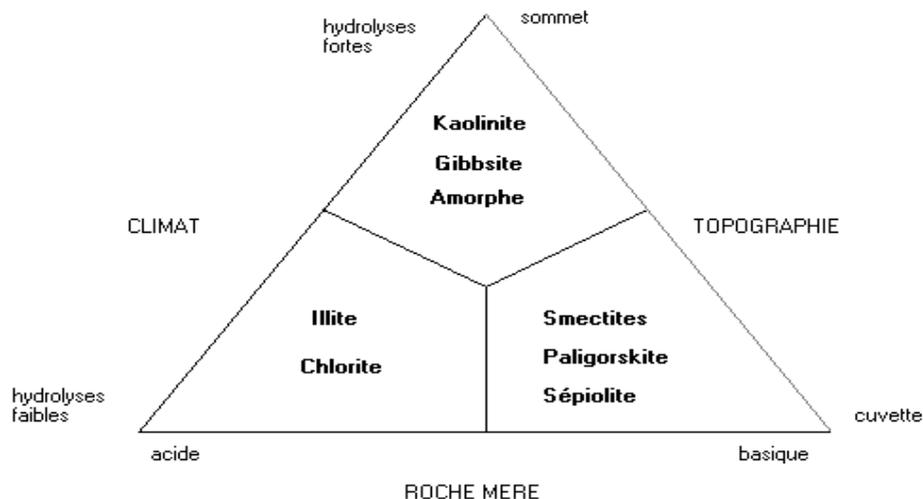


Figure II.3 - Les différents types de phyllosilicates formés au cours de l'altération [32].

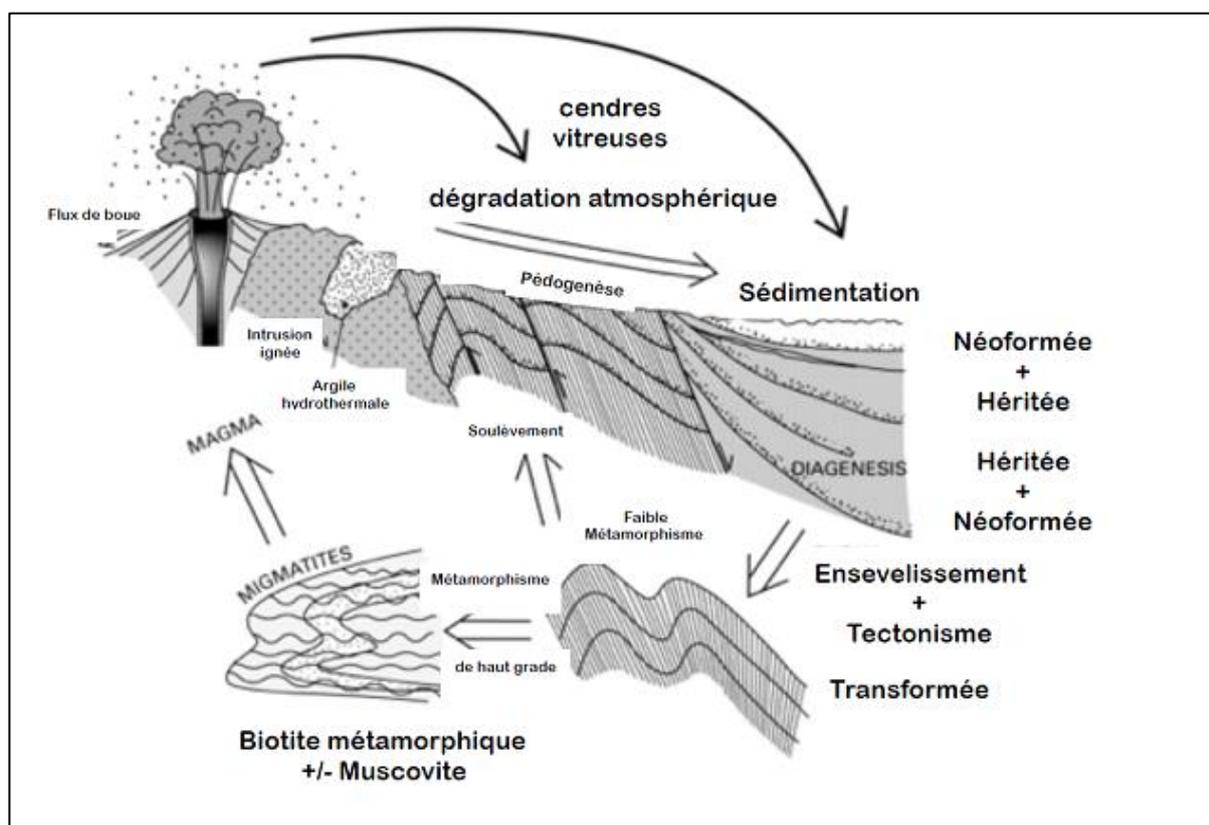


Figure II.2 - Processus de formation des argiles.

### II.2.2 Structure et composition minéralogique des argiles

Les minéraux argileux sont constitués d'un empilement de feuillets (layer) de structure bien définie, séparés par des intervalles désignés sous le nom d'espace interfoliaire (inter layers). Chaque feuillet se présente comme une superposition de plans ioniques organisés

suivants deux types précis de couches : le type tétraédrique (T) et le type octaédrique (O), L'association d'un feuillet et d'un espace inter foliaire représente l'unité structurale du minéral phylliteux. Ces couches sont principalement constituées de quatre ions  $Si^{4+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $O^{2-}$ ,  $OH^{-}$  Selon les types d'argiles en peut trouver aussi d'autres ions telle que  $Fe^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ .

- La couche tétraédrique présentée (Figure II.4) à base de tétraèdres composés de quatre ions d'oxygène ( $O^{2-}$ ) sur les sommets qui entourent un cation de silicium ( $Si^{4+}$ ).

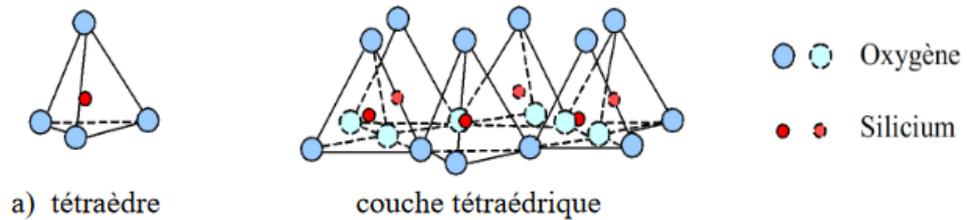


Figure II.4 -Couche tétraédrique (T) : tous les tétraèdres pointent dans le même sens [36].

- La couche octaédrique présentée (Figure II.5) à base d'octaèdres avec sur les sommets des groupements hydroxyles  $HO^{-}$  et au centre soit un ion d'aluminium  $Al^{3+}$  (on parle ici de gibbsite  $Al(OH)_3$ ) ou un ion de magnésium  $Mg^{2+}$  (on parle alors de brucite  $Mg(OH)_2$ ).

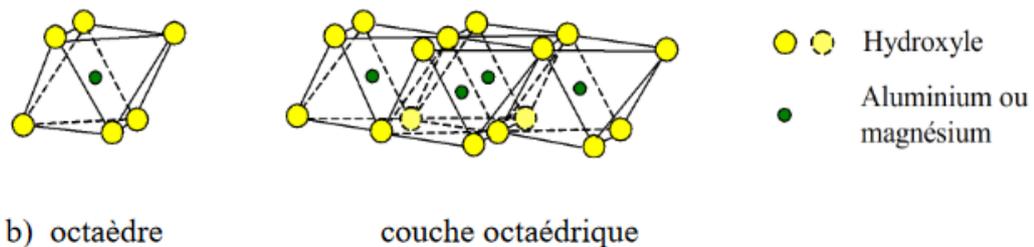


Figure II.5 - Couche octaédrique (O) composée d'octaèdres de gibbsite  $Al(OH)_3$  ou de brucite  $Mg(OH)_2$  [36].

### II.2.3 Classification des minéraux argileux

On distingue parmi les minéraux argileux trois grands types (**T-O**, **T-O-T**, **T-O-T-O**), leur distinction a été établie en fonction de la composition chimique, de l'épaisseur des feuillets, de la grandeur de l'espace interfoliaire et de la valeur de la capacité d'échange de cations C.E.C.

- Le **type T-O** : formé d'une couche octaédrique et d'une couche tétraédrique. Ce type est représenté par les kaolinites et les serpentines.

- Le **type T-O-T** : formé d'une couche octaédrique entre deux couches tétraédriques. Ce type est entre autres représenté par les illites, smectites.
- Le **type T-O-T-O** : ce type est caractérisé par un feuillet constitué, en plus des trois couches de la série (T-O-T), par une quatrième couche octaédrique qui s'insère dans l'espace interfoliaire comme dans le cas des chlorites.

Selon le type du feuillet élémentaire et la taille de l'unité structurale nommée distance basale et mesurée en angström ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ) et suivant la réactivité avec leur environnement et surtout vis-à-vis de l'eau les argiles sont identifiées en quatre grandes familles :

- 1) Les Kaolinites : minéraux à 7 Å de feuillet élémentaire **T-O** constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique.
- 2) Les Illites : minéraux à 10 Å de feuillet élémentaire **T-O-T** constitué d'une couche octaédrique assemblée à deux couches tétraédriques de part et d'autre.
- 3) Les Chlorites : minéraux à 14 Å de feuillet élémentaire **T-O-T-O** constitué une couche d'octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques et un inter feuillet constitué par une couche d'octaèdre.
- 4) Les Smectites : minéraux à 10 Å de feuillet élémentaire **T-O-T** et des ions divers ou d'une couche octaédrique O qui s'intercalent entre deux feuillets T-O-T. sa distance basale peut évoluer en fonction du type d'ions intercalés et de leur hydratation.

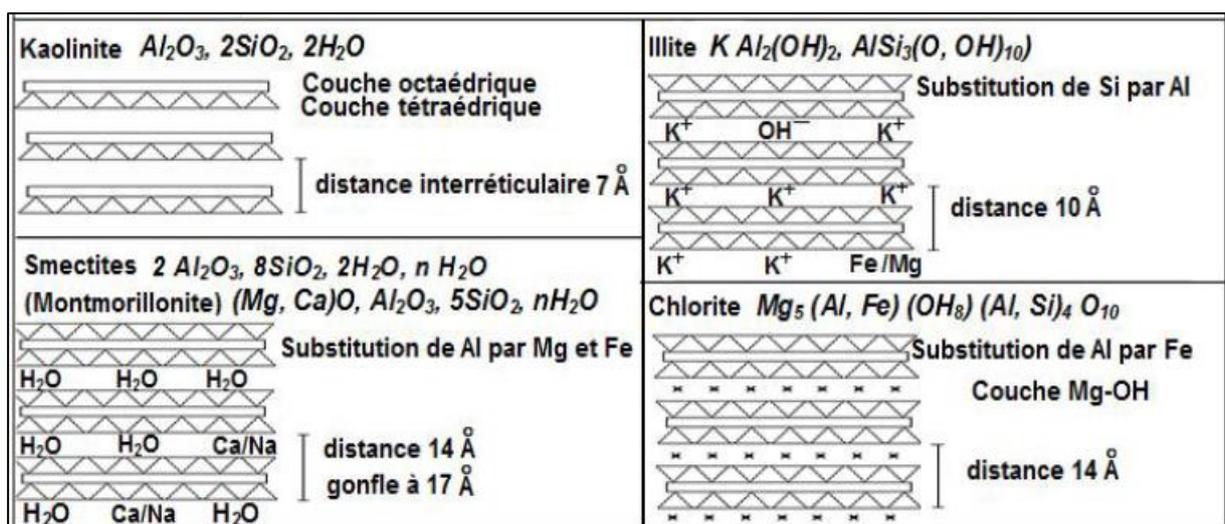


Figure II.6 - Structure des minéraux argileux (Duchaufour, 1988).

### II.2.3.1 Les kaolinites

La kaolinite est une argile à 7 Å, de feuillet élémentaire T-O. Ses feuillets adhèrent entre eux par des liaisons d'hydrogène qui s'établissent entre le proton qui est à la surface du groupement hydroxyle (OH-) de la couche octaédrique et les atomes d'oxygène de la couche tétraédrique du feuillet suivant. Cette liaison par l'hydrogène est assez rigide et rapproche les feuillets les uns des autres. Ceci donne un caractère plus ou moins stable à la kaolinite connue pour étant une argile non gonflante en présence de l'eau. La (Figure II.7) suivante présente une image MEB d'une argile de type kaolinite.

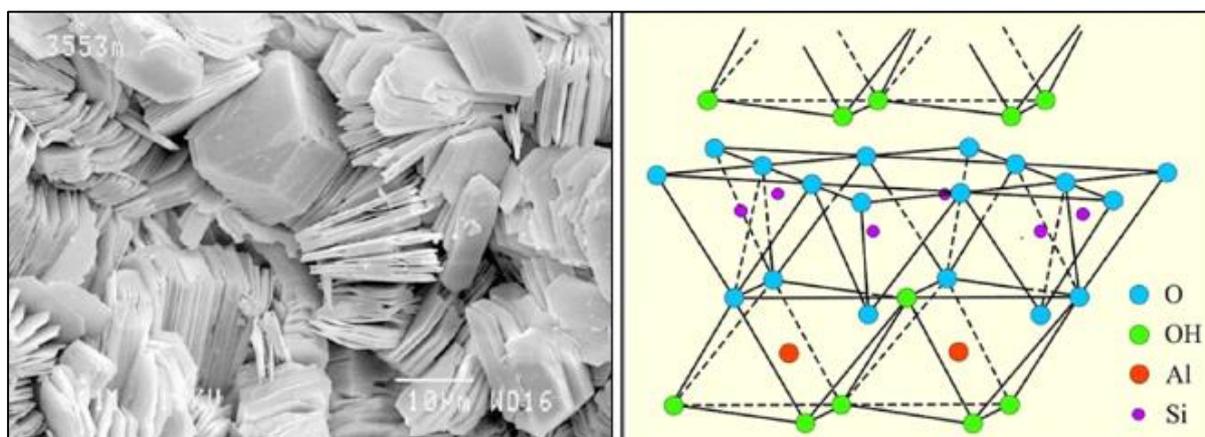


Figure II.7 - Structure de la kaolinite [35] (à droite), image MEB d'une kaolinite [30] (à gauche).

### II.2.3.2 Les illites

L'illite ou mica, est une argile à 10 Å, de feuillet élémentaire T-O-T enfermant un cation de potassium  $K^+$  dans son espace interfoliaire. Les feuillets adhèrent les uns aux autres par l'intervention des forces de Van der Waals. La présence du cation  $K^+$  compense le déficit de charge présent à la surface des feuillets, ainsi il contribue à rigidifier l'ensemble. Le potassium a le même diamètre que l'espace interfoliaire, par conséquent les molécules d'eau ne parviennent pas à s'engager entre les feuillets, d'où la faible capacité de gonflement de l'illite.

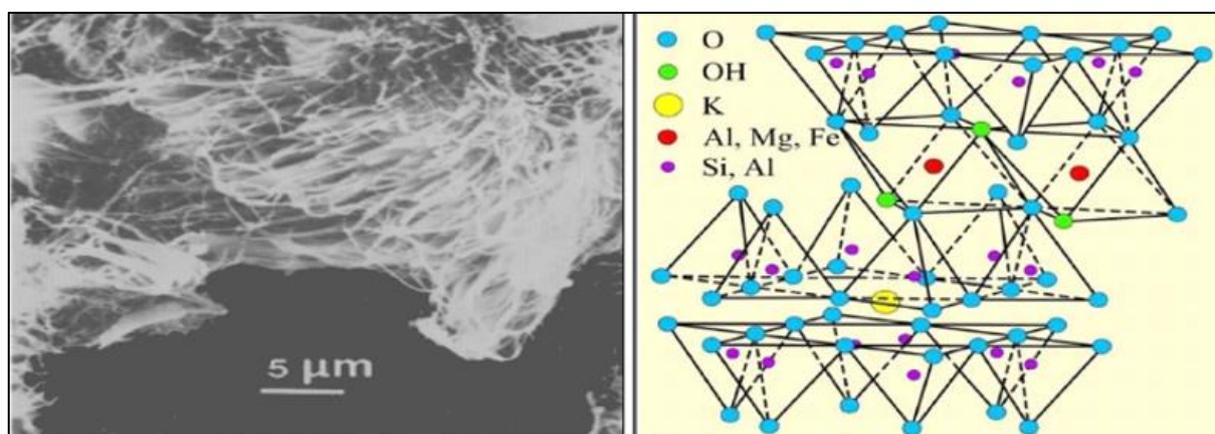


Figure II.8 - Structure de l'illite [75] (à droite), image MEB d'une illite [76] (à gauche).

### II.2.3.3 Smectites

Les smectites, comme la montmorillonite par exemple (Figure II.9), sont des argiles à 10 Å, de feuillet élémentaire T-O-T. La distance basale peut augmenter en fonction de l'hydratation du feuillet. Cette propriété est due au déficit de charge non compensé par des cations. La compensation électrique est assurée par l'insertion de cation plus au moins hydratés dans l'espace interfoliaire ( $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ). L'une des conséquences est que ce type d'argile peut accueillir des molécules d'eau dans l'espace interfoliaire et constituer ce qu'on appelle une argile gonflante.

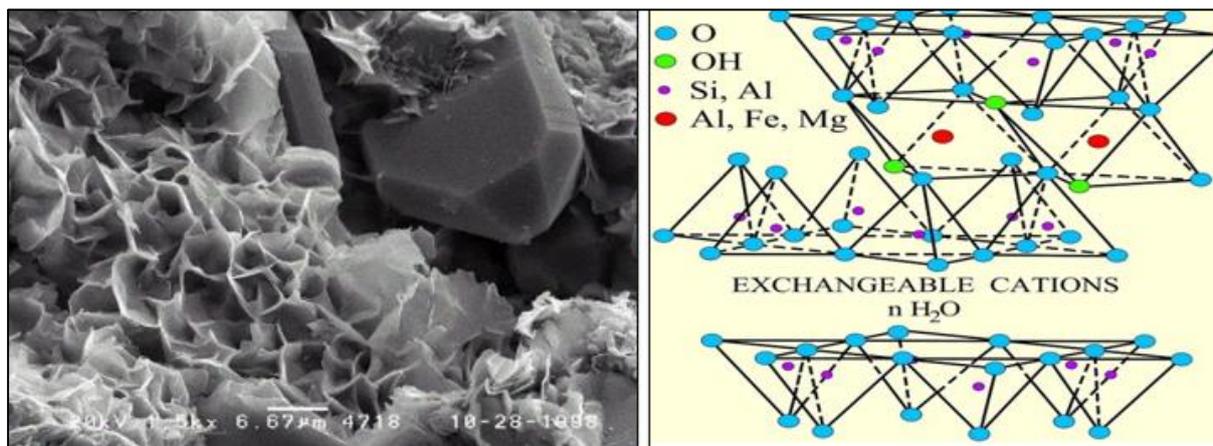


Figure II.9 - Structure d'une montmorillonite [32] (à droite), image MEB d'une montmorillonite [30] (à gauche).

### II.2.3.4 Les chlorites

Les chlorites sont des argiles à 14 Å de feuillet constitué par l'alternance de feuillets élémentaire T-O-T et de couches octaédriques inter foliaire O. Les chlorites existent en plus grands cristaux dans les roches magmatiques. Elles sont également formées pendant la diagenèse des roches sédimentaires.

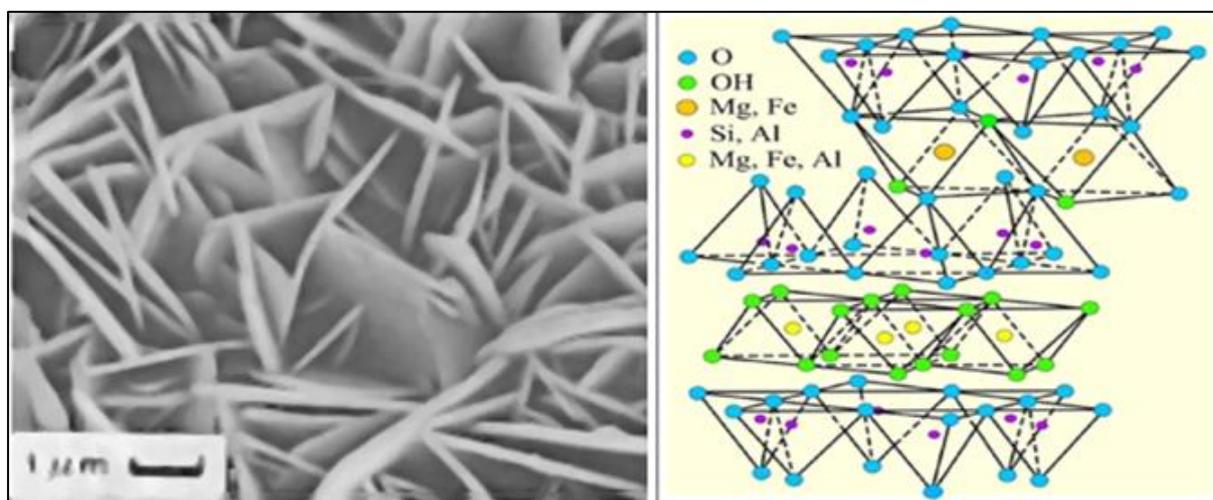


Figure II.10 - Structure d'un chlorite [32] (à droite), image MEB d'un chlorite (à gauche).

### II.2.3.5 D'autre type d'argiles

Il existe un autre groupe d'argiles dites fibreuses, ce sont des pseudo-feuillés (faciès fibreux), le pseudo-feuillet est constitué de plans continus d'oxygène. Dans ces plans, les oxygènes sont au sommet d'un hexagone plus ou moins régulier. Entre deux plans continus d'oxygène, on trouve deux plans discontinus formés d'oxygène et d'hydroxyle. L'empilement des deux plans discontinus forme des octaèdres enchevêtrés créant ainsi un ruban. Cette rupture donne naissance à des lacunes qui forment des canaux structuraux entre des rubans. La largeur de ces rubans est caractéristique de chaque famille. Les oxygènes du plan continu forment la base de tétraèdre dont la pointe est constituée par un oxygène du ruban. Ces tétraèdres sont occupés en leur centre par des ions  $\text{Si}^{4+}$ . Les ions  $\text{Mg}^{2+}$  ou  $\text{Al}^{3+}$  occupent les lacunes octaédriques. Les rubans se terminent par des liaisons entre ces cations et des molécules d'eau. On distingue deux principales familles :

- **La famille des palygorskites :** (appelée aussi attapulgite) où l'empilement des deux plans discontinus fait apparaître un ruban à cinq octaèdres. Les particules ont la forme d'aiguilles rigides.
- **La famille des sépiolites :** où l'empilement des deux plans discontinus fait apparaître un ruban à huit octaèdres. Les particules ont la forme de fibres flexibles.

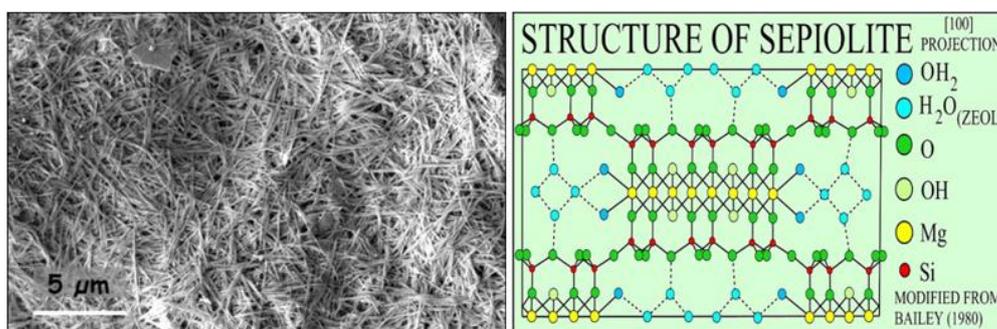


Figure II.11 - Structure d'une sépiolite selon BAILEY 1980 (à droite), image MEB de sépiolites.

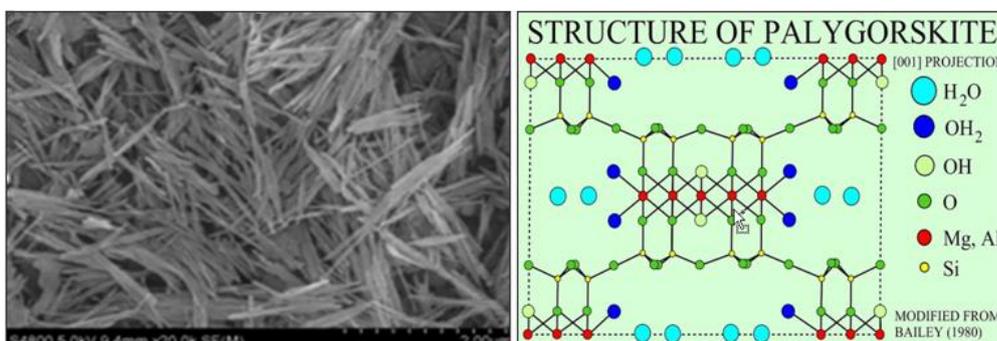


Figure II.12 - Structure d'une palygorskites selon BAILEY 1980 (à droite), image MEB d'Attapulgites (à gauche).

Tableau II.1 - Résumé des propriétés des différents types d'argiles.

Nom	Structure	Feuillets	Espace Inter-foliaire
Kaolinite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	2 couches <b>T-O</b>	Vide
Illite	$(k, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2(H_2O)]$	3 couches <b>T-O-T</b>	Compensation des charges : ions $K^+$
Chlorite	$Mg_5(Fe, Ca)(OH)_8(Al, Si)_4O_{10}$	4 couches <b>T-O-T-O</b>	Une couche octaédrique O
Smectite (Ex : Montmorillonite)	$(Na, Ca)_{0.3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2.nH_2O$	3 couches <b>T-O-T</b>	Compensation des charges : Ions $K^+$ et $Na^+$ Capacité à fixer l'eau

## II.3 Propriétés physico-chimiques des argiles

### II.3.1 La Plasticité

La plasticité définit la propriété de l'argile à subir des déformations sans réaction élastique notable caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation. La plasticité d'une argile ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg (limite de liquidité  $L_L$ , limite de plasticité  $L_P$ , l'indice de plasticité  $I_P$ ).

- Limite liquide ( $L_L$ ) : de l'état liquide à l'état plastique, l'argile commence à manifester une résistance au cisaillement,
- Limite plastique ( $L_P$ ) : passage de l'état plastique à un état solide, la terre devient friable.

L'indice de plasticité,  $L_L \leq I_P \leq L_P$  détermine le domaine de comportement plastique de l'argile. La combinaison de ( $L_L$ ) et ( $L_P$ ) définit la sensibilité de l'argile aux variations d'humidité. Les propriétés plastiques d'une argile peuvent être représentées sur ce diagramme :

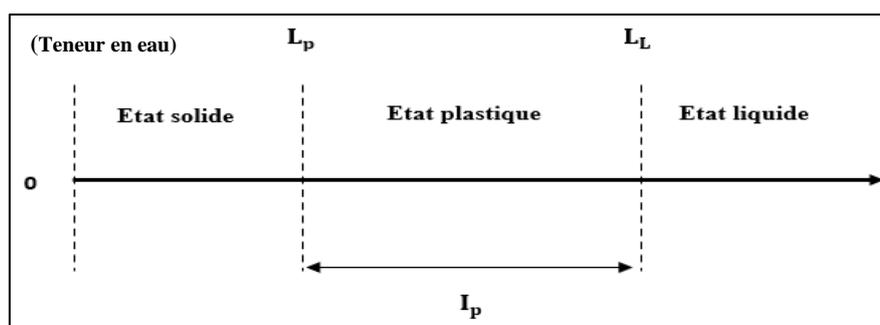


Figure II.13 - Représentation des limites d'Atterberg.

### II.3.2 La compressibilité

La compressibilité d'une terre définit son aptitude à se laisser comprimer au maximum pour une énergie de compactage et un taux d'humidité donné (teneur en eau optimale ou TEO). Lorsqu'une force est appliquée à un volume de terre, le matériau est comprimé et la proportion de vides diminue. Plus la densité d'un sol peut être augmentée, plus sa porosité diminue, ainsi il est difficile pour l'eau de pénétrer. Cette propriété résulte du réarrangement des particules qui réduit le risque de modification de la structure en présence d'eau. La teneur en eau doit être suffisamment élevée pour lubrifier les particules et leur permettre de se déplacer de manière à occuper le moins d'espace possible. En même temps, la teneur en eau ne doit pas être trop élevée, car si les vides sont pleins d'eau, le matériau devient incompressible. L'essai Proctor, qui est celui le plus largement utilisé pour évaluer l'aptitude d'un sol à être compacté[33].

### II.3.3 Forme et surface spécifique

La surface spécifique (SS) détermine en grande partie de nombreuses propriétés physiques et chimiques des matériaux. Elle est définie comme étant le rapport de la surface totale d'une particule à sa masse ( $m^2/g$ )[34]. Cette dernière comprend la surface externe, comprise entre les particules argileuses, et la surface interne, correspondant à l'espace interfoliaire.

En effet la fine taille des argiles leur confère une surface spécifique importante par rapport au volume des particules de ce fait elles peuvent attirer un grand nombre de molécules d'eau et d'ions, et exercer entre elles d'importantes forces d'interactions. Ces forces influent amplement sur le comportement mécanique des argiles. L'intensité de la charge électrique est liée à la surface spécifique de la particule. Dans le cas des argiles, cette surface varie entre 10 à 20  $m^2/g$  et peut atteindre 800  $m^2/g$  pour la montmorillonite sodique  $Na^+$  [35]. Warkentin et Bozozuk (1961) in[36], ont noté que le gonflement est d'autant plus fort que la surface spécifique de l'argile est grande. Le (tableau II.2) suivant donne les valeurs des surfaces externes, des surfaces internes et des surfaces totales de quelques minéraux.

Tableau II.2 - Surface spécifique des particules argileuses en  $m^2/g$  [37].

<i>Argile</i>	<i>Smectite</i>	<i>Illite</i>	<i>Kaolinite</i>	<i>Chlorite</i>
<i>Surface interne</i>	750	5	0	0
<i>Surface externe</i>	50	25	15	15
<i>Surface totale</i>	800	30	15	15

Les argiles se présentent sous trois formes[36] (Figure II.15).

- En flocons, caractérisés par une même dimension dans les deux directions et une épaisseur équivalente à 1/20ième de la longueur.
- En latte, avec une dimension plus longue, épaisseur toujours équivalente à 1/20ième de la longueur.
- En aiguilles, deux dimensions identiques et la 3e beaucoup plus grandes (assez rare).

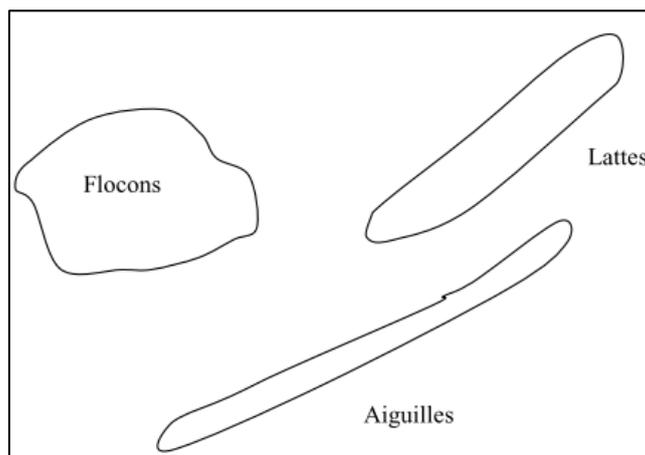


Figure II.14- Forme des particules argileuses

### II.3.4 Degré d'hydratation et gonflement

Les minéraux argileux présentent une grande affinité pour l'eau qui s'exprime d'une part par la quantité d'eau susceptible d'être retenue par une argile et, d'autre part, l'énergie avec laquelle cette eau est liée. Ce phénomène d'ordre capillaire est naturellement très important pour l'ensemble des matériaux argileux en raison de leur granulométrie excessivement fine. La présence de charges à la surface des feuillets est un paramètre supplémentaire qui contribue à accentuer les interactions argile-eau.

Le mécanisme d'hydratation repose essentiellement sur la pénétration des eaux dans les espaces inter foliaires ce qui donne la propriété de gonflement et l'augmentation du volume des argiles. Et cela est possible que parce que l'énergétique de cohésion (EC) inter foliaire est plus faible que l'énergie d'attraction des molécules d'eau (la somme des interactions eau-cations, eau-eau et eau-feuillets) ce que permet aux molécules de pénétrer entre les feuillets.

Par exemple dans le cas d'une montmorillonite sodique gonflement est causé par la différence de concentration entre la solution interne ( $Na^+$  dans l'espace interfeuillet) et celle externe, avec une concentration inférieure en  $Na^+$  en raison de la fixation électrostatique de

$Na^+$ , cette différence ne peut être compensée que par une quantité supplémentaire d'eau entrant dans l'espace inter foliaire.

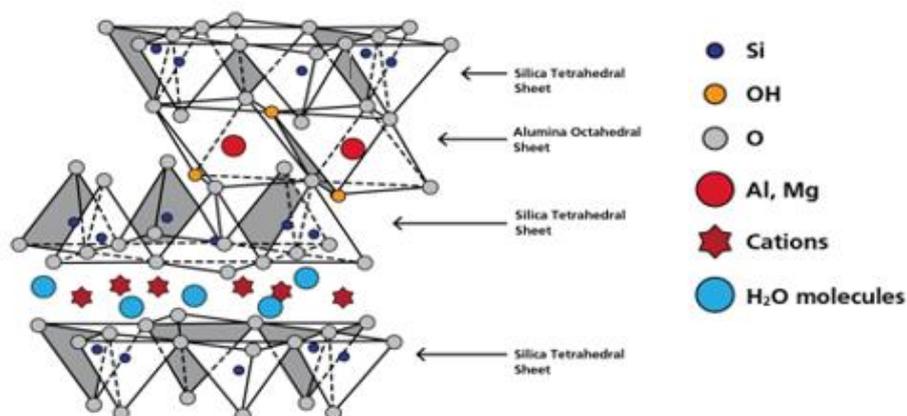


Figure II.15- Représentation schématique de la couche inter foliaire Dans le cas de cations hydratés

Tableau II.3 - Relation entre les cations et le gonflement [2].

Cations	Ordre de gonflement
<b>Monovalents</b>	$Na^+ > K^+ > NH^+ > H^+$
<b>Bivalents</b>	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Sr^{2+} > Ba^{2+}$
<b>Trivalents</b>	$Al^{3+} > Cr^{3+} > Fe^{3+}$

### II.3.5 La capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) qui exprime la capacité d'une argile à échanger des cations. Elle est exprimée en milliéquivalent par 100 grammes d'argile et représente la charge (sous forme de cations attirés à la surface de la particule). Cette aptitude des argiles à libérer leurs cations dépend de la valence et la masse atomique du cation présent dans la solution, selon l'ordre croissant suivant :  $Li^+ < Na^+ < K^+ < H^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < Al^{3+}$ , d'après (Gupta et al 1967, cité par Gueddouda, 2005).

Tableau II.4 - Capacité d'échange de cations (C.E.C) et surface spécifique totale (Sst) de quelques argiles [33].

Argiles	C.E.C (meq/100 gr)	Sst (m <sup>2</sup> /g)
<b>Montmorillonite <math>Na^+</math></b>	150	800
<b>Montmorillonite <math>Ca^{2+}</math></b>	80	300
<b>Illite</b>	10-40	40-60
<b>Kaolinite</b>	3-15	5-20
<b>Chlorite</b>	10-40	15
<b>Élément non argileux</b>	-	1-3

## II.4 Influence de la composition minéralogique sur les argiles

La composition minéralogique joue un rôle important pour la détermination du comportement et les propriétés des argiles, l'influence des différentes compositions minéralogiques des quatre principales argiles sur la plasticité, la difficulté au séchage ainsi que le gonflement sont résumées dans le (Tableau II.5).

Tableau II.5 - L'influence de la composition minéralogique sur les propriétés des argiles [36].

Minéral	Plasticité, cohésion, susceptibilité aux feuilletages	Difficulté de séchage	Gonflement
<b>Kaolinite</b>	Augmente la plasticité	Difficulté limitée	Stable (argile non gonflante)
<b>Chlorite</b>	Possède une bonne plasticité	Difficulté limitée	Deux groupes : chlorites vraies (non gonflantes), et chlorites gonflants.
<b>Illite</b>	Possède une bonne plasticité	Difficulté moyenne Grande difficulté	Pas ou moyennement gonflante
<b>Smectite Montmorillonite</b>	Possède une très grande plasticité et grande cohésion	Retrait important et rétention capillaire	Très gonflante (forte variation selon la nature des ions échangeables)

## II.5 Forces existantes entre les particules argileuses

Les liaisons structurales dans les argiles se forment sous l'influence de toute une série de processus chimiques, physico-chimiques et physiques entraînant un certain nombre d'interactions complexes de nature diverse se développant aux contacts des particules d'argile[38]. Celles-ci sont des forces de diverses natures :

### II.5.1 Forces chimiques

Les forces de nature chimique sont formées en raison des valences chimiques primaires et ont un caractère similaire à celles agissant à l'intérieur des minéraux. Les forces chimiques (valences) ont un champ d'action court : elles se manifestent à de petites distances (de l'ordre de 0,5 à 3,5 Å) entre les particules. Il leur est donc possible de voir le jour lorsque les particules sont en contact direct les unes avec les autres et « se croisent » dans le processus de consolidation de l'argile.

Les liaisons de nature chimique possèdent une grande énergie atteignant 200 à 300 kcal par mole. La force des contacts formés par eux peut varier de 10<sup>-4</sup> dynes (pour une surface de contact égale à une cellule atomique) à 100 et plus de dynes (dans le cas des contacts en phase

développée). Dans ce dernier cas, la force de contact peut être proportionnelle à la force des cristaux dans les minéraux eux-mêmes.

### **II.5.2 Les forces ion-électrostatique**

Les forces électrostatiques ioniques font partie de celles dont le rayon d'action est moyen. Ils se manifestent lorsque la teneur en eau des argiles est proche de celle de la limite plastique du sol ( $Wp$ ), c'est-à-dire lorsque les distances entre les particules sont légèrement supérieures à 100 Å. lorsque les argiles se déshydratent, la magnitude des forces électrostatiques ioniques augmente rapidement atteignant sa valeur maximale à des distances entre particules de l'ordre de plusieurs Å.

L'énergie des liaisons ion-statiques dans les argiles peut être radicalement affectée par la composition et la concentration de la solution interstitielle [38]. En effet avec la croissance de la concentration de la solution interstitielle, la force des échantillons diminue en raison de la baisse du potentiel électrocinétique des particules et de la diminution du nombre de liaisons ion statique.

### **II.5.3 La capillarité (forces capillaires)**

La capillarité est le phénomène d'interaction qui se produit aux interfaces entre deux liquides non miscibles, entre un liquide et l'air ou entre un liquide et une surface. Elle est due aux forces de tension superficielle entre les différentes phases en présence. Elle est mise en œuvre lorsque les éponges s'imbibent d'eau, ou quand on trempe une partie de son morceau de sucre dans son café et que ce sucre devient tout noir.

Les forces capillaires dans les argiles peuvent être assez élevées et dépendent de nombreux facteurs : teneur en eau, porosité, taille et forme des particules, tension superficielle du liquide, mouillabilité des minéraux, etc. les valeurs les plus élevées des forces capillaires correspondant approximativement à la teneur maximale en eau moléculaire des argiles [15], [16].

### **II.5.4 Les forces de Van der Waals**

Les forces d'attraction moléculaires ou de Van der Waals sont celles qui agissent entre les particules ces forces d'attraction résultent des fluctuations thermodynamiques du champ électromagnétique à l'intérieur et autour des particules. Elles sont liées aux interactions entre dipôles fluctuants. Leur porte est relativement grande ( $\approx 10 \text{ nm}$ ). L'existence de forces d'attraction est le résultat de trois efforts :

- Interactions entre molécules à dipôles rigides (effet d'orientation).
- Interaction entre des molécules à dipôle constant et induit (effet d'induction).
- Interaction entre molécules non polaires (effet de dispersion).

### **II.5.5 Les forces électrostatiques de (Coulomb)**

Les forces électrostatiques (Coulomb) d'interaction entre les particules de sol argileux peuvent résulter de la formation de charges de surface opposées sur les faces et les bords des minéraux argileux lorsqu'ils existent dans certaines conditions ambiantes. Il a été établi (Van Olphen, 1951 ; Scho - Field et Samson, 1954 ; Osipov et Sergeev, 1972) cité in [38] que, dans les milieux acides et alcalins, les arêtes minérales d'argile peuvent carrément être positives et faire face à la charge de surface négative. Pour cette raison, lorsque les particules se rapprochent, des forces électrostatiques (Coulomb) peuvent surgir entre elles avec la formation d'un contact de type face à bord.

### **II.6 La stabilisation des argiles**

La stabilisation des sols regroupe l'ensemble des techniques permettant d'améliorer les caractéristiques physicochimiques, mécaniques et hydriques des sols. Elle doit permettre :

- La réduction de la porosité la diminution du retrait et gonflement.
- L'obtention d'une meilleure cohésion l'amélioration de la résistance à l'érosion et l'imperméabilisation de surface ;
- L'obtention de meilleures résistances à la compression sèche et humide, à la traction et au cisaillement.

On distingue trois principales techniques de stabilisation (stabilisation mécanique, physique et chimique).

#### **II.6.1 Stabilisation mécanique**

La stabilisation mécanique est pratiquée lorsqu'on procède à la densification d'un sol par compactage. Elle a pour effet la diminution de la porosité de la terre par réarrangement des grains et évacuation de l'air contenu dans les vides laissés entre les grains. Le compactage permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques élevées, cependant ces matériaux restent très sensibles à l'eau. Mis au contact avec l'eau, les matériaux redeviennent plastiques et ne résistent plus du tout à la compression. C'est pourquoi le compactage est un moyen de stabilisation généralement associé à d'autres méthodes telles que la stabilisation chimique. Il

est le plus souvent influencé par trois caractéristiques : le mode, l'énergie et la granularité de la terre.

### **II.6.2 Stabilisation physique**

La stabilisation physique consiste à agir sur la texture du matériau en vue de modifier ses propriétés. Parmi celles-ci on distingue deux manières de procéder à une stabilisation physique :

- Modification des propriétés des sols pour une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Dans ce cas on intervient directement sur la granularité du sol, le mélange obtenu conduit selon le cas, à la diminution de la plasticité du matériau de base par l'ajout de sable, ou à lui donner une certaine cohésion par l'ajout des fines.
- Ajout de fibres végétales à des terres argileuses. Cela renforce la structure du matériau en l'empêchant de se fissurer au moment du retrait de l'argile lors du séchage.

### **II.6.3 Stabilisation chimique**

La stabilisation chimique modifie les caractéristiques de la terre à l'aide de certains ajouts. Afin d'augmenter les caractéristiques mécaniques et de diminuer la sensibilité à l'eau, on a souvent recours à l'adjonction de liants hydrauliques (ciment, chaux et bitume) ou de produits chimiques, rendant les argiles traitées moins hydrophiles. De nombreux stabilisants chimiques existent et apportent diverses améliorations à la terre selon leur propriété.

---

## Conclusion

L'argiles et un minérale colloïde qui appartient à la fraction du sol dont les grains sont de diamètre  $< 2\mu\text{m}$ , produits lors de la dégradation des roches mères (feldspaths notamment).

La structure cristalline de l'argile est composée d'une superposition de feuillets eux-mêmes formés de deux ou trois couches cristallisées superposées de tétraèdres (**T**) et d'octaèdres (**O**). Ces couches s'organisent en trois types **type 1(T-O)** représenté par les kaolinites, serpentines, et le deuxième **type2 (T-O-T)** est représenté par les illites et les smectites, et enfin le **type 3 (T-O-T-O)** dans le cas des chlorites.

La plasticité de l'argile et sa capacité liante est principalement due à une grande surface spécifique qui est à l'origine de la réactivité de celle-ci. En effet une grande surface spécifique permet l'apparition de phénomène de capillarité, tension de surfaces et d'échange de cation ce qui permet d'emprisonner l'eau sous forme d'eau adsorbée ou entre feuillets et donc par ce fait augmente la plasticité de l'argile ce qui peut causer des gonflements et le retrait au séchage.

Pour remédier à ces problèmes l'argile est souvent stabilisée mécaniquement grâce à une énergie de compactage, physiquement avec des ajouts de granulats ou de fibres pour corriger la granularité ou encore chimiquement avec l'adjonction de liants hydrauliques (ciment, chaux et bitume).

## Chapitre III :

Généralités sur les briques en terre crue de construction

---

## Chapitre III : Généralités sur les briques en terre crue de construction

### III.1 Introduction

Aujourd'hui le secteur de la construction est l'un des plus polluants et plus gourmand en matière première dans le monde. Selon les projections de l'OCDE[40] d'ici à 2030 la population mondiale va augmenter et passer de 7 à 8 milliards d'êtres humains, et avec elle le besoin en termes d'habitats et en infrastructures va augmenter aussi. Ce qui conduit à une demande en matière première de plus en plus importante et à une production de volumes considérable de déchets.

Effectivement du point de vue environnemental, cette industrie représente 30 % des émissions de dioxyde de carbone, la production de ciment à elle seule représente 5 % des émissions totales [41] ; en outre, l'industrie mondiale de la construction consomme plus de matières premières (environ 3000 Mt/an, presque 50 % en poids) que toute autre activité économique, selon Bossink et Brouwers [42], les déchets de construction et de démolition représentent entre 13 et 30 % de toutes les décharges dans le monde, les déchets de démolition représentant environ le double des déchets de construction ces déchets ne sont généralement pas recyclés et sont éliminés dans des décharges, ce qui entraîne la perte de terres, la pollution l'inconfort des populations. Depuis l'extraction des matières premières jusqu'à leurs fins de vies la consommation d'énergie des bâtiments peut attendre 40 % de la demande énergétique totale d'un pays industrialisé[43].

En conséquence, un nouvel intérêt et portée pour des méthodes de construction alternatives et plus durables qui utilisent des matériaux naturels, locaux et économes en énergie. Parmi ces matériaux, la terre crue est l'une des options les plus attrayantes, car elle est inoffensive pour l'homme et peut être d'origine locale. La terre est également recyclable, inépuisable et, lorsqu'elle est correctement fabriquée, présente une résistance élevée, d'excellentes propriétés hygrothermiques à peu de frais. Les matériaux en terre ont donc le potentiel de réduire l'exploitation des ressources naturelles non seulement pendant la construction, mais aussi pendant l'exploitation et en fin de vie, des bâtiments en réduisant la climatisation et les déchets de démolition non recyclables.

## III.2 Historique de l'emploi de la terre crue dans la construction

### III.2.1 Le Passé

Depuis les temps anciens et depuis le début de la civilisation, les hommes ont utilisé la terre pour construire leurs maisons, monuments, temples, etc. Sur la base des fouilles archéologiques (en Asie du Sud-Ouest), la première utilisation de la terre remonterait à 10 000 avant J.-C. [1].

Il existe plusieurs vestiges archéologiques et bâtisses anciennes classés au patrimoine mondial de l'humanité UNESCO[44], qui témoignent de l'utilisation de la terre crue pour la construction chez plusieurs civilisations anciennes dans le monde entier, en Chine, en Afrique du Nord et à l'est de la Méditerranée et y compris le Centre et une partie de l'Amérique du Sud.

Parmi les innombrables anciennes bâtisses faites de terre on trouve en Asie centrale la ville de Merv au Turkménistan et Balkh en Afghanistan construite aux environs 2000 avant J.-C, au Moyen-Orient la citadelle de Bam qui a 2500 ans en Iran et les ziggurats (édifice religieux mésopotamien à degrés 5000 avant J.-C.), en Afrique du Nord on trouve Carthage (Tunisie 814 avant J.-C.) la grande mosquée de Djenné au Mali (1200 après J.-C.), Calatayud et Alhambra en Espagne (884 après J.-C.), les ruines de Chanchan au Pérou en Amérique du Sud (900 après J.-C.), ou encore Taos Pueblo au Mexique en Amérique du Nord (1000 après J.-C.) [45], [46].

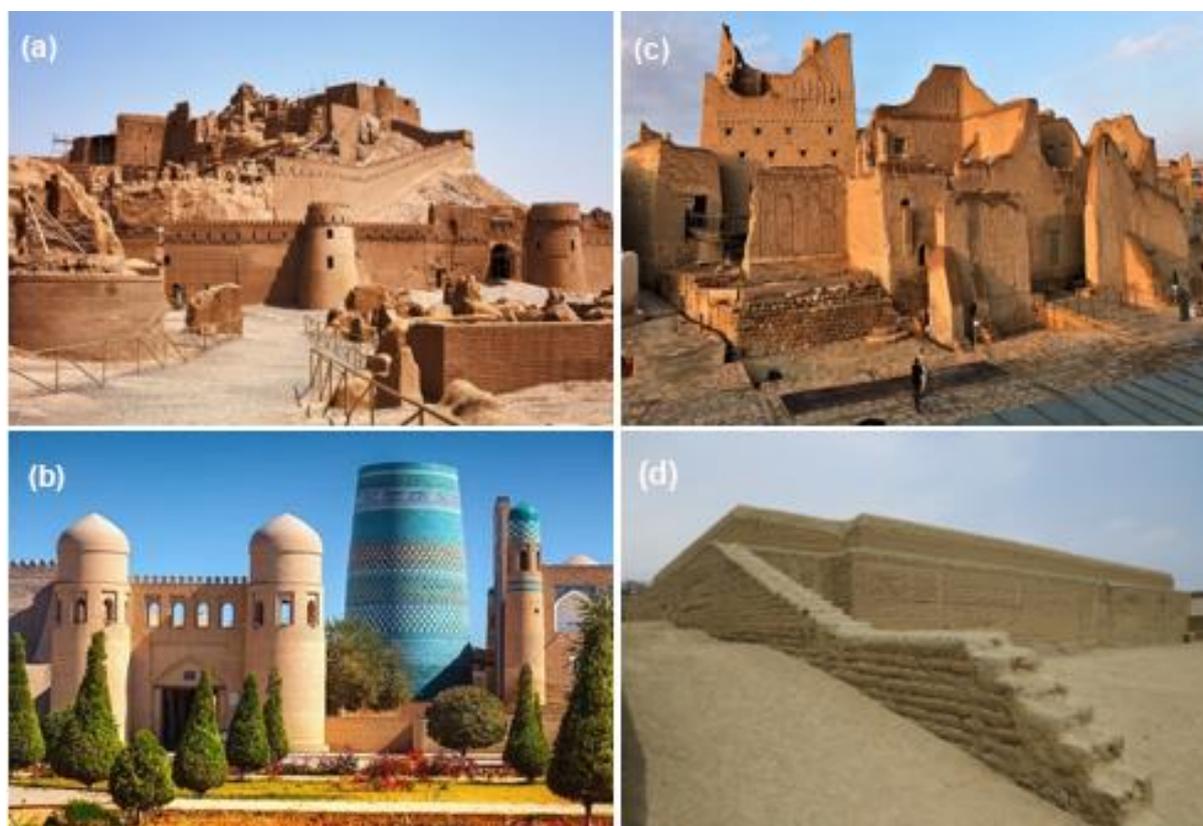


Figure III.1 - Image de quelques vestiges en terre crue classée au patrimoine mondial de l'Unesco (a) Bam en Iran, (b) Khiva en Ouzbékistan, (c) Al-Turaif en Arabie saoudite, (d) Chanchan au Pérou.

### III.2.2 Le Présent

Cet écomatériau millénaire reste de nos jours l'un des principaux matériaux de construction dans le monde. On estime que plus d'un tiers de l'habitat humain est en terre crue et que près de 50% de la population mondiale vit dans ces logements[47]. La majorité de la construction en terre est située dans les pays moins développés, cependant, ce type de construction peut également être trouvé en Allemagne, en France ou même au Royaume-Uni qui compte plus de 500 000 logements en terre. La construction en terre a également considérablement augmenté aux États-Unis, au Brésil et en Australie, en grande partie grâce au programme de construction durable qui aspirent à réduire leur émission de gaze effet de serre, dans lequel la construction en terre joue un rôle clé[48].



Figure III.2 - Construction en terre dans le monde (CRATerre).

### III.3 Avantages de la terre crue

La terre crue présente des avantages appréciés depuis la nuit des temps, grâce à la technique moderne ces avantages peuvent être quantifiés.

#### III.3.1 Réduction de l'énergie grise

Le traitement et la manipulation des matériaux en terre ne nécessitent que 1% de l'énergie essentiel pour fabriquer et traiter le même volume de béton [49]. De même, la fabrication de blocs de terre comprimés nécessite au maximum un tiers de l'énergie pour fabriquer des briques cuites conventionnelles, soit  $440 \text{ kWh} / \text{m}^3$  contre  $130 \text{ kWh} / \text{m}^3$  [50].

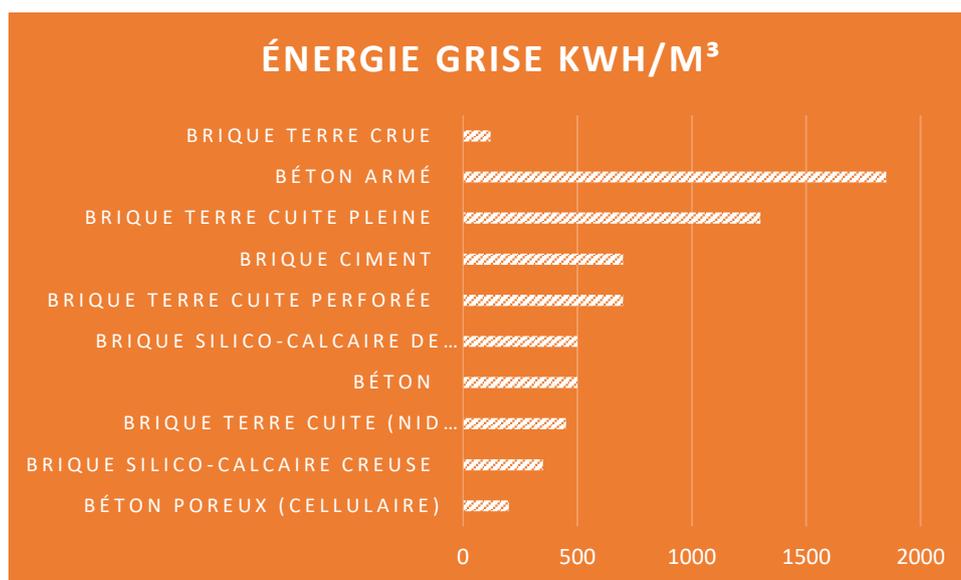


Figure III.3 - Ordres de grandeur d'énergie grise de différents matériaux de construction (écoconso, 2020).

### III.3.2 Réduction de l'énergie de fonctionnement des bâtiments

- **Régulation hygrométrique :** Les murs en terre peuvent réguler passivement les conditions hygrométriques à l'intérieur des bâtiments en absorbant et en restituant l'humidité dans l'air ambiant, et ce grâce à leur porosité [51].
- **Régulation thermique :** La terre crue présente une chaleur spécifique plus élevée de l'ordre de ( $10^3 \text{KJ}/\text{m}^3 \text{K}$ ) que les matériaux isolants standard utilisés dans la construction (de l'ordre de ( $10^1 - 10^2 \text{KJ}/\text{m}^3 \text{K}$ )) ce qui leur confère une inertie thermique qui ralentit considérablement les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur[48].

L'effet régulateur thermique est associé à la condensation/évaporation capillaire de l'eau à l'intérieur des nanopores de la terre. L'évaporation est un processus endothermique, qui prend la chaleur latente de l'atmosphère pendant les périodes chaudes tandis que la condensation est un processus exothermique qui libère de la chaleur latente pendant les périodes froides. Ce changement de phase liquide/gaz à l'intérieur des murs en terre entraîne un retrait de chaleur pendant la journée et un dégagement de chaleur pendant la nuit avec un décalage de phase de 10–12 h, contribuant ainsi à stabiliser la température intérieure et donc de réduire l'énergie nécessaire pour la climatisation artificielle[48].

### III.3.3 Recyclage ou élimination des déchets de démolition

La démolition de structures en terre produit des déchets « propres » constitués de sols naturels qui sont facilement recyclés ou éliminés.

### III.3.4 Isolation sonore

Les murs en terre présentent d'excellentes propriétés acoustiques en raison de leur densité sèche élevée et épaisseur, généralement supérieures à  $2000 \text{ kg/m}^3$  et  $0,25 \text{ m}$ , respectivement. La formule suivante représente cette relation pour un mur en maçonnerie [52] :

$$R = 21.65 \log(\rho t) - 2.3$$

$\rho$  [ $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ ] Densité sèche,  $t$  [m] l'épaisseur,  $R$  l'indice de réduction du son en [dB]

### III.3.5 La disponibilité et l'abondance

La terre crue est un matériau prélevé directement du sol et facilement préparé pour être utilisé dans la construction. Elle est généralement extraite à seulement quelques kilomètres du chantier afin de minimiser les coûts de transport. D'après J.C. Morel et al [53], la comparaison des types de construction, en termes de transport en t.km, met en évidence que le coût pour les constructions en béton est 640% plus important que pour celles en terre crue.

### III.4 Les techniques de construction en terre crue

Selon les contextes géographiques, les modes de vie, les coutumes locales, le climat ainsi que les matériaux disponibles, il existe plusieurs techniques de construction en terre qui diffèrent selon le processus de mise en forme et par la nature des ajouts utilisés. On peut distinguer parmi elle cinq techniques qui sont les plus répandues dans le monde (le pisé, l'adobe, le torchis, la bauge et le bloc de terre comprimée BTC).

Ces techniques peuvent être classées en différentes manières, par exemple celles qui nécessitent une terre sèche (8 à 15% d'humidité) et celle qui nécessitent un matériau plus humide (18 à 30% d'humidité) [54]. La première est compactable utilisée pour réaliser des composants monolithiques construits sur place et la deuxième est modulable utilise de petites unités préfabriquées pour construire le bâtiment.

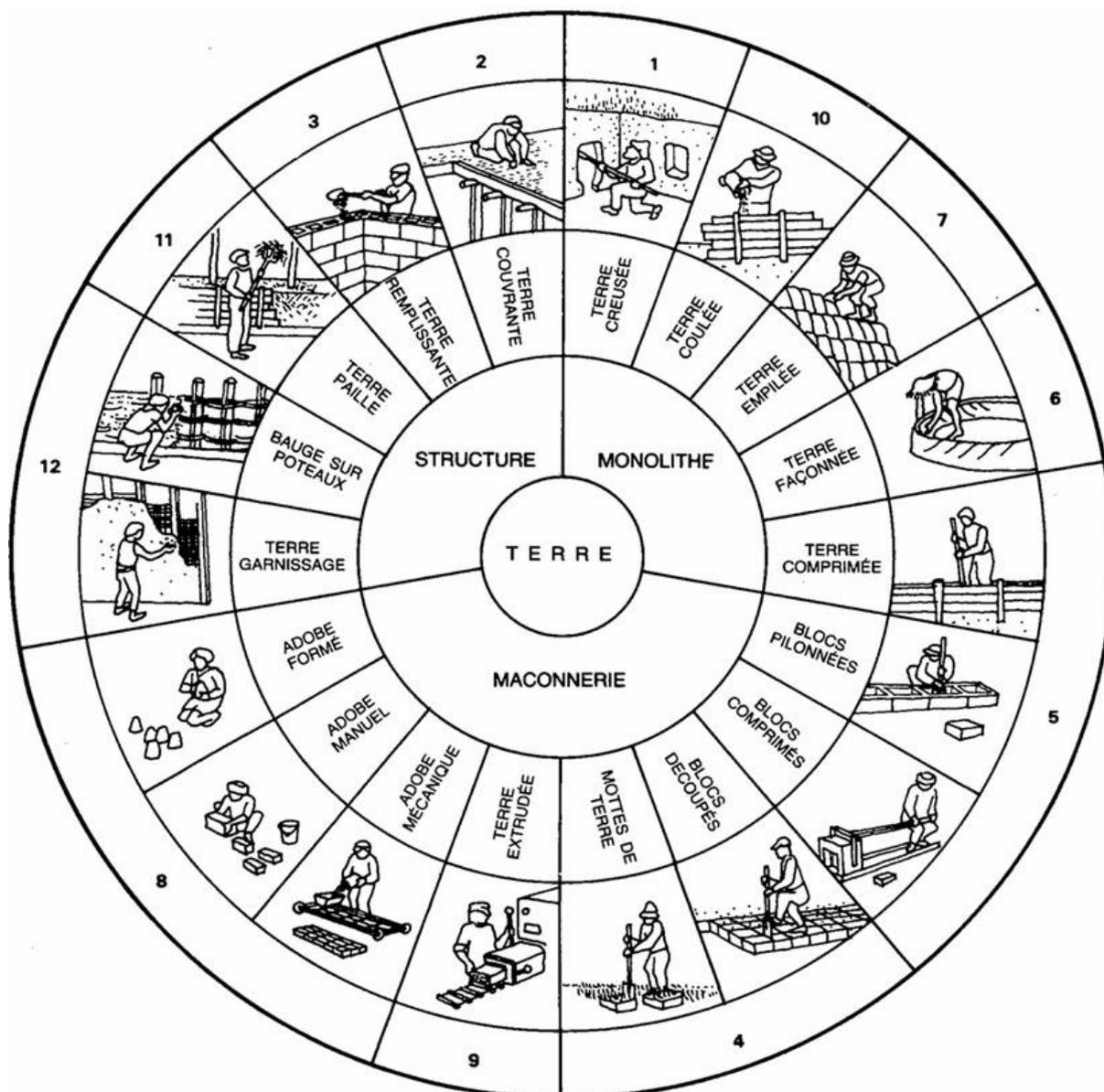


Figure III.4 - Schéma des différentes techniques de construction en terre établi par le groupe CRATERRE en 1986 [77]

Tableau III.1 - différentes techniques de construction en terre (Houben et Guillaud, 1989) [55]

Techniques	Description
<b>Terre creusée</b>	Habitat creusé dans l'épaisseur du sol
<b>Terre recouvrante</b>	Terre qui recouvre une structure construite avec un autre matériau
<b>Terre remplissante</b>	Terre qui remplit une enveloppe faite de matériaux creux
<b>Terre découpée</b>	Blocs de terre directement découpés dans le sol
<b>Terre comprimée</b>	Terre comprimée dans des moules ou des coffrages
<b>Terre façonnée</b>	Terre façonnée à l'état plastique à la main
<b>Terre empilée</b>	Boules de terre empilées en murs épais
<b>Terre moulée</b>	Terre moulée dans des moules de formes diverses
<b>Terre extrudée</b>	Terre extrudée à l'aide d'une machine
<b>Terre coulée</b>	Terre coulée dans un coffrage ou un moule
<b>Terre-paille</b>	Matériau léger constitué d'une barbotine argileuse liée aux fibres
<b>Terre garnissante</b>	Terre mélangée aux fibres qui garnit en couches minces un support

### III.4.1 L'Adobe

La technique des briques crues ou l'adobe consiste à mouler sans compactage des briques avec de la terre à l'état plastique mélangée avec des fibres naturelles ou uniquement de la terre sans ajout de fibre, puis laisser sécher au soleil. Avec les briques d'adobe on peut réaliser différentes parties d'un ouvrage. On peut construire les murs extérieurs et intérieurs ainsi que des voûtes et coupoles.

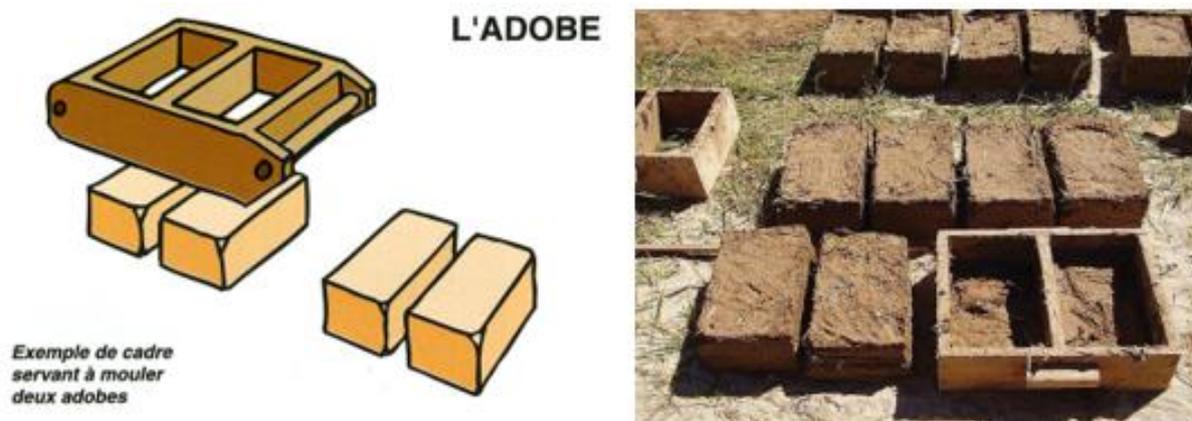


Figure III.5 - Images qui illustrent le procédé de fabrication des briques crues (Adobe).

### III.4.2 Le Torchis

Le torchis est une technique de remplissage en terre crues, il s'agit d'une structure porteuse en bois garnie de terre à l'état plastique, le plus souvent mélangée avec des fibres de paille. Mise en œuvre à l'état plastique, la terre recouvre une structure en lattis de bois fixée entre des poteaux, appelés colombes. Cette association de terre et de bois se décline aujourd'hui dans de multiples systèmes constructifs contemporains. La structure en bois est en général extrêmement légère et rapide à monter, tandis que la terre constitue un excellent matériau de garnissage, facile à poser.



Figure III.6 - Image qui illustre une maison construite avec la technique du torchis.

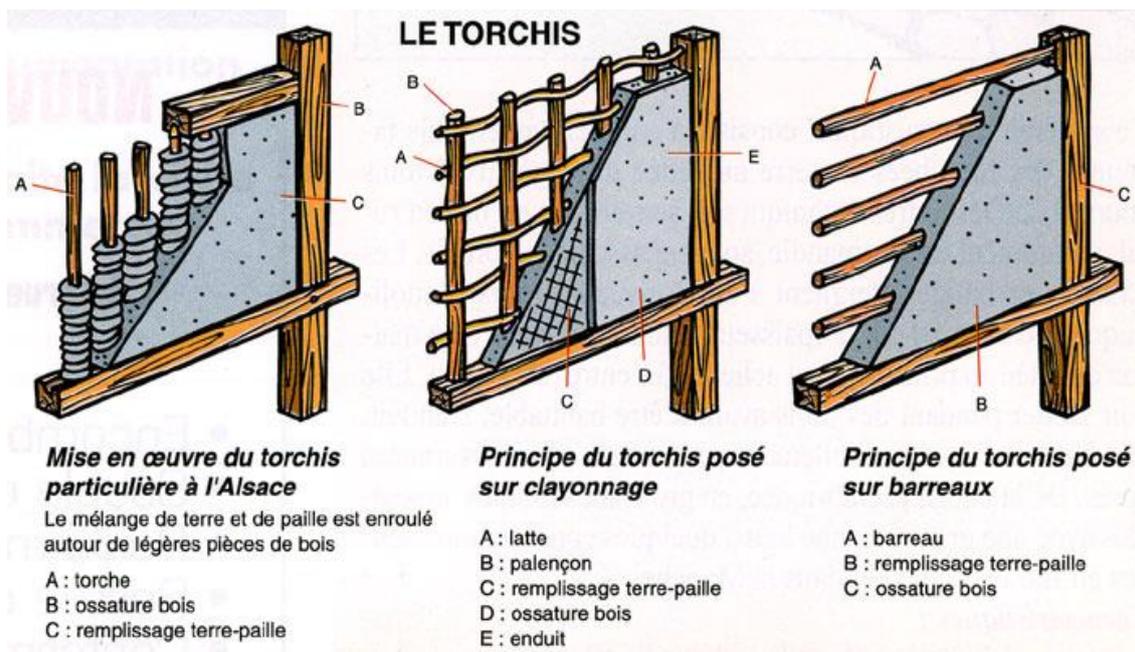


Figure III.7 - Illustration qui représente les procédés de mise en place des torchis.

### III.4.3 La bauge

La technique de la construction en bauge consiste en édification de mur massif, souvent porteur, avec un mélange de terre, d'eau et de fibres végétales voire animales et éventuellement du sable mis en œuvre par empilement de mottes à l'état plastique monté à la main en levée successive.

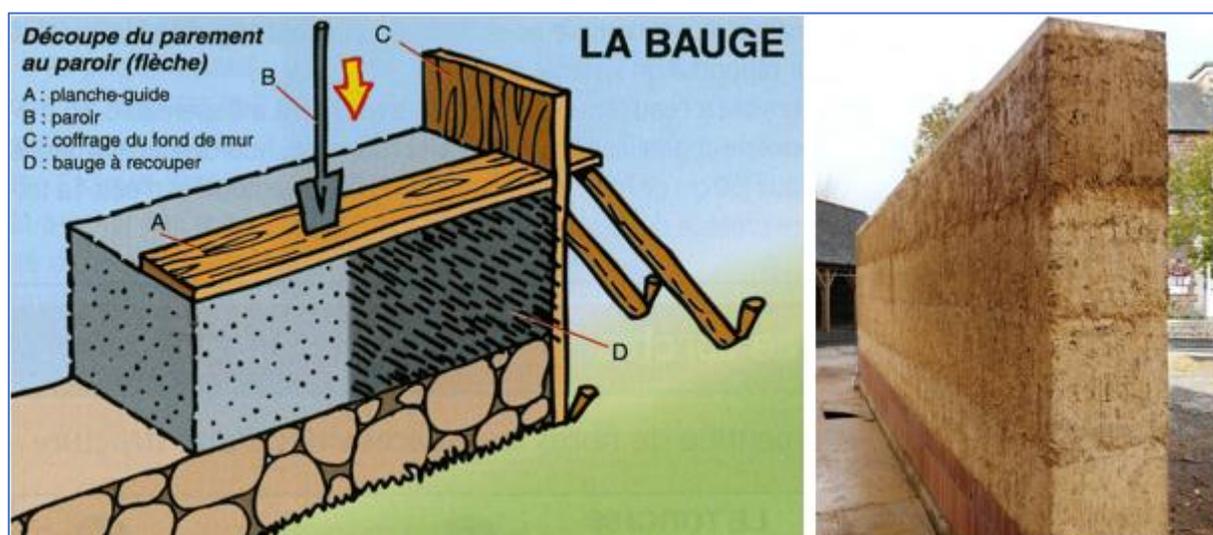


Figure III.8 - Un mur réalisé avec la technique de la bauge.

### III.4.4 Le Pisé

Le pisé est un procédé de construction de mur en terre crue, compactée dans un coffrage en couches successives à l'aide d'un pilon. Le mur décoffré immédiatement après que la terre a été damée.

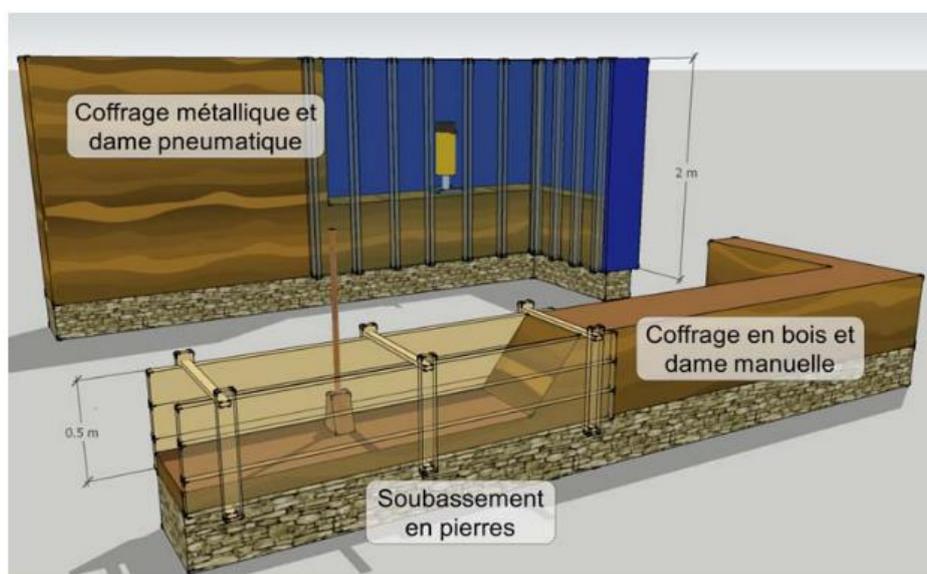


Figure III.10- Comparaison entre les outils traditionnels et modernes utilisés dans la construction en pisé.



Figure III.9 - Mur construit avec la technique du pisé.

### III.5 Blocs de terre comprimée (BTC)

Les briques de terre comprimée sont en quelque sorte du pisé en briques, elle est aussi considérée comme une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe. Les blocs de terre comprimée sont souvent fabriqués en compactant le sol humide à une densité relativement élevée à l'intérieur d'un moule parallélépipédique aux dimensions d'une brique standard. Le compactage est réalisé au moyen de presses hydrauliques ou mécaniques qui appliquent des charges comprises entre 2 MPa et 15 MPa, ou bien avec des

presses manuelles à levier, mais qui ils délivrent des capacités de compactage moins élevé. Les blocs obtenus sont immédiatement stockables, contrairement aux adobes qui doivent sécher sur de vastes aires de production avant de pouvoir être manipulées. Les BTC sont ensuite assemblés sous forme de structures de maçonnerie avec ou sans mortier selon la forme de la brique, mais généralement un mince joint de boue est utilisé pour sceller, compenser la rugosité de la surface et améliorer l'étanchéité à l'air.



Figure III.12- Image qui représente les étapes de construction d'un mur en briques comprimées.



Figure III.11 - Image qui montre le compactage d'une brique l'aide de (a) machine hydraulique (b) presse manuelle.

### III.5.1 Les étapes de production des briques en terre comprimée (BTC)

La production des BTC nécessite une organisation industrielle, semi-industrielle ou artisanale souvent en 6 étapes, ce qui fait du BTC un matériau largement accessible.

1. Extraction de la terre.
2. Préparation de la terre : séchage, broyage, tamisage.
3. Mélange avec l'eau et éventuellement stabilisation.
4. Pressage et démoulage.
5. Séchage, précédé d'une cure lorsque le BTC contient un stabilisant hydraulique.

## 6. Stockage.

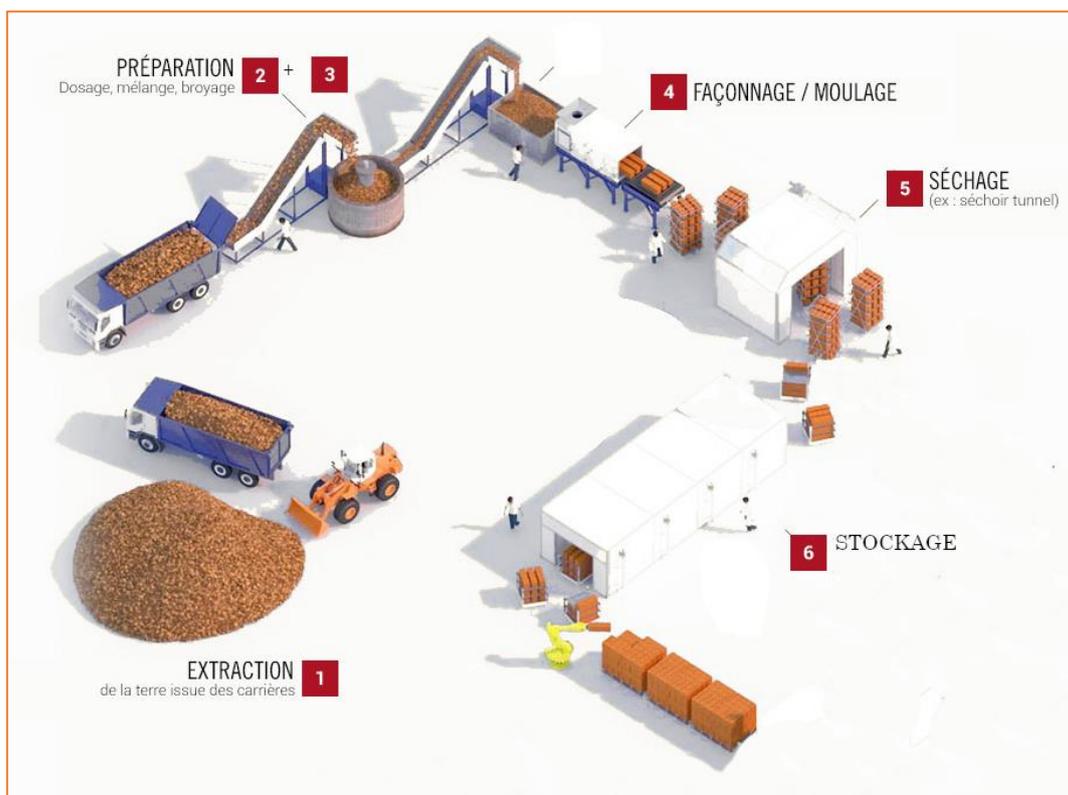


Figure III.13 - Les étapes de production des briques en terre comprimée (BTC).

### III.5.2 Avantages des BTC par rapport aux autres techniques

Les BTC présentent certains avantages par rapport aux autres techniques de construction en terre crue et d'autres matériaux classiques de maçonnerie.

Si on compare la technique des BTC à la technique des briques d'adobes, la première donne une résistance à la compression et une durabilité supérieure à la deuxième. Grâce à l'utilisation des presses hydrauliques et une variété de moules lors de la production des BTC, les briques BTC ont une surface plus régulière et plus lisse que l'adobe en plus d'offrir la possibilité de choisir des formes diverses selon les moules utilisés.

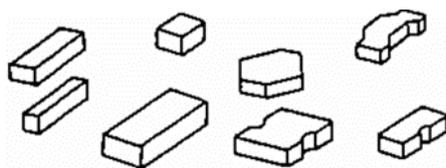
Si on compare la technique des BTC à la technique de pisé, la première donne une grande souplesse dans la conception architecturale. Ainsi, les BTC permettent d'échelonner la fabrication sur une période plus longue, tout en diminuant la fissuration des murs grâce à un retrait de séchage s'effectuant sur chaque brique et non sur toute la longueur du mur.

Si on compare maintenant les briques BTC avec les briques cuites, les premiers offrent des performances thermiques supérieures et ne demandent aucune énergie de cuisson comparée aux briques cuites.

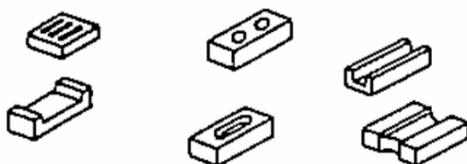
### III.5.3 Diversités des produits de blocs de terre comprimée (BTC)

Selon les types de processus de compactage et les moules utilisés, on peut distinguer quatre genres de blocs en terre comprimée qui sont utilisés pour la réalisation de maçonneries.

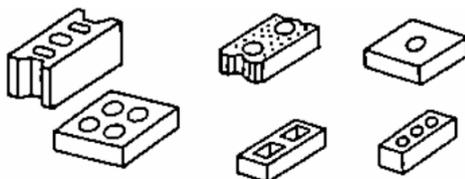
**Bloc plein :** ils sont principalement de forme prismatique (parallélépipédique, cubes, Hexagone multiple...) leur usage est très divers.



**Bloc évidé (creux) :** On observe normalement de 15 % de creux, 30 % avec des procédés sophistiqués. Les évidements créés au sein des blocs améliorent l'adhérence du mortier et allègent les blocs. Certains blocs évidés permettent la réalisation de chaînages (coffrage perdu).



**Blocs alvéolaires :** ils ont l'avantage de leur légèreté, mais ils exigent des moules assez sophistiqués ainsi que des pressions plus élevées. Ils sont adaptés à la maçonnerie armée (régions sismiques).



**Blocs à emboitements :** ils permettent de se passer de mortier pour les assemblages, mais exigent des moules assez expliqués et des pressions de compression élevée ils sont souvent utilisés pour des ouvrages non porteurs.

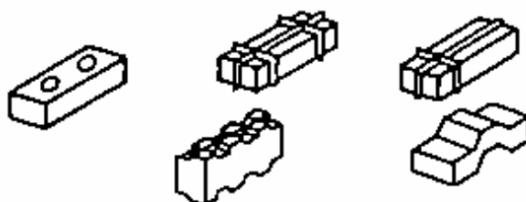
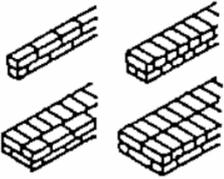
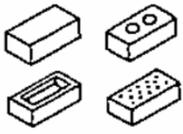
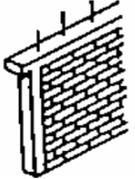
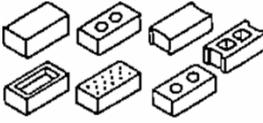
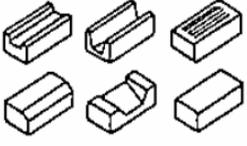
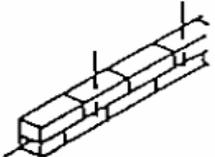
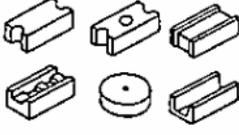
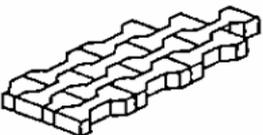
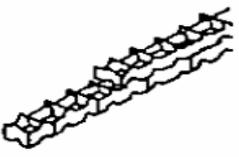


Figure III.14 - Typologie des blocs comprimés.

### III.5.4 Les utilisations des BTC

Les dimensions courantes des BTC sont adaptées à une grande souplesse d'emploi dans des solutions constructives variées, en maçonnerie porteuse ou renforcée et en maçonnerie de remplissage (Tableau III.2). Les briques de terre comprimée permettent aussi la réalisation des structures particulières (arcs, coupoles et voûtes), pour des constructions à usage d'habitation ou industriel.

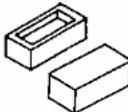
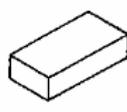
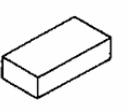
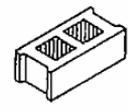
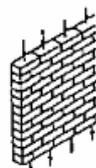
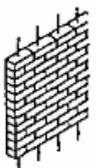
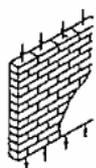
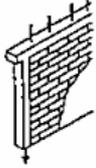
Tableau III.2 - Différents types d'usage pour les blocs de terre comprimée (Rigassi, 1995)[56].

Six principales catégories d'usage		
Usage		Type de bloc
<b>Maçonnerie porteuse</b>		
<b>Maçonnerie de remplissage</b>		
<b>Application particulière</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ventilation</li> <li>- Câblages</li> <li>- Corniches</li> <li>- Décoration</li> <li>- Arcs et voûtes</li> </ul>	
<b>Maçonnerie renforcée</b>		
<b>Systèmes constructifs particuliers imbrication</b>		
<b>Systèmes constructifs particuliers empilement à autobloquant</b>		

### III.5.5 Caractéristiques des BTC et des matériaux classiques (comparaison)

Une comparaison entre les BTC et les autres matériaux classique utilisée en maçonnerie permet de mettre en lumière les performances de celle-ci. Cette comparaison se base sur résistance en compression, dilatation thermique réversible, isolation thermique, masse volumique apparente et durabilité sans oublier l'esthétique et son intérêt architectural.

Tableau III.3- Tableau comparatif pour différentes caractéristiques, performances et quelque aspect d'utilisations en maçonnerie (Rigassi, 1995) [16].

Comparaison entre le btc et d'autres matériaux de maçonnerie					
Caractéristiques	Unité	BTC	Brique cuite	Adobe	Blocs de béton léger
<b>Forme, taille</b> <b>Type</b> $L \times l \times h$	<i>Cm</i>	 29,5 x 14 x 9	 40 x 20 x 10	 40 x 20 x 10	 40 x 20 x 15
<b>Aspect</b> -surface -intérêts esthétiques	–	-Lisse -moyens à bon	- rugueuse à lisse - bonne à excellent	-Irrégulier -pauvre	-Rugueuse -moyen
<b>Performances</b>					
– Résistance en compression humide	<i>Mpa</i>	1 à 4	0,5 à 6	0 à 5	0,7 à 5
– Dilatation thermique réversible	%	0,02 à 0,2	0,02 à 0,2	–	0,02 à 0,05
– Isolation thermique	<i>W/m°C</i>	0,81 à 1,4	0,7 à 1,3	0,4 à 0,8	1,0 à 1,7
– Masse volumique apparente	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	1700 à 2200	1400 à 2400	1200 à 1 700	1700 à 2200
– Durabilité		Faible à très bonne	Faible à excellente	Faible	Faible à très bonne
<b>Emploi en maçonneries</b>	–	porteur  sans enduit	porteur  sans enduit	porteur  avec enduit	remplissage  avec enduit

### III.5.6 Les blocs de terre comprimée (BTC) stabilisée

Il existe des limites à l'utilisation structurelle des briques comprimées de terre non stabilisées en raison de la perte de résistance dans des conditions de forte teneur en humidité. Par conséquent pour pallier à ce problème et augmenter la durabilité de celle-ci les briques en contact avec l'extérieur sont souvent stabilisées mécaniquement (amélioration de la granulométrie) « ce qui est le cas de cette étude avec les différent diamètre de noyaux de dattes » ou chimiquement grâce à l'ajout de liants hydrauliques (ciment, chaux, bitume), par exemple (Villamizar et al ) [57] ont trouvé que l'ajout de cendres de charbon (10%) a amélioré les résistances à la compression et à la flexion et a permis de réduire l'absorption d'eau des BTC ou encore (Muntohar, 2011) [58] qui a établi que l'ajout de cendre de ris permettait de diminuer l'absorption d'eau dans les briques tout en augmentant leur résistance mécanique. Globalement les briques BTC stabilisées ont toujours des performances plus élevées que celle non stabilisée.

### III.6 Codes, normes et directives dans le domaine de la construction en terre

Dans de nombreux pays, partout dans le monde, des travaux de recherche et de développement ont été menés dans le domaine des normes de construction en terre, afin de normaliser, contrôler et réguler cette dernière moyennant des manuels techniques pour faciliter l'introduction de la technique BTC dans le secteur formel du bâtiment.

Le panorama international de la réglementation pour la construction en terre crue est déjà très varié (une centaine de documents). Il existe des réglementations de nature très diverse, voici une liste non exhaustive des normes internationales de construction en terre :

#### III.6.1 Dans le monde

Tableau III.4 - Différente normes de construction en terre crue selon les pays.

Pays	Normes
<b>Brésil</b>	NBR 8491, 8492
<b>Colombie</b>	NTC 5324
<b>États-Unis</b>	NMAC, 14.7.4 / ASTM E2392 M-10
<b>Inde</b>	IS 2110, IS 1725
<b>Kenya</b>	KS 02-1070
<b>Niger</b>	NIS 369
<b>Nouvelle-Zélande</b>	NZS 4297, 4298, 4299
<b>Pirou</b>	NPT 331.201, 331.202, 331.203 / NTE E 0.80
<b>Sri Lanka</b>	SLS 1382-1, 1382-2, 1383-3
<b>Tunisie</b>	NT 21.33, 21.35
<b>Maroc</b>	RPCT 2011
<b>Turquie</b>	TS 537, TS 2514, TS 2515
<b>Zimbabwe</b>	SAZS 724

### III.6.2 En Europe

Tableau III.5 - Normes en vigueur dans certains pays européens.

Pays	Normes
<b>France</b>	AFNOR XP P 13-901 :2001 ⇒ Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d'essai - Conditions de livraison et d'acceptation.
<b>Allemagne</b>	XP P 13-901, NF EN 12571
<b>Italie</b>	LR Ab. N. 17/97 LR Ab 15th February 2001 LR 2/06 2nd August 2006
<b>Espagne</b>	UNE 41410 :2008 ⇒ Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons. Définitions, spécifications et méthodes d'essai.
<b>Suisse</b>	SIA-Document D0111 SIA-Document D0112 SIA-Document D077

### III.7 Exemples de construction en BTC



Figure III.15- Images de quelques constructions faites avec des briques en terre comprimée (a) au Cameroun, (b) en Colombie, (c) au Mali, (d) au sud-Afrique.

---

## Conclusion

Dans ce chapitre on a vu que dans un contexte d'augmentation de la population mondiale, et par conséquent la demande en logements et le secteur de la construction génèrent de plus en plus de déchets et de gaz à effet de serre en consommant d'importantes quantités de matières premières et d'énergies fossiles. Un nouvel intérêt est porté à la terre crue comme matériau de construction, intérêt déjà porté par les anciennes civilisations (Égyptienne mésopotamienne chinoise...) car très avantageuses (économiques recyclables abondante, possède des propriétés hygrothermiques).

Il existe de nombreuses techniques qui essaient de tirer profit de tous ces avantages et d'utiliser la terre crue pour la réalisation d'ouvrages, l'isolation et l'élaboration de nouveaux modes de construction. Parmi ces techniques on peut distinguer les cinq plus utilisés (l'adobe, la bauge, le pisé, le torchis et le bloc de terre compressée (BTC)).

Avec ses nombreuses formes et genres (blocs pleins, blocs alvéolaires, blocs évidés et blocs à emboitements), les BTC ont plusieurs usages notamment en maçonnerie de remplissage, maçonnerie porteuse, maçonnerie renforcée ou bien dans des applications un peu plus particulières (Arcs et voûtes, décoration, ventilation...). Ces briques offrent des résistances à la compression comparables aux matériaux traditionnels utilisés en maçonnerie avec l'avantage de consommer moins d'énergie pour les produire, elles sont aussi plus intéressantes que le pisé ou l'adobe, car elles offrent une plus grande souplesse architecturale que la première technique et une résistance à la compression plus importante que la deuxième. La stabilisation des briques permet un usage extérieur en réduisant leur sensibilité à l'eau et l'humidité tout en augmentant leur résistance à la compression et à la flexion.

Chapitre IV :  
Matériaux et méthodes expérimentales.

---

## Chapitre IV : Matériaux et méthodes expérimentales.

### IV.1 Introduction

La nature du sol et celle des stabilisants utilisés (ajouts de noyaux de dattes concassées) ainsi que leurs compositions chimiques et minéralogiques sont des paramètres fondamentaux qui influent sur le comportement des BTC.

Ce chapitre présente les différentes méthodes expérimentales et le matériel employé pour l'identification et la caractérisation des matériaux utilisés. Il va permettre d'investiguer et de déterminer la résistance mécanique et le comportement thermique des briques confectionnées à base d'argile stabilisée avec des noyaux de dattes.

### IV.2 Confection des éprouvettes

#### IV.2.1 Principe

Le principe est de confectionner des éprouvettes auquel on incorpore des noyaux de dattes broyées en faisant varier les diamètres (0-0.20, 0.20-0.25, 0.25-0.50, 0.50-1.0 mm) et les quantités (0, 5, 10, 15 et 20% en poids) dans cette brique, pour ensuite la soumettre à un ensemble de teste et protocoles expérimentaux visant à déterminer et évaluer l'effet de ces ajouts sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques cette éprouvette.

#### IV.2.2 Matériel utilisé

1. Broyeur +Tamis de différents diamètres (0-0.20 mm, 0.20-0.25 mm, 0.25-0.50 mm, 0.50-1.0 mm).
2. Malaxeur mélangeur.
3. Moules prismatiques de (160 × 40 × 40 mm) pour la mesure des propriétés physico-mécaniques.
4. Moules prismatiques de (160 × 80 × 20 mm) pour la mesure des propriétés thermique.
5. Presse hydraulique.
6. Étuve.



Figure IV.1 - Matériel utilisé pour la confection des éprouvettes.

### IV.2.3 Préparation du matériau

- **Préparation des noyaux de dattes :** les noyaux de dattes sont nettoyés et séchés pendant quelques jours à l'air libre pour faciliter l'opération de séparation de la coque. Ils ont ensuite été broyés et tamisés pour obtenir des particules sphériques de tailles (0-0,20, 0,20-0,25, 0,25-0,50 et 0,50-1,0 mm) de diamètre.



Figure IV.2 - Les différents diamètres des noyaux de dattes après broyage

- **Préparation de l'argile :** D'après Michel, J in[59], les meilleures conditions de malaxage sont réunies lorsqu'on dispose d'un sol sec. Cela nécessite un séchage préalable du sol dans l'étuve pendant 24 h à 65 °C.
- **L'eau de gâchage :** L'eau utilisée est celle du robinet. Elle doit être propre sans impuretés et sans agents chimiques (c'est généralement le cas des eaux potables du robinet).

#### IV.2.4 Mode opératoire

Cinq séries d'éprouvettes prismatiques ont été confectionnées en fonction des pourcentages d'ajout en poids de noyaux de dattes broyées (NDB) (première série témoin, deuxième série 5%, troisième série 10%, quatrième série 15% et enfin la cinquième série avec 20% en poids) dans chaque série en compte quatre types d'éprouvettes qui diffèrent par le diamètre des (NDB) utilisés pour les confectionnées (0-0.20, 0.20-0.25, 0.25-0.50, 0.50-1.0 mm).

Pour confectionner ces briques, l'argile préalablement séchée dans l'étuve pendant 24 h à 65 °C est d'abord mélangée à sec avec les (NDB) pour une durée de 2 minutes puis malaxés avec l'eau dans un malaxeur pendant 3 minutes afin d'assurer l'homogénéité et le bon mélange des deux matériaux et l'obtention d'une pâte plastique. Le mélange est ensuite mis en place et compacté juste après le malaxage dans des moules de (16cm ×8cm×2cm) et (16cm ×4cm×4cm) (la première dimension est celle exigée pour l'essai de conductivité thermique et la deuxième dimension pour l'essai de résistance à la compression) à l'aide d'une presse hydraulique à charge uniaxiale égale à 20 MPa.

Les échantillons ainsi formés ont été séchés à l'air libre au laboratoire pendant 72h pour être séchés ensuite dans l'étuve à 105°C jusqu'à ce que le poids soit constant et s'assurer de l'élimination de l'eau libre et par conséquent éviter les déformations, les fendillements et autres accidents (cas de séchage mal effectué).



Figure IV.3 - Images des étapes de confection des éprouvettes expérimentales[60], [78].

### IV.3 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette étude sont l'argile qui provient de la wilaya de Bejaïa et les noyaux de dattes issues de déchets d'une usine de production de confiture située à la wilaya de Biskra en Algérie toutes les deux sont des ressources très disponibles en grandes quantités[60].

### IV.4 Caractérisation des matériaux

#### IV.4.1 Analyses chimiques de l'argile

##### ✚ Méthode de la Spectrofluorescence X

La Spectrofluorescence X permet de connaître la composition chimique élémentaire de la matière. Les majeurs s'expriment en oxydes et dénote de la présence de certains éléments du tableau périodique plus lourds que le fluor ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$ ). Le principe est que lorsqu'on bombarde de la matière avec des rayons X, la matière réémet de l'énergie sous la forme, entre autres, de rayons X ; c'est la fluorescence X, ou émission secondaire de rayons X. Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition de l'échantillon. L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet à la fois de connaître la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leur concentration massique[61].

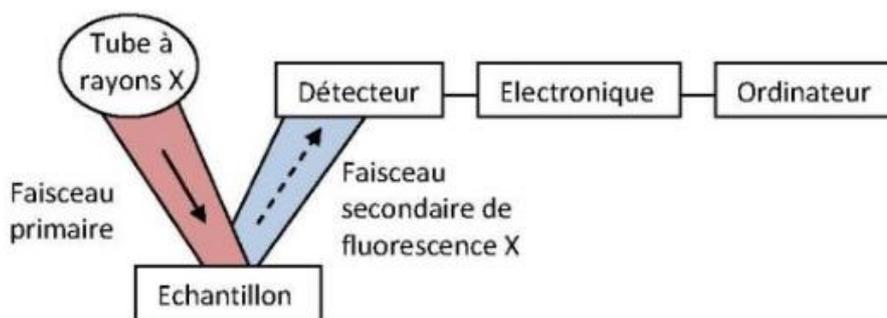


Figure IV.4 - Schéma de principe d'un spectromètre (Spectrofluorescence X) [61].

##### ✚ Procédure

Il existe deux types d'utilisation pour la Spectrofluorescence X, celle des poudres pour les éléments mineurs (semi-quantification et recherche de traces) et celle des perles pour les éléments majeurs (quantification). La méthode choisie est celle du dosage en éléments majeurs.

La poudre préalablement préparée (chauffage une nuit à 1000°C, dessiccation, broyage, pesage) est dissoute avec du lithium méta borate (fondant) et du bromure de lithium (démoulant). Le mélange va ainsi former un verre au boraté après une fusion à 900°C puis un coulage sous forme d'une pastille à l'aide de creuset en platine. On n'utilise pas du verre siliceux car la silice du verre perturberait la mesure pour cet élément dans l'échantillon, alors que le bore et lithium sont deux éléments invisibles par la machine.

L'échantillon est ensuite inséré dans la machine et soumis à un rayonnement X. L'échantillon bombardé va alors réémettre un rayonnement propre qui va être analysé. Le traitement informatique donnera la composition chimique[62].



Figure IV.5 - Coulage de la pastille à 900°C (gauche) et dispositif de fluorescence X utilisé (droite)[62].

#### IV.4.1.1 Résultats de l'analyse chimique de l'argile

Les pourcentages massiques d'oxyde de l'échantillon, ainsi que la perte au feu (LOI), sont présentés dans le (tableau IV.1) On remarque que cette argile contient plus de 6 % CaO ce qui permet de la classer comme étant une argile calcaire[63].

Tableau IV.1 Composition chimique de l'argile (% m)[63].

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MgO</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>
43.30	13.35	15.34	5.01	1.89	2.03
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>LOI</b>	
1.06	0.71	0.63	0.19	16.50	

#### IV.4.2 Analyse minéralogique de l'argile

##### ✚ Méthode de la diffraction au rayon x

L'analyse minéralogique par diffraction aux rayons X permet d'identifier la composition minéralogique d'une matière. Elle consiste à appliquer un rayonnement sur un

échantillon. Le rayonnement pénètre le cristal et il y'a absorption d'une partie de l'énergie et excitation des atomes avec émission des radiations dans toutes les directions[11].

Les radiations émises par des plans atomiques qui sont en phase vont engendrer un faisceau cohérent qui pourra être détecté. La condition pour que les radiations soient en phase s'exprime par la loi de Bragg :  $n\lambda = 2d \sin \theta$

- **n** : nombre de diffractions.
- **$\lambda$**  : longueur d'ondes des rayons X.
- **d** : épaisseur de la couche (espace basal en Å).
- **$\theta$**  : montée de la déviation, angle de diffraction.

La diffraction à rayon X permet d'avoir la composition minéralogique d'un assemblage argileux ou toute autre matière finement broyée. Elle fournit un diffractogramme représentant un ensemble de raies qui manifestent les réflexions des rayons X sur les plans d'organisation des éléments Al, Si, O, OH dans le réseau cristallin.

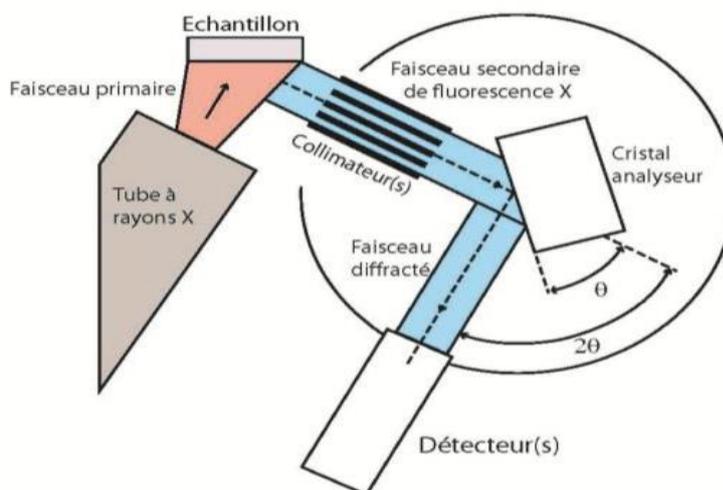


Figure IV.6 - Schéma de principe de la diffraction au rayon x

### ✚ Procédure

Pour réaliser l'essai, on doit préalablement préparer les échantillons préalablement séchés, broyés et tamisés. Le matériau sous forme de poudre est introduit dans un petit réceptacle PVC prévu à cet effet. On compresse la poudre sans tourner pour éviter une orientation préférentielle, on enfonce une bague sur la pastille PVC et on préserve la surface de poudre qui sera utilisée pour l'analyse (MOORE et REYNOLDS, 1989).

Ensuite, la pastille est introduite dans la machine où la poudre va recevoir un faisceau de rayons X monochromatique. Le rayon provient d'une anode métallique et est orienté selon un angle  $\theta$ . Les cristaux contenus dans l'échantillon engendrent des diffractions en fonction des distances inter planaires propres à chaque minéral. En faisant varier les angles de  $2$  à  $70^{\circ}2\theta$  pendant 20 minutes, on obtient un diffractogramme, où le phénomène de diffraction est traduit en pics d'intensité variable en fonction des angles[62].

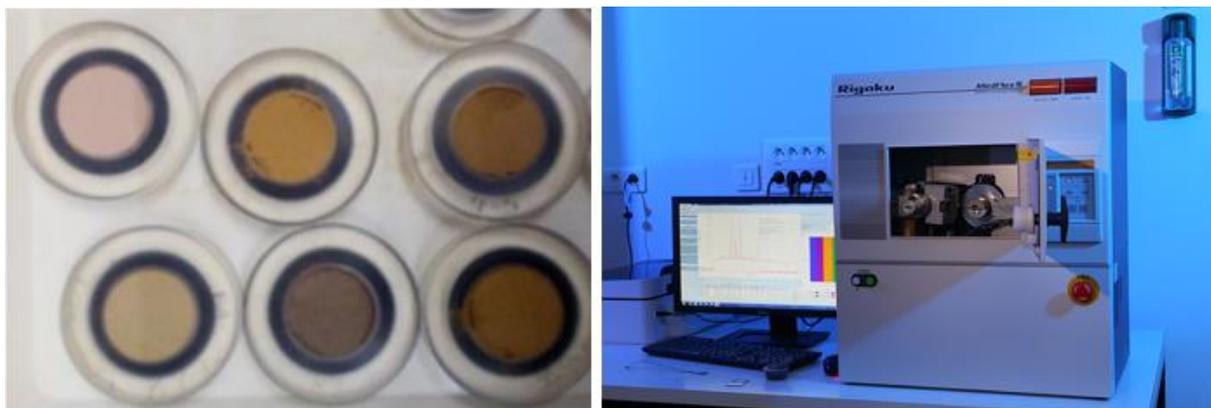


Figure IV.7 - Image d'un DRX (Diffractomètre à Rayon X) (à droite), échantillons de poudres (à gauche).

#### IV.4.2.1 Résultats de l'analyse minéralogique de l'argile

Le diagramme de diffraction des rayons X de l'argile (Figure IV.8) a montré qu'elle était principalement composée de calcite, de quartz et de muscovite. La présence de quartz est quasi systématique, provenant du processus de formation géologique de l'argile. La présence de kaolinite dans cet échantillon a contribué à une bonne ouvrabilité et au séchage des briques. En reliant les résultats de l'analyse de diffraction des rayons X à ceux de l'analyse chimique (spectroscopie de fluorescence X), les phases cristallines principalement représentées par les minéraux suivants : quartz, calcite, muscovite, kaolinite et albite détectée dans l'échantillon d'argile peuvent être quantifiés par calcul (Tableau IV.2).

Tableau IV.2 - Composition minéralogique de l'argile (% m)[63].

Quartz	Calcite	Muscovite	Kaolinite	Albite
22	26	17	10	6
Gypsum	Dolomite	Palygorskite	Clinochlore	Ferruginous minerals
2	3	5	4	5

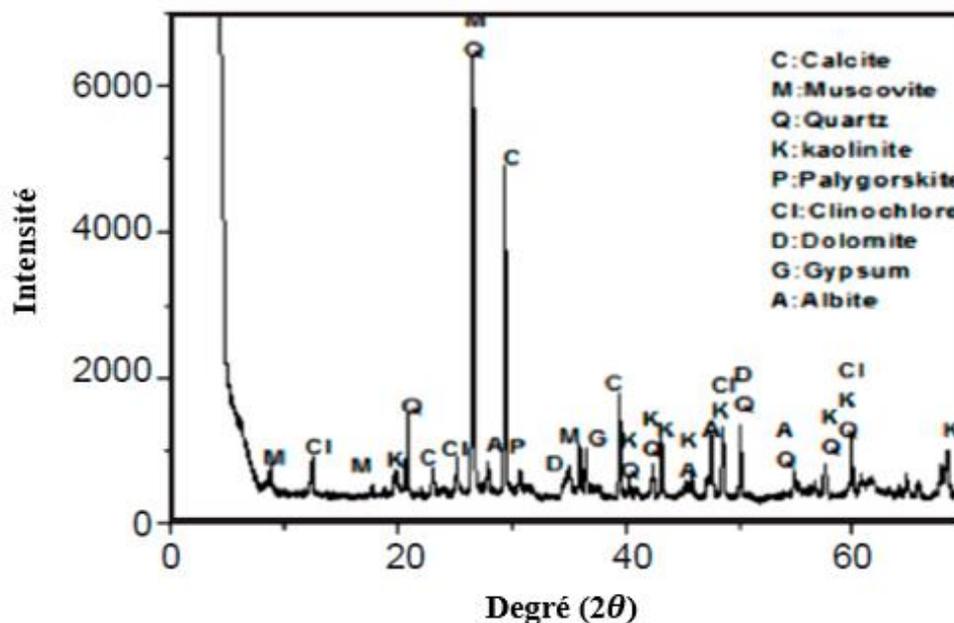


Figure IV.8 - Diagramme de diffraction des rayons X de l'argile.

#### IV.4.3 L'analyse granulométrique de l'argile

Grâce aux résultats d'une analyse réalisée par la technique de la granulométrie laser, la granulométrie de l'argile utilisée a pu être déterminée et quantifiée [63]. Celle-ci est constituée de 15 % de grains de sable, 20 % de particules argileuses, 65 % de grains poussiéreux. La faible teneur en sables procure à cette argile une grande plasticité.

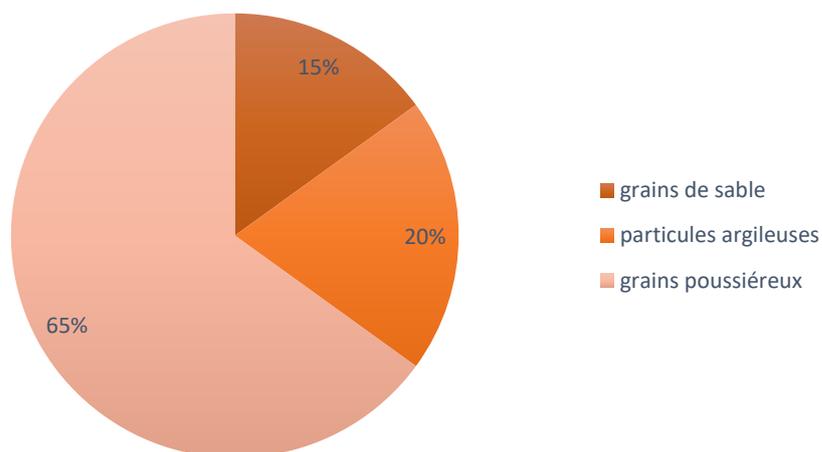


Figure IV.9 - Granulométrie de l'argile.

#### IV.4.4 Analyse chimique des noyaux de dattes

L'analyse chimique consiste en la détermination de la teneur en matière sèche, matière grasse, matière organique, matière minérale et teneur en fibres (cellulose).

#### IV.4.4.1 Détermination de la teneur en eau et en matières sèches

La teneur en eau, notée **H** pour humidité, correspond à la perte de masse subie par l'échantillon après chauffage dans une étuve à  $103 \pm 2$  °C jusqu'à poids constant pendant 24 heures. L'échantillon est par la suite placé dans un dessiccateur jusqu'à revenir à température ambiante puis être pesé [64].

La teneur en eau est exprimée en pourcentage massique et est déterminée par l'équation suivante :

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100$$

Avec **m<sub>0</sub>** la tare du creuset (g), **m<sub>1</sub>** la masse du creuset et de l'échantillon avant chauffage (g) et **m<sub>2</sub>** la masse du creuset et de l'échantillon après chauffage à l'étuve (g).

La teneur en matières sèches, notée **MS** et exprimée également en pourcentage massique, est déduite de l'expression de **H** :

$$MS = 100 - H$$



Figure IV.10 - Matériel nécessaire pour déterminer la masse sèche et la teneur en eau : une étuve (à gauche) et une balance de précision de laboratoire (à droite).

#### IV.4.4.2 Détermination de la teneur en matières minérales (cendres)

La teneur en matières minérales, ou cendres, notée **MM**, correspond à la masse résiduelle obtenue après calcination de l'échantillon sec dans un four à 550 °C jusqu'à poids constant. On obtient alors des cendres de couleur blanche ou gris clair. Par la suite, l'échantillon est placé au dessiccateur jusqu'à revenir à température ambiante puis pesé[64].

$$MM = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100$$

Avec  $m_0$  la tare du creuset (g),  $m_1$  la masse du creuset et de l'échantillon sec avant calcination (g) et  $m_2$  la masse du creuset et du résidu après calcination (g).



Figure IV.11 - Image de dessiccateurs halogène (à gauche) en verre (à droite).

#### IV.4.4.3 Détermination de la teneur en fibres (méthode de Van Soest)

La teneur en constituants pariétaux des solides, cellulose, hémicelluloses et lignine, est déterminée selon la méthode de Van Soest et Wine. Cette méthode, appelée également dosage ADF-NDF, est basée sur la différence de solubilité des constituants dans deux détergents différents. Elle est réalisée sur des échantillons de (l'ordre du gramme) préalablement séchés, réduits en poudre afin d'optimiser l'homogénéité du milieu.

- **L'attaque NDF (Neutral Detergent Fiber) :** nécessite un détergent neutre, à base d'Éthylène Diamine Tétra Acétate de sodium (EDTA), qui va solubiliser tous les composés non pariétaux. Le résidu obtenu est constitué des composés suivants : hémicelluloses, lignine et cellulose.
- **Les attaques ADF (Acid Detergent Fiber) :**
  - ✚ **Première attaque :** le détergent acide est constitué de Cétyle Tri méthyl Ammonium Bromure (CTAB) et d'acide sulfurique dilué. Cette attaque va permettre de solubiliser à la fois les composés non pariétaux, notamment les protéines et pectines, ainsi que les hémicelluloses. Il va donc être possible de récupérer un résidu insoluble constitué de lignine et de cellulose.
  - ✚ **Deuxième attaque :** réalisée sous l'action d'un oxydant puissant, le permanganate de potassium, permet, quant à elle, de solubiliser la lignine. Le résidu est cette fois uniquement constitué de cellulose.

Les teneurs en fibres, hémicelluloses, lignine ou cellulose, respectivement Hc, L et C, vont ainsi pouvoir être déterminées[64].

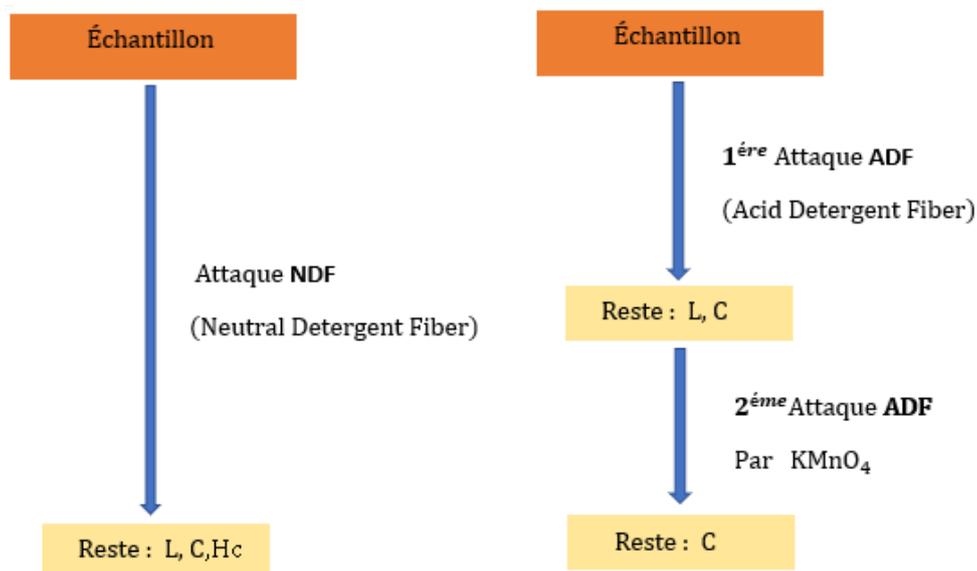


Figure IV.12 - Schéma des attaques chimiques subies par la matière végétale lors du dosage ADF – NDF.

### Réalisation de l'attaque NDF

L'échantillon à analyser (1 g), placé dans un fritté installé dans l'appareil *Fibertec Système M-hot extractor* (FOSS), est mis en présence de 100 ml du réactif NDF. Celui-ci est composé de 30 g de laurylsulfate de sodium, 18,61 g d'Éthylène Diamine Tétra-Acétate de sodium (EDTA), 4,56 g de phosphate disodique, 6,81 g de borate de sodium déca hydrate, 10 ml d'éthylène glycol monoethyl éther et 1 L d'eau déminéralisée.

Après une heure d'ébullition, les réactifs sont éliminés par filtration sous vide et l'échantillon est rincé à l'eau bouillante jusqu'à disparition de la mousse formée. Il est ensuite placé à l'étuve à  $103 \pm 2$  °C pendant 24 heures avant d'être calciné au four à 450 °C pendant 6 heures. Le fritté et le résidu doivent être pesés après les différentes étapes, séchage et calcination.

Cela permet alors de déterminer la teneur totale en composés pariétaux (hémicelluloses, cellulose et lignine)[64].

### Réalisation des deux attaques ADF

Également réalisée avec l'appareil *Fibertec Système M-hot extractor* (FOSS), la première attaque ADF se fait par ajout à l'échantillon (1 g) de 100 ml du réactif ADF. Celui-ci est composé de 20 g de cetyltriméthyl-ammonium bromure (CTAB) dans 1 L d'acide sulfurique 1 N.

Après une heure d'ébullition, les réactifs sont éliminés par filtration sous vide et l'échantillon est rincé à l'eau bouillante jusqu'à disparition de la mousse. Il est ensuite placé à l'étuve à  $103 \pm 2$  °C pendant 24 heures avant de subir la deuxième attaque ADF.

Lors de cette deuxième opération, le résidu est placé dans l'appareil *Fibertec system M-Cold extractor (FOSS)* puis est mis en présence de 25 ml de solution mixte. Cette dernière est constituée de deux volumes de solution de permanganate de potassium saturée (50 g/L) et d'un volume de solution tampon composée de 6 g de nitrate de fer, 0,15 g de nitrate d'argent, 100 ml d'eau déminéralisée, 500 ml d'acide acétique glacial, 5 g d'acétate de potassium et 400 ml de ter-butanol.

Après 90 minutes de mise en contact, les réactifs sont éliminés par filtration sous vide et le résidu est rincé par deux solutions différentes, la première étant composée de 50 g d'acide oxalique dihydrate, de 700 ml d'éthanol à 95 %, de 50 ml d'acide chlorhydrique 12 N et de 250 ml d'eau déminéralisée et la seconde étant une solution d'éthanol à 80 %. Le résidu est ensuite placé à l'étuve pendant 24 heures avant d'être mis à calciner dans le four à 450 °C pendant 6 heures. Le fritté doit être pesé après chaque étape, séchage et calcination. Cela permet la détermination de la teneur en cellulose[64].



Figure IV.13 - Les étapes de réalisation des attaques NFD-ADF à l'aide l'appareil *Fibertec system M-Hot extractor (FOSS)* pour la détermination de la teneur en fibres.

#### IV.4.4.4 Détermination de la teneur en protéines

La teneur en protéines est déterminée par la méthode du Kjeldahl. Cette méthode consiste à minéraliser l'azote organique contenu dans l'échantillon étudié en azote minéral (ammoniac) puis à effectuer le dosage acido-basique de cet ammoniac.

L'analyse s'effectue en deux étapes : la minéralisation de l'échantillon grâce à l'appareil *Digestor 2020 (TECATOR)* et le dosage de l'ammoniac grâce au *Kjeltec 2200 (FOSS)*.

La minéralisation de la prise d'essai (environ 1 g selon la teneur estimée en protéines) est effectuée par l'acide sulfurique concentré (12,5 ml à 95 %) durant une nuit. Le lendemain,

deux pastilles de catalyseur ( $\text{CuSO}_4$ ) sont ajoutées puis l'échantillon est mis à chauffer à  $400^\circ\text{C}$  pendant 1 heure. Durant cette étape, la totalité de l'azote de l'échantillon est transformée en ions ammoniums.

Après refroidissement des tubes de minéralisation, ceux-ci sont installés dans le Kjeltex 2200 (FOSS) et l'ammoniac produit est entraîné de façon automatique par distillation à la vapeur. L'appareil délivre de l'eau distillée puis de la soude à 40 % dans chaque tube afin de transformer les ions ammonium en ammoniac, qui va être piégé par une solution d'acide borique à 4 %. L'ammoniac ainsi formé est dosé par une solution d'acide chlorhydrique à 0,1 N grâce à un virage d'un mélange d'indicateurs colorés, le vert de bromocresol et le rouge de méthyle.

Par convention, la teneur en protéines de l'échantillon est obtenue en multipliant la teneur en azote total par un coefficient empirique. Ce coefficient tient compte de la masse molaire moyenne des acides aminés composant les protéines à quantifier. Ce coefficient varie en fonction de la matière végétale étudiée ; dans notre cas, nous utilisons la valeur de 6,25[64]. La teneur en protéines, notée P et exprimée en pourcentage massique, peut donc être déterminée par l'équation suivante :

$$P = 6.25 \times \frac{M_n \times C \times (V_1 - V_0)}{m \times MS} \times 100$$

Avec  $M_n$  la masse molaire de l'azote ( $M_n=14,007 \text{ g/mol}$ ), C la concentration de la solution d'acide chlorhydrique (mol/L),  $V_0$  le volume équivalent d'acide chlorhydrique utilisé pour doser un blanc (ml),  $V_1$  le volume équivalent d'acide chlorhydrique utilisé pour doser un échantillon (ml), m la masse de la prise d'essai (mg) et MS le taux de matière sèche dans l'échantillon (%m).

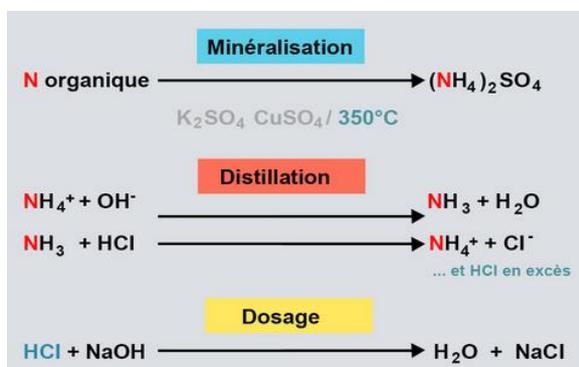


Figure IV.15 - Différentes réactions chimiques de la méthode de Kjeldahl.



Figure IV.14 - Image de Kjeltex 2200 à gauche et de Digestor 2020 à droite.

#### IV.4.4.5 Détermination de la teneur en lipides

La teneur en lipides est déterminée l'aide de l'appareil de Soxhlet. La prise d'essai est préalablement broyée et pesée (environ 10 g). Puis les lipides sont extraits dans un appareil d'extraction continue (Soxhlet) à l'aide du cyclohexane (environ 2/3 du volume de la capacité du ballon). Après 6 heures d'extraction, le solvant est éliminé par évaporation à l'aide d'un évaporateur rotatif. Les dernières traces de cyclohexane sont chassées en plaçant le ballon de l'appareil dans une étuve à  $103 \pm 2$  °C jusqu'à poids constant [64].

L'extrait ainsi obtenu est pesé. On peut alors déterminer la teneur en lipides, notée L, et exprimée en pourcentage massique, de l'échantillon.

$$L = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - MS} \times 100$$

Avec  $m_0$  la tare du ballon avec le régulateur d'ébullition (pierre ponce) (g),  $m_1$  La masse de la prise d'essai (g),  $m_2$  la masse du ballon, du régulateur d'ébullition (pierre ponce) et de l'extrait lipidique après séchage (g) et MS le taux de matière sèche de l'échantillon (%m).

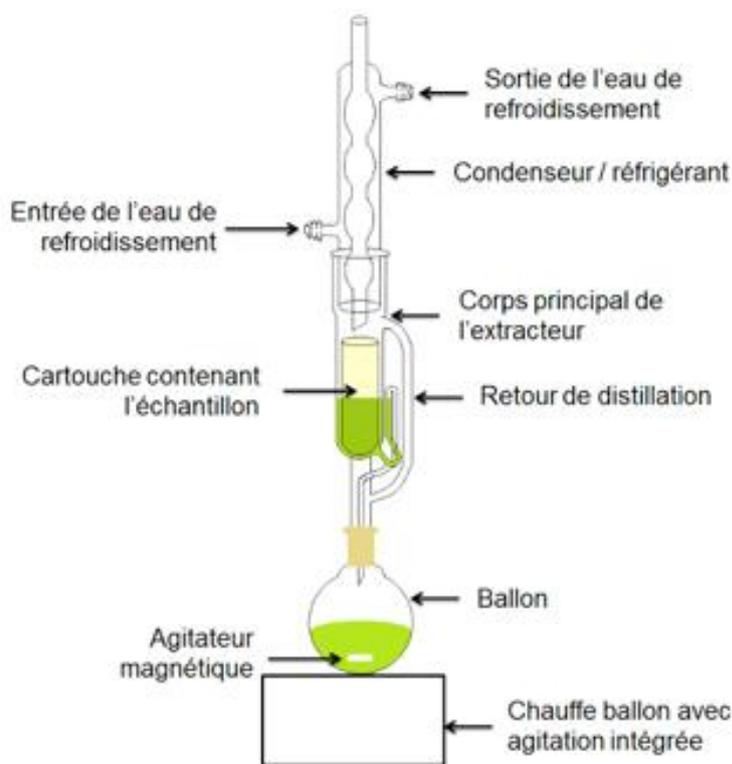


Figure IV.16 - Schéma et principe de fonctionnement de l'appareil de Soxhlet.

#### IV.4.4.6 Résultats de l'analyse chimique des noyaux de dattes

Les noyaux de dattes utilisées dans cette étude se composent principalement de substances caractéristiques de la matière organique (glucides, protéines et lipides), cellulose et cendres (Tableau IV.3). La cellulose est un polymère polysaccharide de glucose qui est l'un des principaux composants de la paroi cellulaire végétale. C'est le biopolymère responsable de la résistance mécanique et de capacité d'absorption d'eau des noyaux de dattes.

Tableau IV.3 - Composition chimique des noyaux de dattes (% m)[63]

Humidité	Glucides	Protéine	Lipide	Cellulose	Cendre
6.46	50.50	7.22	9.51	16.20	10.20

#### IV.5 Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau caractéristiques des sols fins permettant entre autres d'établir leur classification et d'évaluer leur consistance. La plasticité d'une argile ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg. Elles correspondent aux proportions en eau pour lesquelles le matériau argileux passe d'un comportement semi-liquide à un comportement plastique (limite de liquidité, WL) et ensuite d'un comportement plastique à un comportement semi-solide (limite de plasticité WP). Les limites d'Atterberg sont réalisées sur un matériau dont la taille de particule est  $< 400 \mu\text{m}$  à l'aide de la coupole de Cassagnarde selon la norme NF P 94-051. Ces limites sont étudiées afin de caractériser l'aptitude de la terre à être utilisée dans la construction.

##### IV.5.1 Principe de détermination des limites d'Atterberg

L'essai s'effectue en deux phases :

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans une zone placée dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés.
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionner manuellement, se fissure.

##### IV.5.2 Matériels nécessaires

###### a) Matériel pour la préparation du sol

- Un tamis à maille carrée de  $400 \mu\text{m}$  d'ouverture.
- Un bac de dimension minimale en  $(30 \times 20 \times 8\text{cm})$ .

- Un Récipient.

### b) Appareil de Casagrande

L'appareil est constitué d'un socle en bois bakéliné, d'un support métallique portant une coupelle et une came actionnée par une manivelle, d'un compteur de coups. L'ensemble permet de faire tomber la coupelle d'une hauteur de 10mm sur le bloc de bois dur. Chaque choc entraînera la fermeture progressive de la rainure pratiquée dans l'échantillon de l'argile à l'aide de l'outil de rainure. Les caractéristiques géométriques et normalisées de l'appareil sont précisées dans la norme NF P94-051.



Figure IV.17 – Image s'appareil de Casagrande

## IV.5.3 Mode opératoire

### IV.5.3.1 Pour déterminer la limite de liquidité (WL)

Pour déterminer la limite de liquidité, on utilise 200 gr de matériaux de granulométrie inférieure 400  $\mu\text{m}$ . On y ajoute de l'eau distillée pour former une pâte argileuse. Celle-ci est étalée ensuite dans une coupelle et on trace une lèvre calibrée. Ensuite l'échantillon est agité sur l'appareil de Casagrande et on note le nombre de coups correspondant à la fermeture de la lèvre sur 10 mm. On s'efforce à avoir toujours un nombre de coups compris entre 15 et 35. Il faut au moins 4 mesures. Les mesures sont reportées dans un graphique teneur en eau-nombre



Figure IV.18 - Les étapes de détermination de la limite de liquidité (WL) selon la norme NF P94-051.

de coups. La limite de liquidité correspond à la teneur en eau lorsque le nombre de coups est de 25 selon la norme (NF P94-051).

#### IV.5.3.2 Pour déterminer la limite de plasticité (WP)

Pour déterminer la limite de plasticité, on utilise la pâte argileuse pour former un petit boudin de 3 ou 4 cm de long, puis on le roule sur une surface plane jusqu'à ce qu'il atteigne une longueur d'environ 10 cm de long et 3 mm de diamètre à sa rupture. La limite de plasticité correspond à la teneur en eau du boudin à sa rupture. On répète la manipulation 3 fois et la limite de plasticité correspond à la valeur moyenne de ces 3 mesures (NF P94-051).



Figure IV.19 - Les étapes de détermination de la limite (WP) selon la norme NF P94-051.

Le tableau (Tableau IV.4) montre l'évolution des teneurs en eau nécessaire pour obtenir la plasticité de l'argile avec l'augmentation des diamètres et quantité de noyaux de dattes broyées incorporées dans la brique.

Tableau IV.4 - Les limites de liquidité (WL) en (%) du mélange (argile + NDB) en fonction du diamètre et pourcentage d'ajout de NDB[63].

NDB	0-0.20 mm	0.20-0.25 mm	0.25-0.50 mm	0.50-1.0 mm
5%	22.96±0.19	23.18±0.19	23.97±0.20	25.05±0.22
10%	24.86±0.20	25.32±0.20	26.38±0.21	28.29±0.20
15%	27.73±0.20	28.97±0.20	29.91±0.20	32.29±0.20
20%	33.45±0.21	34.52±0.22	35.56±0.22	37.29±0.22

Remarque : valeur de l'argile sans NDB = 16.81±0.21%.

## IV.6 Méthodes expérimentales

Une fois les éprouvettes de brique avec ajouts de (NDB) confectionnées elles sont soumises à une batterie de différents essais afin de déterminer leur résistance mécanique, thermique, flexionnelle et leur comportement vis-à-vis de l'eau en suivant les spécifications techniques des briques pleines qui sont fixées dans les normes algériennes (NA) (voir annexe III).

### IV.6.1 La résistance mécanique

Les essais de traction par flexion et de compression sont menés de façon successive sur les éprouvettes. C'est-à-dire qu'une éprouvette est d'abord testée en traction par flexion, puis, après rupture, les deux parties de l'éprouvette sont testées en compression. Le premier essai est réalisé selon le principe de flexion trois points, comme présenté (Figure IV.20).

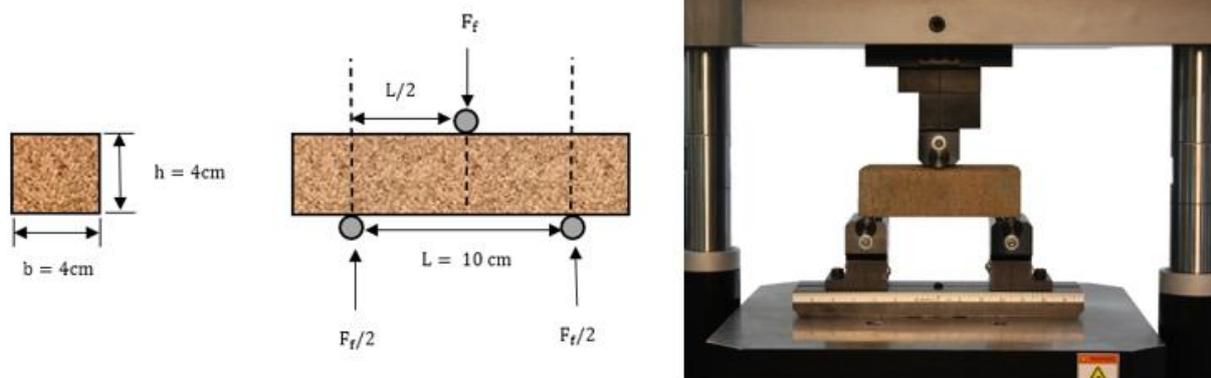


Figure IV.20 - Essai de flexion a 3 points.

L'essai est conduit jusqu'à rupture, on obtient la contrainte de rupture dite de traction par flexion avec l'expression suivant :

$$R_f = \frac{3 F_f \cdot L}{2 \cdot b^2}$$

Les deux demi-prismes qui résultent de cet essai sont ensuite testés en compression (Figure IV.21). L'essai est également conduit jusqu'à rupture des demis- éprouvettes, pour finalement déterminer la résistance à la compression avec l'expression suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

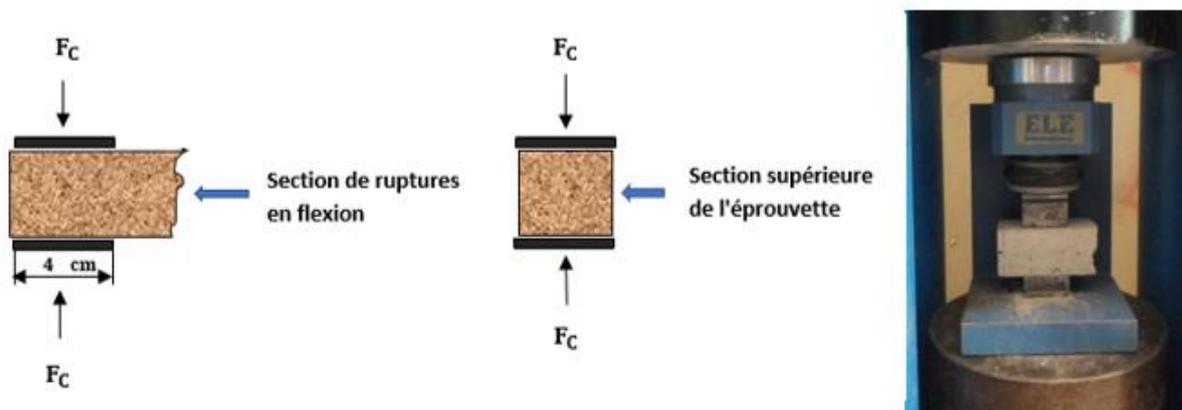


Figure IV.21 - Essais de compression.

### IV.6.2 La conductivité thermique

La conductivité thermique est l'une des propriétés thermo-physiques la plus recherchées pour les matériaux de construction. Cet essai vise à déterminer la conductivité thermique et l'effusivité de matériaux homogènes par l'application d'un choc thermique et le suivi de l'évolution de la température au cours du temps.

Le principe consiste à placer un élément chauffant qui se présente sous la forme d'un fil entre les surfaces de deux éprouvettes du matériau à caractériser. Le fil délivre un flux de chaleur sous forme d'échelon afin de produire localement un échauffement de quelques degrés du matériau. Cet échauffement est en règle générale mesuré ponctuellement par thermocouple. C'est l'analyse mathématique (grâce un logiciel a interface graphique) de cet échauffement qui permet de déterminer la conductivité thermique.

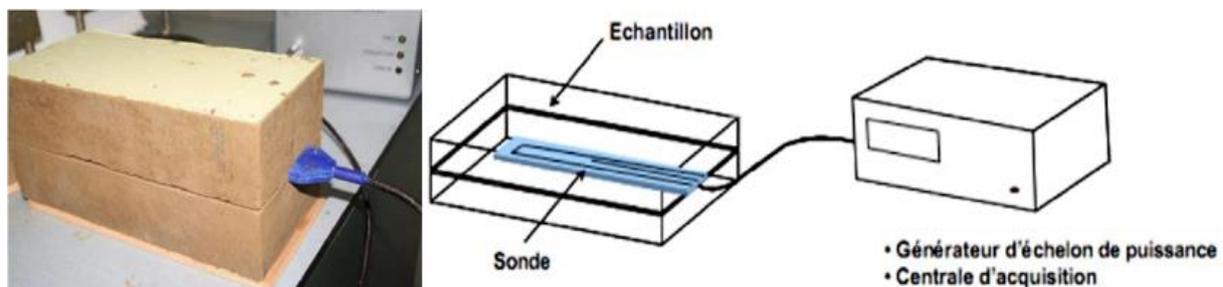


Figure IV.22 - Essai de détermination de la conductivité thermique.

### IV.6.3 Le coefficient d'absorption d'eau (capillarité)

Le coefficient d'absorption d'eau ( $C$ ) est un paramètre qui caractérise le phénomène de capillarité et le pouvoir succion d'un matériau. Le principe est d'immerger la face de l'éprouvette dans une fine couche d'eau (5mm) pendant 10 minutes et d'observer la prise de masse de la brique durant cet essai (Figure IV.23). Le coefficient d'absorption d'eau est déduit de cet essai suivant la formule suivante :

$$C = \frac{100 \times M}{S\sqrt{t}} = \frac{(P_1 - P_0) \times 100}{S\sqrt{t}}$$

- $M$  : masse d'eau absorbée par le bloc pendant l'essai (g).
- $t$  : temps d'immersion du bloc dans l'eau (min).
- $S$  : surface immergée du bloc (cm<sup>2</sup>).
- $P_1$  : poids du bloc après immersion dans l'eau (g).
- $P_0$  : poids du bloc avant immersion dans l'eau (g).

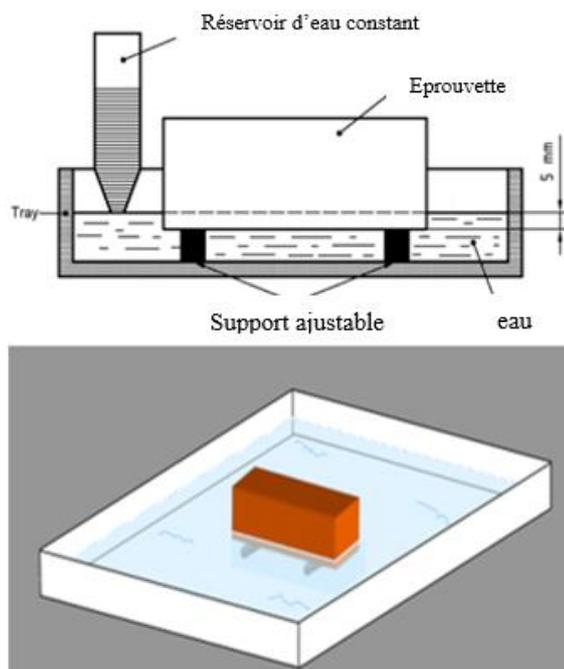


Figure IV.23 - Schéma de l'essai d'absorption capillaire.

#### IV.6.4 Les perte et retrait longitudinal de séchage

Le retrait ( $R_t$ ) exprimé en pourcentage est défini comme étant, la différence entre la longueur de l'éprouvette après démoulage (à l'état plastique) et sa longueur après séchage consécutif.

Le principe de l'essai et de mesurer à l'aide d'un pied à coulisse ou bien à l'aide d'un déformomètre de précision  $\pm 0,01$  mm, les variations dimensionnelles (raccourcissement longitudinal) des éprouvettes (16×4×4cm) puis avec une balance de déterminer les pertes en poids au séchage ( $P_s$ ) par rapport au repère d'origine (lors du démoulage des éprouvettes).

$$\%R_t = 100 \times \frac{L_p - L_s}{L_p}$$

$$\%P_s = 100 \times \frac{w_p - w_s}{w_s}$$

- $L_p$ : Longueur de la brique à l'état plastique (après façonnage).
- $L_s$ : Longueur de la brique au séchage.
- $w_p$ : Poids de la brique à l'état plastique (après façonnage).
- $w_s$ : Poids de la brique au séchage.



Figure IV.24 - déformomètre (à gauche), pied à coulisse (à droite).

#### IV.6.5 Analyse de la porosité grâce au prosimètre à mercure

Le prosimètre au mercure permet de mesurer la distribution des volumes de pores d'un échantillon de sol par l'intermédiaire du diamètre d'entrée de ces pores. Elle permet d'avoir accès à la distribution de taille des pores. Le principe consiste à injecter sous pression un liquide non mouillant, le mercure, dans le réseau poreux de l'échantillon sous vide. Le mercure pénètre dans des pores de diamètre d'entrée d'autant plus petits que la pression exercée est élevée, selon la loi de Laplace. Les essais ont été réalisés à 20°C sur deux prosimètres à mercure complémentaires de modèles Thermo Fisher Sci Pascal 140 et Pascal 240 complémentaire pour déterminer la distribution des diamètres des pores sur un intervalle de 0.01-1000  $\mu\text{m}$ .



Figure IV.25 - Prosimètre à Mercure PASCAL 140 et 240.

#### IV.6.6 Masse volumique apparente (densité apparente)

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel, après passage à l'étuve à 105°C. Elle est aussi appelée dans la littérature la densité apparente, souvent exprimée en gramme par centimètre cube ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Elle varie en fonction de la masse volumique des constituants (argile, NDB), leurs dosages et diamètres, mais également de la quantité d'air qu'il renferme (air emprisonné lors de la fabrication).

La masse volumique de chaque éprouvette est donnée par la formule :

$$Mv_e = 100 \times \frac{m_e}{v_e}$$

- $m_e$ : Masse de l'éprouvette.
- $v_e$ : Volume de l'éprouvette.
- $Mv_e$ : Masse volumique de l'éprouvette.

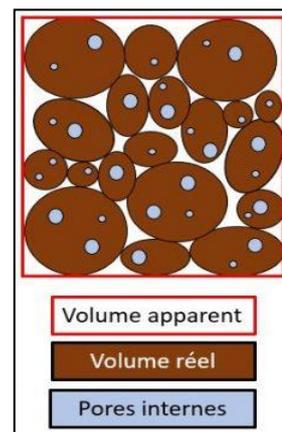


Figure IV.26 - Schéma de la structure microscopique d'une éprouvette en argile.

## Chapitre V : Résultats et discussion

## Chapitre V : Résultats et discussion

### V.1 Introduction

Le présent chapitre présente les principaux résultats de cette étude qui se base sur des résultats trouvés dans littérature. Il est organisé de façon à répondre aux principales interrogations sur l'effet de l'ajout de noyaux de dattes broyées dans la confection des briques sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques de ces dernières.

### V.2 L'effet de NDB sur les propriétés physiques des briques en terre crue

#### V.2.1 L'effet de NDB sur le retrait des briques en terre crue

Pour chaque formulation qui fait varier le diamètre et la teneur en NDB dans les briques, le retrait de séchage et la teneur en eau sont respectivement indiqués dans les (Figure V.1). Il a été constaté que l'augmentation de l'ajout de NDB dans l'argile augmente la teneur en eau requise pour la plasticité du mélange argile-NDB qui est maximale ( $37.29 \pm 0.22\%$ ) pour les briques contenant 20 % d'ajout. De la même manière, l'augmentation du diamètre des ajouts a induit une augmentation modérée de l'ordre de 4 % de cette teneur en eau entre le diamètre minimal (0.20mm) et maximal (1 mm).

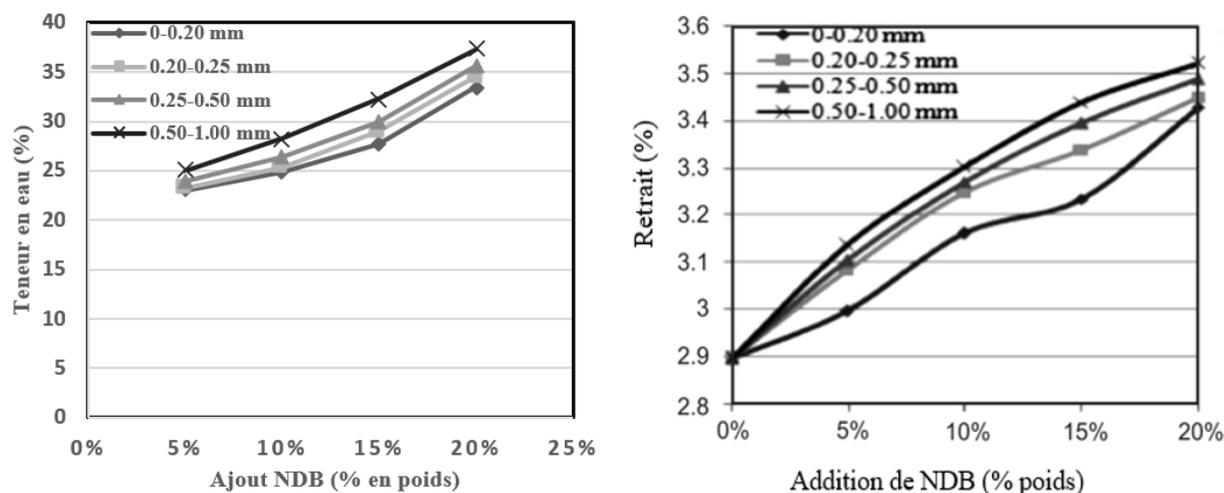


Figure V.1 - L'effet de NDB sur le retrait des briques en terre crue (à gauche), et la teneur en eau pour la plasticité [63].

Une corrélation a été relevée entre le taux d'absorption d'eau des briques avec ajouts de NDB et le retrait de séchage, celui-ci est maximal (3.5 %) quand la teneur en eau nécessaire pour obtenir la plasticité est maximale. Par conséquent le retrait augmente avec l'augmentation de la teneur en NDB et de leur diamètre.

La nature organique des NDB et leur forte teneur en cellulose (16. 20 %) sont à l'origine de l'augmentation de la demande en eau et du retrait après séchage, grâce à la capacité d'absorption et de rétention d'eau de la cellulose [2]. Le retrait (diminution de volume) est causé par l'évaporation de l'eau emprisonnée dans le mélange argile-NDB et le rapprochement des particules d'argile entre elles [63], ainsi que la diminution du volume des NDB après libération de l'eau absorbée (Figure V 2), lors de séchage [3].

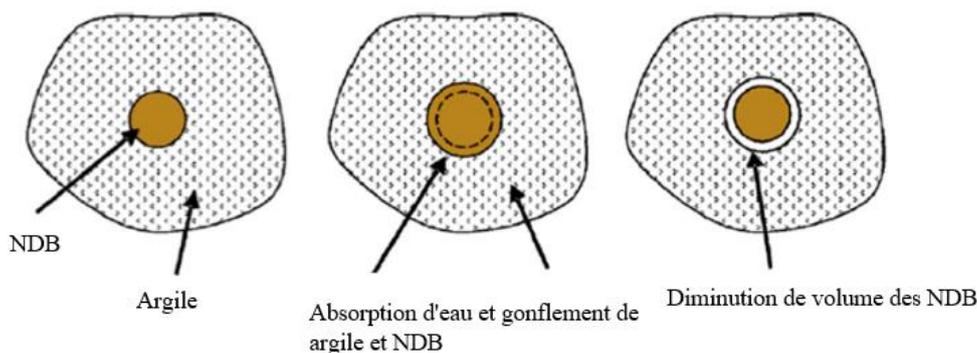


Figure V.2 - le processus d'absorption d'eau et le séchage des briques avec ajouts organique[3].

### V.2.2 L'effet de NDB sur la densité apparente des briques en terre crue

La densité est une propriété qui est intéressante, car elle peut être corrélée avec de nombreuses propriétés du matériau composite, telles que les caractéristiques thermiques ou mécaniques. Comme prévu, les densités apparentes de tous les agrégats végétaux et fibres utilisées dans la littérature étaient inférieures à celles du sol. L'augmentation de la quantité de déchets dans les échantillons de terre induit une baisse de la teneur en terre (plus dense que les matières organiques), ce qui finit par réduire la densité du composite (argile-ajouts organique)[1], [3].

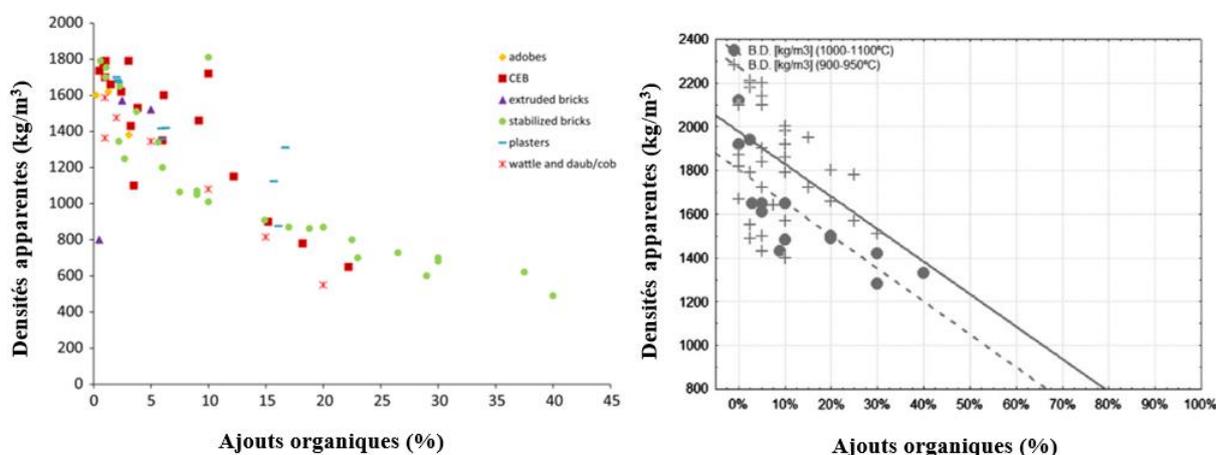


Figure V.3 - L'effet des ajouts organiques sur la densité apparente des briques crue (à gauche), brique cuite (à droite) [1], [3].

L'effet des ajouts organiques sur les briques en terre cuite est similaire (Figure V.3), toutefois la réduction de la densité est plus importante grâce à la formation de pores lors de la cuisson. L'ajout de NDB dans les briques a réduit la densité de cette dernière de telle manière que plus la quantité et le diamètre des noyaux de datte broyée augmente plus la densité diminue (Tableau V.1)[63].

Tableau V.1 - Densité apparente ( $g/cm^3$ ) en fonction du diamètre et du contenu en NDB[63].

NDB	0-0.20 mm	0.20-0.25 mm	0.25-0.50 mm	0.50-1.0 mm
5%	1.68±0.03	1.66±0.04	1.58±0.03	1.46±0.04
10%	1.43±0.04	1.39±0.03	1.37±0.03	1.33±0.03
15%	1.32±0.03	1.30±0.03	1.28±0.03	1.25±0.03
20%	1.27±0.04	1.24±0.03	1.23±0.03	1.20±0.03

Remarque : valeur de l'argile sans NDB =  $1.70±0.03 g/cm^3$ .

### V.2.3 L'effet de NDB sur le coefficient d'absorption d'eau C% des briques en terre crue

D'après les résultats trouvés dans la littérature [1], la porosité et l'absorption d'eau des échantillons étaient inversement proportionnelles à la densité apparente. Par conséquent, plus la densité est faible plus la quantité de pores augmente permettant un écoulement d'eau élevé en raison de l'effet capillaire ce qui conduit à un coefficient d'absorption d'eau plus important. En outre, il pourrait être généralisé que l'ajout de déchets agricoles augmente le taux d'absorption d'eau en raison de la nature hydrophile des fibres lignocellulosiques [1], [65], [66]. Dans leurs travaux de recherche G. Djafri, N. Chelouah [63] le même phénomène a été observé lors de l'ajout de NDB pour la confection de brique en terre cuite, cependant la combustion de celles-ci a généré plus de pores ce qui a conduit à un coefficient d'absorption plus conséquent (Tableau V.2). Dans ce tableau les valeurs ont montré que l'augmentation du taux d'addition de NDB dans les briques augmente le coefficient d'absorption d'eau, et qu'une augmentation du diamètre du NDB a pour effet une légère augmentation de ce coefficient.

Tableau V.2 - Coefficient d'absorption d'eau - C (%) en fonction du diamètre et de la teneur en NDB [63].

NDB	0-0.20 mm	0.20-0.25 mm	0.25-0.50 mm	0.50-1.0 mm
5%	16.25±0.21	18.22±0.21	19.48±0.19	20.98±0.20
10%	20.45±0.19	21.21±0.24	22.23±0.21	23.65±0.21
15%	25.98±0.20	25.79±0.24	26.50±0.21	27.10±0.20
20%	27.98±0.22	28.97±0.19	29.89±0.20	30.39±0.19

Remarque : valeur de l'argile sans NDB =  $15.31±0.18%$ .

### V.3 L'effet de NDB sur les propriétés mécaniques des briques en terre crue

#### V.3.1 L'effet de NDB sur la résistance à la compression des briques en terre crue

L'effet de l'ajout de particules végétales sur la résistance à la compression diffère d'une étude à une autre en fonction de la nature, composition chimique et de la taille de ces particules ainsi que des méthodes suivies pour la réalisation des essais de compression. Dans certains articles scientifiques [65], [67], [68] la résistance à la compression a été améliorée en ajoutant des agrégats ou des fibres dans différentes conditions. Par exemple [69] [69] ont trouvé que la résistance a été améliorée de 10 à 20% par l'ajout de 1,5% de paille d'orge. (Millogo et al) [3] ont expliqué que l'incorporation de fibres réduisait la propagation des fissures dans les blocs, grâce à la bonne adhérence des fibres à la matrice d'argile, et donc l'amélioration de leurs propriétés mécaniques.

Dans d'autres références [70]–[72] la résistance à la compression a diminué avec l'ajout d'agrégat ou de fibres, l'ajout des NDB dans les briques a eu pour effet de réduire la résistance à la compression avec l'augmentation de leurs pourcentages pour atteindre la valeur minimale de 0.75 MPa pour le diamètre (0.5–1.0mm) et le taux (20% NDB). L'influence du changement de diamètre sur la résistance a été plus conséquente pour une concentration (10% et 15% NDB) une réduction de 0.95 MPa et 0,75MPa respectivement, entre le diamètre min (0-0.20mm) et max(0.5-1.0mm) (Figure V.4). La diminution de la résistance à la compression est due à la faible adhérence entre les particules et la matrice d'argile, une augmentation de porosité et la réduction de la densité.

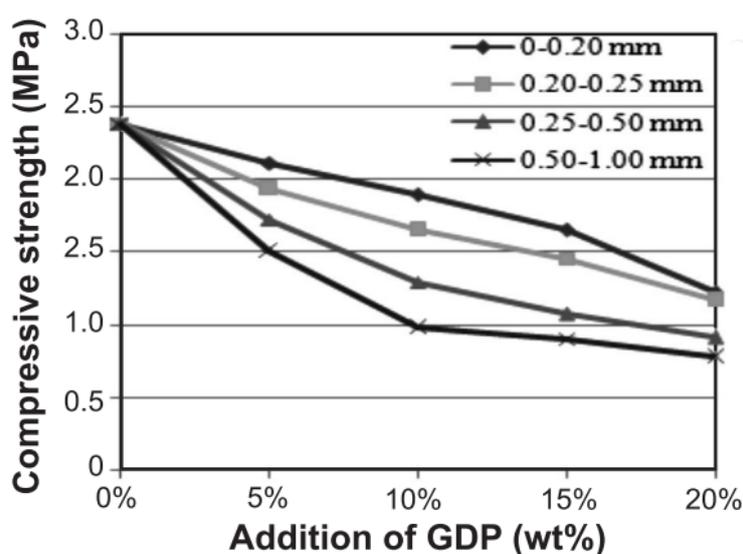


Figure V.4 - Résistance à la compression en fonction du diamètre et du contenu du NDB [63].

### V.3.2 L'effet de NDB sur la résistance à la flexion des briques en terre crue

Comme la résistance à la compression, la résistance à la flexion est une propriété qui dépend fortement de la porosité, des défauts microstructuraux et de la tille et type des ajouts utilisé pour la confection des éprouvettes. Dans la littérature [59], [71]–[73] l'ajout d'agrégats ou de fibres a conduit à la diminution de la résistance la flexion par rapport à l'état initial. Cela pourrait être attribué à l'hétérogénéité de la brique avec ajouts, elle pourrait également s'expliquer par la diminution de la matrice minérale lors de son remplacement par l'ajout utilisé ou encore par la faiblesse de l'adhérence entre ces derniers avec la matrice argileuse [3]. de manière similaire les valeurs de résistance à la flexion sont passées de 7,4 à 2,9 MPa lorsque 5 à 20% des NDB ont été incorporés dans la matrice argileuse (Figure V.5 ) [63] et donc conduit a une chute de la résistance mécanique flexionnelle de ce matériau composite.

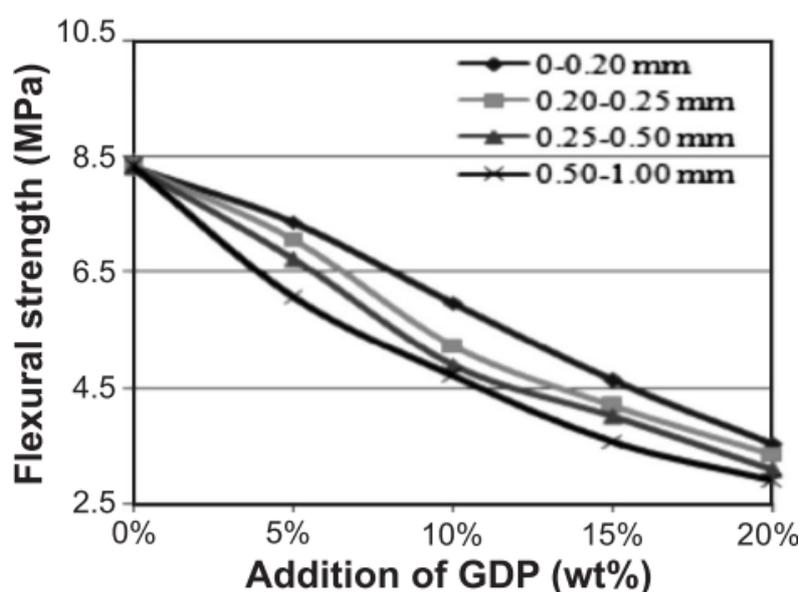


Figure V.5 - Résistance à la flexion en fonction du diamètre et du contenu du NDB [63].

### V.4 L'effet de NDB sur les propriétés thermiques des briques en terre crue

Les nombreuses études qui ont examiné l'effet de l'ajout d'agrodéchets dans la brique sur la conductivité thermique ont démontré que la conductivité diminue avec l'ajout de déchets organiques [1], [3], [68]. L'augmentation de la porosité et par conséquent la diminution de la densité suite à l'incorporation de déchets organiques dans la matrice argileuse se trouve être à l'origine de la réduction de la conductivité thermique. (Al Rim et al) [70] dans leurs travaux de recherche ont exprimé cette relation entre la densité ( $d$ ) et la conductivité thermique ( $\lambda$ ) par la relation linéaire suivante :  $\lambda = 0,228d - 0,006$  alors que (Ateliers et Laurent) [74] quant à eux on proposés un modèle empirique pour décrire cette relation :  $\lambda_{dry} = 0,103 \times 10^{0,517 d}$

Les résultats trouvés par [63] ont démontré que la conductivité thermique diminuait considérablement avec l'augmentation du pourcentage et du diamètre du NDB incorporés dans la brique. Ces résultats (Figure V.6) montrent que la conductivité thermique a diminué de 6 % avec l'ajout de 20% de NDB avec un diamètre (0,50-1mm) et révèlent que le changement de diamètre a relativement peu d'influence sur la conductivité thermique.

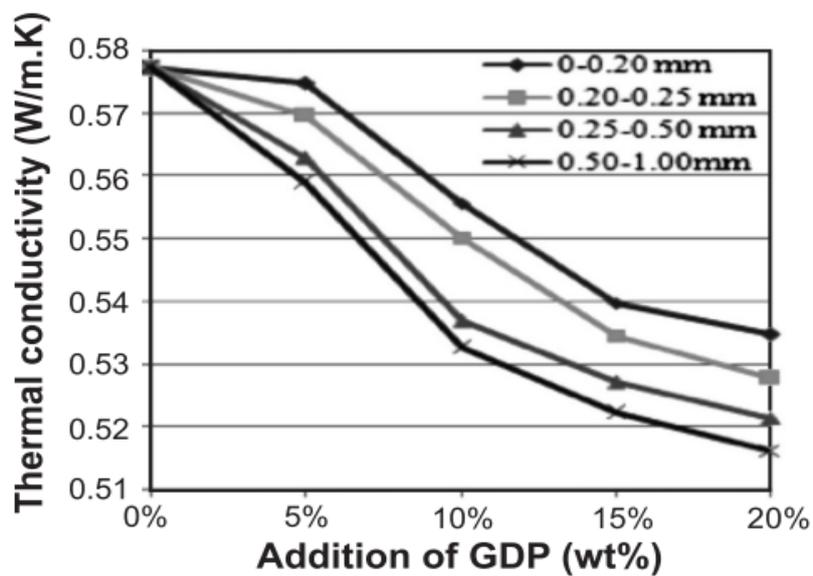


Figure V.6 - Conductivité thermique en fonction du diamètre et du contenu du NDB [62].

---

## Conclusion générale

Ce mémoire de recherche avait pour but d'évaluer l'effet de l'ajout de noyaux de dattes broyées (NDB) sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques d'une brique d'argile non cuite comprimée ce qui est une démarche qui s'inscrit dans l'esprit de nombreuse recherche qui consistent à utiliser des ajouts d'origine végétale renouvelable à la place des matériaux traditionnels d'origine minérale, pour la confection de brique non cuite, par souci de répondre aux enjeux climatiques, de réduire la consommation d'énergie dans le secteur de la construction et d'envisager une nouvelle voie de valorisation des déchets agricoles ou bien issus de la transformation par l'industrie agroalimentaire.

Il a fallu dans un premier temps caractériser les noyaux de datte et l'argile chimiquement et minéralogiquement grâce à la diffraction à rayons x, Spectrofluorescence x et à des attaques chimiques ce qui a révélé que :

- Les noyaux de dattes son principalement constitue de matière organique (glucides, protéines et lipides), de cellulose à l'origine de la dureté et résistance mécanique du noyau datte, et de cendres (matière minérale).
- L'argile utilisée et particulièrement constituée de calcite, quartz, muscovite et kaolinite ce qui fait d'elle une argile très maniable et plastique. Sa forte teneur en calcium plus de 6 % permet de la catégoriser comme étant une argile calcareuse.

Dans un second lieu, les noyaux de dattes ont été préparés broyés et tamisées pour avoir différents diamètres (0-0.20, 0.20-0.25,0.25-0.50,0.50-1.00 mm) puis ils ont été introduits dans l'argile pour la confection des éprouvettes avec différents pourcentages d'ajouts (5, 10, 15, 20% en poids).

Enfin, les éprouvettes ainsi confectionnées ont été soumises à des essais de compression, traction par flexion pour déterminer leur résistance mécanique et d'autres essais pour déterminer leur caractéristique physique (limite plasticité, coefficient d'absorption d'eau, densité apparente, porosité) ainsi que l'essai du fil chaud pour déterminer la conductivité thermique. Ce qui a permis de comprendre l'effet de ces ajouts sur les propriétés des briques et de tirer les conclusions suivantes :

- La teneur en eau nécessaire à la plasticité du mélange argile-NDB a augmenté en fonction de la teneur et du diamètre des NDB en raison de la présence de cellulose et de la forte porosité du NDB, qui ont un important pouvoir absorbant.
- Le retrait linéaire de séchage augmente parallèlement avec l'augmentation des teneurs en eau nécessaire à la plasticité, et donc plus la quantité et le diamètre des NDB est important plus le retrait de séchage est élevé.
- L'augmentation des quantités et des diamètres des NDB moins dense et plus poreux que l'argile a conduit à la réduction de la densité des briques et par la même occasion à l'augmentation de la porosité de ces dernières.
- L'augmentation de la porosité des briques après incorporation des NDB conduit à la réduction de la conductivité thermique de celle-ci et l'amélioration de leur pouvoir d'isolation.
- À cause de l'hétérogénéité du composite argile-NDB, la faible adhérence des NDB à la matrice argileuse et la formation de fissures la résistance mécanique (compression, flexion) décroît avec l'augmentation du taux et des diamètres de cet ajout dans la brique.

À la lumière de ces résultats on peut recommander l'utilisation de ces briques composites (argile-NDB) pour l'isolation thermique et la réduction de la consommation d'énergie (chauffage/climatisation) des bâtiments grâce au fort pouvoir isolant de ce type de briques, dans le domaine de la maçonnerie non porteuse intérieure (non exposé aux intempéries) à cause de leur important pouvoir d'absorption d'eau et de la faible résistance mécanique cependant meilleure que celle des Adobe.

## Perspectives

Dans de futurs travaux, il serait intéressant de compléter cette étude par des essais supplémentaires pour déterminer la durabilité du composite (argile-NDB) en s'intéressant à : l'effet des cycles de gel-dégel, la Résistance à l'érosion (vent et pluie), Biodégradation des NDB et développement de micro-organismes (moisissures, champignons...) dans la brique.

Notre étude s'est limitée à l'utilisation d'un seul type d'argile pour la confection des briques il serait pertinent d'utiliser d'autres types d'argile avec une composition chimique minéralogique différente afin d'élargir cette étude et de mieux cerner l'effet des NDB sur le comportement physicomécanique des briques.

Enfin il serait tout aussi intéressant d'étudier la capacité d'isolation acoustique de ces briques, leur propriété hygrothermique (perméabilité à la vapeur, Sorption-désorption...) ainsi que l'impact de ces briques sur le confort et la santé des gens dans l'habitat.

## Références bibliographiques

- 
- [1] N. Jannat, A. Hussien, B. Abdullah, and A. Cotgrave, “Application of agro and non-agro waste materials for unfired earth blocks construction: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 254, p. 119346, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119346.
- [2] I. Demir, “An investigation on the production of construction brick with processed waste tea,” *Build. Environ.*, vol. 41, no. 9, pp. 1274–1278, 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.05.004.
- [3] A. Laborel-Préneron, J. E. Aubert, C. Magniont, C. Tribout, and A. Bertron, “Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 111, pp. 719–734, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119.
- [4] I. Demir, M. S. Baspinar, and M. Orhan, “Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production,” *Build. Environ.*, vol. 40, no. 11, pp. 1533–1537, 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.11.021.
- [5] G. Görhan and O. Şimşek, “Porous clay bricks manufactured with rice husks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 390–396, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.110.
- [6] D. Université *et al.*, “Thèse de doctorat Thèse de doctorat,” no. Paris VI, 2006.
- [7] I. Demir, “Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks,” *Waste Manag.*, vol. 28, no. 3, pp. 622–627, 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2007.03.019.
- [8] L. Barbieri, F. Andreola, I. Lancellotti, and R. Taurino, “Management of agricultural biomass wastes: Preliminary study on characterization and valorisation in clay matrix bricks,” *Waste Manag.*, vol. 33, no. 11, pp. 2307–2315, 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2013.03.014.
- [9] N. Phonphuak and P. Chindaprasirt, “Utilization of sugarcane bagasse ash to improve properties of fired clay brick,” *Chiang Mai J. Sci.*, vol. 45, no. 4, pp. 1855–1862, 2018.
- [10] B. Mokhtar, “N° : 2p-118 saadi i,” *Evolution (N. Y.)*, pp. 1–5, 2009.
- [11] S. Djadouf, A. Tahakourt, N. Chelouah, and D. Merabet, “Etude de l’influence des ajouts (grignon d’olive et foin) sur les caractéristiques physicomécaniques de la brique de terre cuite,” *Commun. Sci. Technol.*, no. 9, pp. 3–7, 2011.
- [12] M. A. Elhoumaizi, M. Saaidi, A. Oihabi, and C. Cilas, “Phenotypic diversity of date-palm cultivars (*Phoenix dactylifera* L.) from Morocco,” *Genet. Resour. Crop Evol.*, vol.

- 49, no. 5, pp. 483–490, 2002, doi: 10.1023/A:1020968513494.
- [13] D. D., *Mutation du système de production oasien en Algérie.*, CRSTRA, Al. 1990.
- [14] M. Al-Farsi, C. Alasalvar, M. Al-Abid, K. Al-Shoaily, M. Al-Amry, and F. Al-Rawahy, “Compositional and functional characteristics of dates, syrups, and their by-products,” *Food Chem.*, vol. 104, no. 3, pp. 943–947, 2007, doi: 10.1016/j.foodchem.2006.12.051.
- [15] A. S. Hussein and G. A. Alhadrami, “Effect of Enzyme Supplementation and Diets Containing Date Pits on Growth and Feed Utilization of Broiler Chicks,” vol. 8, no. 2, pp. 67–71, 2003.
- [16] B. S. Girgis, “Eksi Sozluk,” vol. 52, pp. 105–117, 2002, [Online]. Available: <http://eksisozluk.com>.
- [17] A. Z. A. Abou-Zeid, A. O. Baghlaf, J. A. Khan, and S. S. Makhshin, “Utilization of date seeds and cheese whey in production of citric acid by *Candida lipolytica*,” *Agric. Wastes*, vol. 8, no. 3, pp. 131–142, 1983, doi: 10.1016/0141-4607(83)90112-9.
- [18] B. Bensekrane, D. Gallart-Mateu, M. de La Guardia, and D. Harrache, “Effets des extraits de noyaux de dattes *Phoenix dactylifera* L. sur la cristallisation de la brushite dans l’urine totale,” *Phytothérapie*, vol. 13, no. 1, pp. 2–13, 2015, doi: 10.1007/s10298-014-0901-3.
- [19] “FAOSTAT.” <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize> (accessed May 19, 2020).
- [20] “Filière dattes : Production de 10 millions de quintaux en 2017 - Algerie Eco.” <https://www.algerie-eco.com/2018/07/31/filiere-dattes-production-de-10-millions-de-quintaux-en-2017/> (accessed May 20, 2020).
- [21] M. E.M., “Le secteur phoenicicole algérien : Situation et perspectives à l’horizon 2010,” in *Le palmier dattier dans l’agriculture d’oasis des pays méditerranéens*, vol. 28, F. M. and G. D., Eds. Zaragoza : CIHEAM, 1993, pp. 23–44.
- [22] E. Espiard, *Introduction à la transformation industrielle des fruits*. 2002.
- [23] D. A. DeMason, R. Sexton, M. Gorman, and J. S. G. Reid, “Structure and biochemistry of endosperm breakdown in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) seeds,” *Protoplasma*, vol. 126, no. 3, pp. 159–167, 1985, doi: 10.1007/BF01281791.
- [24] M. Khali, Z. Boussena, and L. Boutekrabt, “Effet de l’incorporation de noyaux de dattes

- sur les caractéristiques technologiques et fonctionnelles de la farine de blé tendre,” *Nat. Technol.*, no. 12, p. 15, 2015.
- [25] N. Chaira and A. Ferchichi, “Chemical Composition of the Flesh and the Pit of Date Palm Fruit and Radical Scavenging Activity of Their Extracts,” no. August, 2007, doi: 10.3923/pjbs.2007.2202.2207.
- [26] D. E. Bignell, Y. Roisin, and N. Lo, “Biology of termites: A Modern synthesis,” *Biol. Termit. A Mod. Synth.*, pp. 1–576, 2011, doi: 10.1007/978-90-481-3977-4.
- [27] C. Minerals, S. E. Gen, P. Vii, and P. Cedex, “Quelques Aspects De L ’ Action Des,” *Noûs*, no. i, pp. 453–462, 1982.
- [28] H. B. Kaushik, D. C. Rai, and S. K. Jain, “Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 9, pp. 728–739, 2007, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(728).
- [29] J. E. Oti and J. M. Kinuthia, “Stabilised unfired clay bricks for environmental and sustainable use,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 58, pp. 52–59, 2012, doi: 10.1016/j.clay.2012.01.011.
- [30] Dr. Guettouche Amar, “Identification et classification des sols,” p. 31.
- [31] C. E. (Charles E. Weaver, *Clays, muds, and shales*, vol. 44. Elsevier, 1989.
- [32] M. E. Tucker, *Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks*. Blackwell Science, 2001.
- [33] Ecole des Travaux Publics de Normandie, “Essai proctor,” *Ec. des Trav. Publics Normandie*, p. 1, 2015.
- [34] J. N. Meegoda and L. Martin, “In-Situ Determination of Specific Surface Area of Clays,” *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 37, no. 1, pp. 465–474, 2019, doi: 10.1007/s10706-018-0623-7.
- [35] S. Hénin, J. Chaussidon, and R. Calvet, “Surface, forme et croissance des minéraux des argiles,” *Bull. du Groupe français des argiles*, vol. 21, no. 1, pp. 31–45, 1969, doi: 10.3406/argil.1969.1106.
- [36] H. Mohamed, “Par : T hème Contribution à l ’ amélioration du procédé de fabrication de la céramique Etude sur site : unité Maghreb céramique de Touggourt,” 2007.
- [37] M. Samara, “POLLUES APRES INERTAGE DANS LA BRIQUE Mazen Samara To

- cite this version : HAL Id : tel-00713676 Valorisation des sédiments fluviaux pollués après,” 2012.
- [38] V. I. Osipov, “Structural bonds and the properties of clays,” *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* - *Bull. l’Association Int. Géologie l’Ingénieur*, vol. 12, no. 1, pp. 13–20, 1975, doi: 10.1007/BF02635423.
- [39] P. M. Amarasinghe, A. Anandarajah, and P. Ghosh, “Molecular dynamic study of capillary forces on clay particles,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 88–89, pp. 170–177, 2014, doi: 10.1016/j.clay.2013.12.022.
- [40] “Statistiques OCDE.” <https://stats.oecd.org/index.aspx?lang=fr#> (accessed Jun. 04, 2020).
- [41] E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, and L. O. Meida, “Missions from \* the,” *Carbon N. Y.*, vol. 26, pp. 303–329, 2001, doi: 10.1146/annurev.energy.26.1.303.
- [42] B. B. A. G. Bossink and H. J. H. Brouwers, “CONSTRUCTION WASTE : QUANTIFICATION AND SOURCE EVALUATION,” vol. 122, no. MARCH, pp. 55–60, 1996.
- [43] F. Asdrubali, C. Baldassarri, and V. Fthenakis, “Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings,” *Energy Build.*, vol. 64, pp. 73–89, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.04.018.
- [44] UNESCO and Craterre, *Earthen architecture in today’s world*. 2012.
- [45] I. Engineering, “History of earth building techniques 12,” pp. 307–323, 2012, doi: 10.1533/9780857096166.3.307.
- [46] H. Schroeder, *Sustainable Building with Earth*. .
- [47] “CRAterre :: Présentation.” <http://craterre.org/presentation/> (accessed Jun. 14, 2020).
- [48] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali, “Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 29, pp. 512–519, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054.
- [49] S. Deboucha and R. Hashim, “A review on bricks and stabilized compressed earth blocks,” *Sci. Res. Essays*, vol. 6, no. 3, pp. 499–506, 2011, doi: 10.5897/SRE09.356.
- [50] B. Little and T. Morton, “Building with earth in Scotland: Innovative design and sustainability,” pp. 1–72, 2001, [Online]. Available: <http://www.arc->

- architects.com/downloads/Buildng-With-Earth-in-Scotland-Report-2002.pdf%0Ahttps://www.webarchive.org.uk/wayback/archive/20170401194558/http://www.gov.scot/Publications/2002/02/10646/File-1.
- [51] F. Champire, “Étude Expérimentale Du Comportement Hydro-Mécanique De La Terre Crue Compactée Pour La Construction,” p. 189, 2017, [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01698988/documentarable>.
- [52] N. Khalili, A. R. Russell, and A. Khoshghalb, *Unsaturated soils : research & applications : proceedings of the Sixth International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2014, Sydney, Australia, 2-4 July 2014.* .
- [53] J. C. Morel, A. Mesbah, M. Oggero, and P. Walker, “Building houses with local materials: Means to drastically reduce the environmental impact of construction,” *Build. Environ.*, vol. 36, no. 10, pp. 1119–1126, 2001, doi: 10.1016/S0360-1323(00)00054-8.
- [54] “British clay stratigraphy,” *Geological Society Engineering Geology Special Publication*, vol. 21. pp. 153–175, 2006, doi: 10.1144/GSL.ENG.2006.021.01.06.
- [55] L. A. Mango-Itulamy, “Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée,” 2019.
- [56] H. Guillaud, T. Joffroy, and P. Odul, “6019\_BTC\_Manuel\_de\_conception\_construction.pdf.” 1995.
- [57] M. C. N. Villamizar, V. S. Araque, C. A. R. Reyes, and R. S. Silva, “Effect of the addition of coal-ash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 276–286, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.056.
- [58] A. S. Muntohar, “Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 11, pp. 4215–4220, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.061.
- [59] B. Taallah, “Étude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres,” p. 202, 2014, [Online]. Available: [http://thesis.univ-biskra.dz/1173/1/Geni\\_civil\\_d4\\_2014.pdf](http://thesis.univ-biskra.dz/1173/1/Geni_civil_d4_2014.pdf).
- [60] P. L.-K. Narcisse.MANDALA, “Étude des caractéristiques mécaniques d ’ une brique en terre stabilisée à l ’ aide de la mélasse de canne à sucre,” *Cames*, vol. 2, no. January, pp. 1–9, 2018.

- [61] V. Thirion-merle, “Spectrométrie de fluorescence X Valérie Thirion-Merle To cite this version : HAL Id : hal-01393984 Spectrométrie de fluorescence X,” *Univ. Lyon*, 2014.
- [62] D. Miraucourt, “Stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée au Burkina Faso,” p. 103, 2017, [Online]. Available: <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/2539>.
- [63] G. Djafri and N. Chelouah, “Influence of the diameter of ground date pits on the technological properties of clay bricks,” *Ceramica*, vol. 64, no. 372, pp. 589–597, 2018, doi: 10.1590/0366-69132018643722483.
- [64] M. B. KIM, “DOCTORAT DE L ’ UNIVERSITÉ DE TOULOUSE Titre :,” no. May, 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.18816.89609.
- [65] E. B. Ojo, K. O. Bello, K. Mustapha, R. S. Teixeira, S. F. Santos, and H. Savastano, “Effects of fibre reinforcements on properties of extruded alkali activated earthen building materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 227, p. 116778, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116778.
- [66] S. Djadouf, N. Chelouah, and A. Tahakourt, “Influence de la distribution en taille (broyat de noyaux d’olive) sur les propriétés de la brique,” *Matériaux Tech.*, vol. 107, no. 4, p. 403, 2019, doi: 10.1051/mattech/2019024.
- [67] H. Bal, Y. Jannot, N. Quenette, A. Chenu, and S. Gaye, “Water content dependence of the porosity, density and thermal capacity of laterite based bricks with millet waste additive,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 144–150, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.063.
- [68] C. Galán-Marín, C. Rivera-Gómez, and J. Petric, “Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 8, pp. 1462–1468, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.01.008.
- [69] M. Bouhicha, F. Aouissi, and S. Kenai, “Performance of composite soil reinforced with barley straw,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 5, pp. 617–621, 2005, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.013.
- [70] K. Al Rim, A. Ledhem, O. Douzane, R. M. Dheilily, and M. Queneudec, “Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 21, no. 4, pp. 269–276, 1999, doi: 10.1016/S0958-9465(99)00008-6.

- [71] A. Ledhem, R. M. Dheilily, M. L. Benmalek, and M. Quéneudec, “Properties of wood-based composites formulated with aggregate industry waste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 14, no. 6–7, pp. 341–350, 2000, doi: 10.1016/S0950-0618(00)00037-4.
- [72] H. M. Algin and P. Turgut, “Cotton and limestone powder wastes as brick material,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 1074–1080, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.006.
- [73] P. Meukam, A. Noumowe, Y. Jannot, and R. Duval, “Caractérisation thermophysique et mécanique de briques de terre stabilisées en vue de l’isolation thermique de bâtiment Thermophysical and mechanical characterization of stabilized clay bricks for building thermal insulation,” *Mater. Struct.*, vol. 36, no. 7, pp. 453–460, 2003, doi: 10.1007/bf02481525.
- [74] G. Ateliers and J. Laurent, “Propriétés thermiques du matériau terre Plan de la présentation,” *8 ème Festiv. des Archit. terre “Grains d’Isère 2010,”* 2010.
- [75] P. Minist *et al.*, “Amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques de l’ argile rouge de Mraguen ( Adrar ),” 2015.
- [76] W. J. McHardy, M. J. Wilson, and M. Tait, “Electron microscope and X-ray diffraction studies of filamentous illitic clay from sandstones of the Magnus Field,” *Clay Miner.*, vol. 17, no. 1, pp. 23–40, Mar. 1982, doi: 10.1180/claymin.1982.017.1.04.
- [77] H. Fetiha, “Utilisation des matériaux locaux de la région de timimoun comme un matériau de construction(btc),” Université Ahmed Draia Adrar, 2016.
- [78] Y. Millogo, J. E. Aubert, A. D. Séré, A. Fabbri, and J. C. Morel, “Earth blocks stabilized by cow-dung,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 49, no. 11, pp. 4583–4594, 2016, doi: 10.1617/s11527-016-0808-6.

## Annexes

### Annexe I

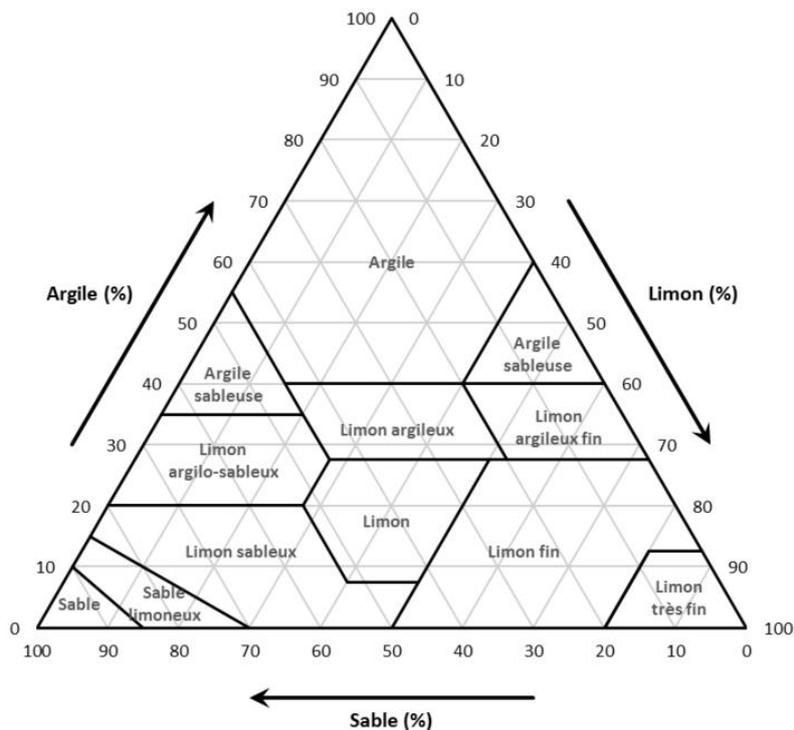


Figure 1 - Triangle des textures pour la classification des sols.

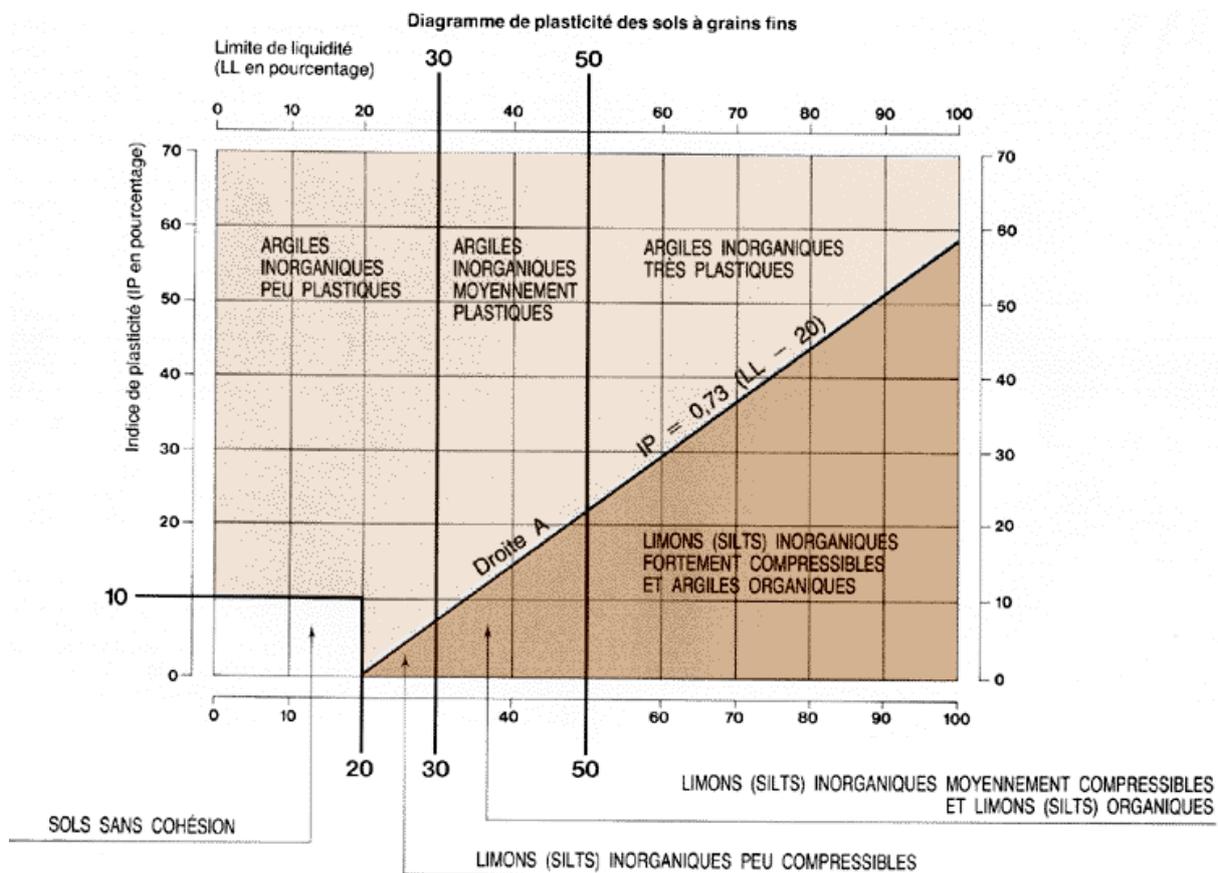


Figure 2 - digramme de plasticité des sols à grains fins (Casagrande).

## Annexe II

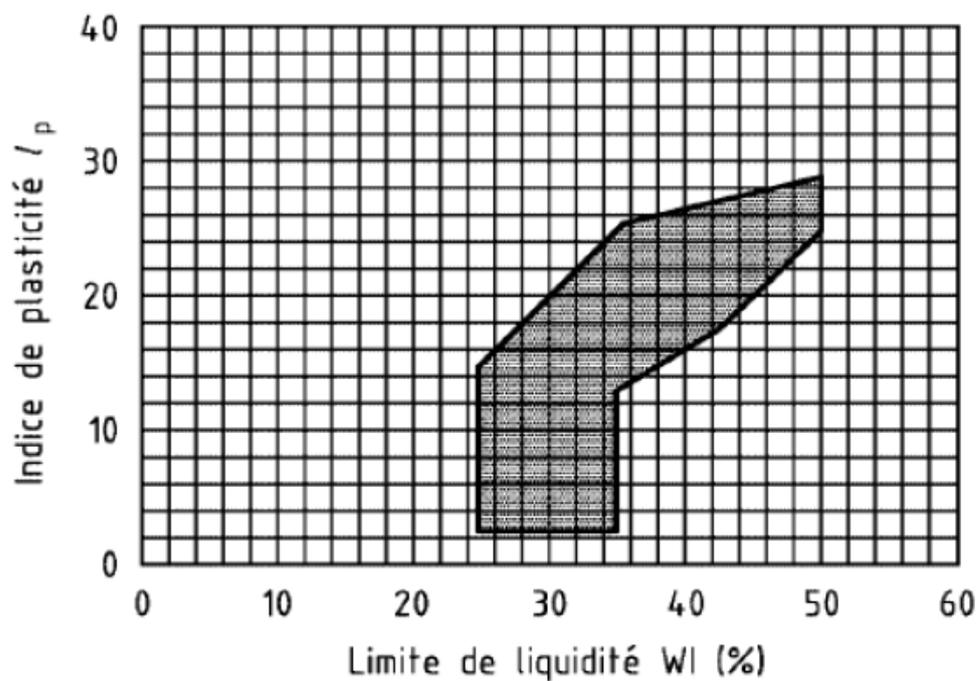


Figure 3 - Fuseau du diagramme de plasticité des terres utilisé pour les BTC (AFNOR, 2001).

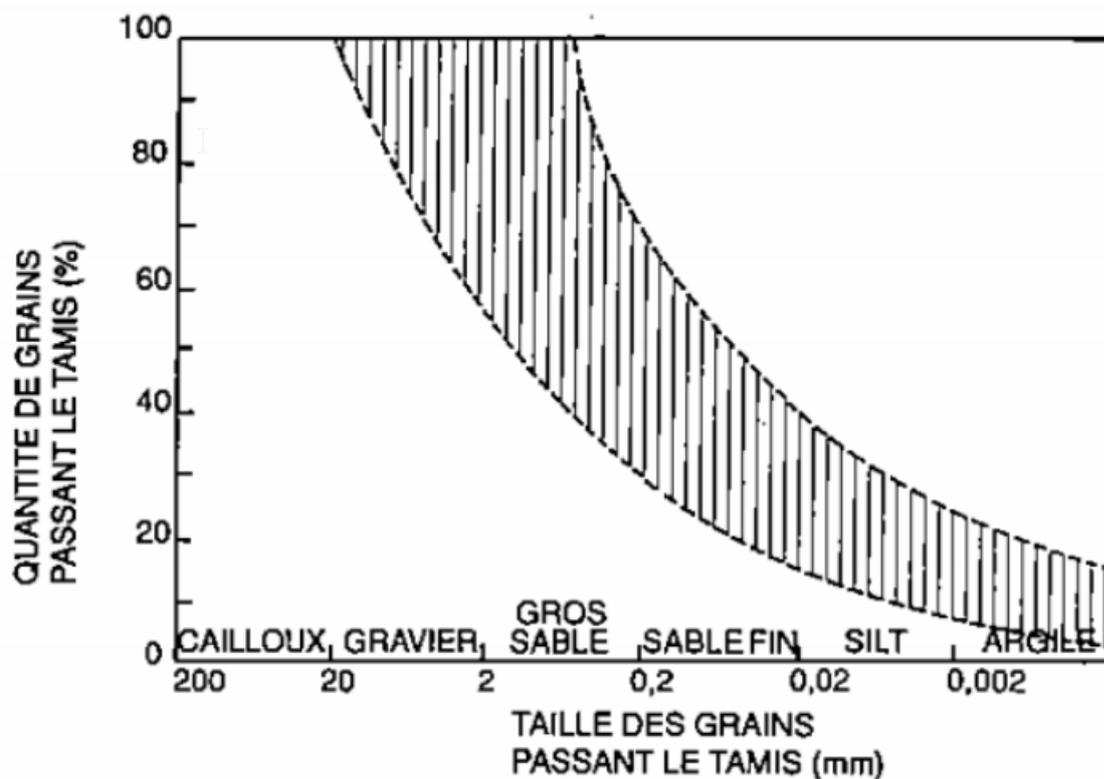


Figure 4 Domaine granulométrique conseillé par Rigassi (1995) pour construire en BTC.

## Annexe III

Tableau 1 - Références des normes algériennes des briques.

N°	Référence	Date	Intitulé	Equivalent
01	NA 5020	1995	Briques pleines, briques perforées, blocs pleins et blocs creux	EN 771-2
02	NA 5021	1995	Briques extérieurs et briques de parement	EN 771
03	NA 5022	1995	Détermination des masses volumiques apparentes	EN 771
04	NA 5023	1995	Détermination de la résistance à la compression	EN 771
05	NA 5024	1995	Détermination de la résistance au gel	EN 771
06	NA 1707	2006	Spécifications pour éléments de maçonnerie complément de la norme NA 5639	NF P 12-021-2
07	NA 5639	2006	Spécifications pour éléments de maçonnerie	NF P51-301
08	NA 5568	2005	Briques pour la construction de conduits de fumée	EN 771-3

Tableau 2 – Exemples de projets réalisés en terre crue en Algérie.

Année	Réalisation
1969	Réalisation de 136 logements en pisé au village agricole de Bouhlilet à Batna.
1971	Une équipe franco-belge réalise à Zéralda un groupe expérimental d'habitations rurales.
1973	30 des 300 logements du village de Mustapha ben Brahim, sont réalisés en pisé.
1975	Le village d'Abadla a été construit selon le procédé de la terre remplissante
1976	100 logements du village agricole de Felliache à Biskra sont réalisés en Toub.
1980	120 logements du village agricole de Madher à Boussaada sont réalisés en BTS.
1981	40 logements sont réalisés à Cheraga près d'Alger en blocs de terre comprimée (BTC).
1984	Un prototype bioclimatique fut réalisé à Tamanrasset en BTC. Un prototype fut réalisé au CNERIB en BTC.
1986	10 logements sont réalisés à Adrar en BTC. 10 logements sont réalisés à Reggane en BTC.
1994	24 logements sont réalisés à Tamanrasset par l'office de promotion et de gestion immobilière en BTC. 44 logements sont réalisés par l'ETR de Tamanrasset en BTC.
1998	Un prototype en pisé fut réalisé au CNERIB.
2006	Un projet intitulé « réalisation d'un logement rural avec efficacité énergétique » est lancé au CNERIB et financé par l'union européenne.

## Résumé

Le processus de production des matériaux de construction conventionnels consomme une grande quantité d'énergie et matières premières non renouvelable ce qui a un impact négatif sur l'environnement. De ce fait le développement de nouveaux matériaux de construction par l'incorporation de déchets agricole dans la fabrication de briques comprimée crue (BTC) s'avère être une option prometteuse qui bénéficie d'un regain d'intérêt par la communauté scientifique, et représente une nouvelle manière de valoriser les déchets générés par le secteur agricole.

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer l'effet de l'ajout de noyaux de dattes broyées (NDB) sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques d'une brique d'argile non cuite comprimée. À cet effet, des quantités croissantes de NDB (0, 5, 10, 15 et 20% en poids) de différents diamètres ont été mélangées avec une argile pour produire des briques par compression à l'aide d'une presse hydraulique. Les effets sur le retrait, la plasticité, la densité et les propriétés mécaniques et thermiques ont été scrutés.

Cette étude a montré que la nature organique (forte teneur en cellulose) des NDB a conduit à l'augmentation des quantités d'eau nécessaire pour obtenir la plasticité. Ce qui a mené à un retrait plus important après séchage. L'augmentation des quantités et diamètres des NDB dans l'argile a entraîné une réduction de la résistance mécanique accompagnée d'une réduction de la densité des briques. En revanche, la résistance thermique et le pouvoir isolant des briques composites (argile + NDP) ont été nettement améliorés.

En conséquence, les noyaux de dattes peuvent être utilisés en tant qu'ajouts organiques dans le but de fabriquer des produits destinés à l'isolation thermique.

### Mots clés :

Noyaux de dattes, Argile, Bloc de Terre comprimée, Propriétés mécaniques, Propriétés physiques, Isolation thermique.

## **Abstract**

The production process of conventional building materials consumes a large amount of energy and non-renewable raw materials which has a negative impact on the environment. As a result, the development of new construction materials by incorporating agricultural waste into the manufacture of raw compressed bricks (BTC) is proving to be a promising option which is benefiting from renewed interest by the scientific community, and represents a new way of recovering waste generated by the agricultural sector.

The main objective of this study was to evaluate the effect of the addition of crushed date pits (NDB) on the physic-mechanical and thermal properties of a compressed unfired clay brick. For this purpose, increasing amounts of NDB (0, 5, 10, 15 and 20% by weight) of different diameters were mixed with a clay to produce bricks by compression using a hydraulic press. The effects on shrinkage, plasticity, density, and mechanical and thermal properties were examined.

This study showed that the organic nature (high cellulose content) of NDB led to the increased amounts of water needed to achieve plasticity. This led to greater shrinkage after drying. The increase in the quantities and diameters of NDBs in the clay has resulted in a reduction in mechanical strength accompanied by a reduction in the density of the bricks. On the other hand, the thermal resistance and the insulating power of composite bricks (clay + NDP) have been markedly improved.

As a result, date stones can be used as organic additions for the purpose of making products for thermal insulation.

### **Key words:**

Date pits, Clay, Compressed Earth Block, Mechanical properties, Physical properties, Thermal insulation.

## ملخص

تستهلك عملية إنتاج مواد البناء التقليدية كمية كبيرة من الطاقة والمواد الخام غير المتجددة التي لها تأثير سلبي على البيئة. ونتيجة لذلك، فإن تطوير مواد بناء جديدة من خلال دمج المخلفات الزراعية في صناعة الطوب الخام المضغوط (BTC) يثبت أنه خيار واعد يستفيد من الاهتمام المتجدد من قبل المجتمع العلمي، ويمثل طريقة جديدة لاستعادة النفايات الناتجة عن القطاع الزراعي.

لهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقييم تأثير إضافة أحجار التمر المسحوقة (NDB) على الخواص الفيزيائية-الميكانيكية والحرارية للطوب الطيني المضغوط غير المقشور. لهذا الغرض، تم خلط كميات متزايدة من NDB (0، 5، 10، 15 و 20٪ بالوزن) بأقطار مختلفة مع الطين لإنتاج الطوب عن طريق الضغط باستخدام مكبس هيدروليكي. تم فحص التأثيرات على الانكماش واللدونة والكثافة والخصائص الميكانيكية والحرارية.

أظهرت هذه الدراسة أن الطبيعة العضوية (المحتوى العالي من السليلوز) لمواد NDB أدت إلى زيادة كميات الماء اللازمة لتحقيق اللدونة. هذا أدى إلى انكماش أكبر بعد التجفيف. أدت الزيادة في كميات وأقطار NDB في الطين إلى انخفاض في القوة الميكانيكية مصحوبًا بتقليل كثافة الطوب. من ناحية أخرى، تم تحسين المقاومة الحرارية وقوة العزل للطوب المركب (الطين + NDP) بشكل ملحوظ.

نتيجة لذلك، يمكن استخدام أحجار التمر كإضافات عضوية لغرض صنع منتجات للعزل الحراري.

## الكلمات الدالة:

حفر التمر، الطين، كتلة التربة المضغوطة، الخواص الميكانيكية، الخصائص الفيزيائية، العزل الحراري.

---

## Résumé

Le processus de production des matériaux de construction conventionnels consomme une grande quantité d'énergie et matières premières non renouvelable ce qui a un impact négatif sur l'environnement. De ce fait le développement de nouveaux matériaux de construction par l'incorporation de déchets agricole dans la fabrication de briques comprimée crue (BTC) s'avère être une option prometteuse qui bénéficie d'un regain d'intérêt par la communauté scientifique, et représente une nouvelle manière de valoriser les déchets générés par le secteur agricole.

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer l'effet de l'ajout de noyaux de dattes broyées (NDB) sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques d'une brique d'argile non cuite comprimée. À cet effet, des quantités croissantes de NDB (0, 5, 10, 15 et 20% en poids) de différents diamètres ont été mélangées avec une argile pour produire des briques par compression à l'aide d'une presse hydraulique. Les effets sur le retrait, la plasticité, la densité et les propriétés mécaniques et thermiques ont été scrutés.

Cette étude a montré que la nature organique (forte teneur en cellulose) des NDB a conduit à l'augmentation des quantités d'eau nécessaire pour obtenir la plasticité. Ce qui a mené à un retrait plus important après séchage. L'augmentation des quantités et diamètres des NDB dans l'argile a entraîné une réduction de la résistance mécanique accompagnée d'une réduction de la densité des briques. En revanche, la résistance thermique et le pouvoir isolant des briques composites (argile + NDP) ont été nettement améliorés.

En conséquence, les noyaux de dattes peuvent être utilisés en tant qu'ajouts organiques dans le but de fabriquer des produits destinés à l'isolation thermique.

### Mots clés :

Noyaux de dattes, Argile, Bloc de Terre comprimée, Propriétés mécaniques, Propriétés physiques, Isolation thermique.

---

## Abstract

The production process of conventional building materials consumes a large amount of energy and non-renewable raw materials which has a negative impact on the environment. As a result, the development of new construction materials by incorporating agricultural waste into the manufacture of raw compressed bricks (BTC) is proving to be a promising option which is benefiting from renewed interest by the scientific community, and represents a new way of recovering waste generated by the agricultural sector.

The main objective of this study was to evaluate the effect of the addition of crushed date pits (NDB) on the physic-mechanical and thermal properties of a compressed unfired clay brick. For this purpose, increasing amounts of NDB (0, 5, 10, 15 and 20% by weight) of different diameters were mixed with a clay to produce bricks by compression using a hydraulic press. The effects on shrinkage, plasticity, density, and mechanical and thermal properties were examined.

This study showed that the organic nature (high cellulose content) of NDB led to the increased amounts of water needed to achieve plasticity. This led to greater shrinkage after drying. The increase in the quantities and diameters of NDBs in the clay has resulted in a reduction in mechanical strength accompanied by a reduction in the density of the bricks. On the other hand, the thermal resistance and the insulating power of composite bricks (clay + NDP) have been markedly improved.

As a result, date stones can be used as organic additions for the purpose of making products for thermal insulation.

### Key words:

Date pits, Clay, Compressed Earth Block, Mechanical properties, Physical properties, Thermal insulation.

---