



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université KASDI MERBAH – OUARGLA

Faculté des Sciences appliquées

Département de Génie Civil et Hydraulique

Mémoire

**Présenté en vue d'obtention du diplôme de
MASTER**

Filière : Travaux publics

Option : VOA

Présenté par

DOUIB Yousra

Thème

**Étude des propriétés thermo-mécaniques
des briques de terre renforcées par
des fibres de palmiers dattier traitées
par la chaux**

Soutenu publiquement le 03/07/2019 devant le jury composé de:

Mr. DJOUHRI. M	MCB	Université d'Ouargla	Président
Mr. BELFEREG. A	MCB	Université d'Ouargla	Examineur
Mr. CHAIB. H	MCB	Université d'Ouargla	Rapporteur
Mr. KRIKER. A	Professeur	Université d'Ouargla	Co-Rapporteur

Résumé :

Les régions sahariennes de notre pays ont un climat chaud et sec en été, froid et sec en hiver, les matériaux de construction usuellement utilisés dans ces régions sont le béton ou le mortier qui présentent de mauvaises propriétés thermiques. Dans un souci de fabriquer des briques en terre ayant des bonnes propriétés mécaniques et thermiques a fait l'objet de cette étude. Le présent travail est le résultat d'un travail expérimental touchant deux vastes domaines des sciences appliquées la mécanique et la thermique du bâtiment. L'objectif visé dans ce travail est l'étude des propriétés thermo-mécaniques des briques de terre (argile) choisi comme matériau de référence renforcées par des fibres de palmiers dattier traitées par la chaux et après stabilisé par le ciment blanc. Dans ce cadre on a utilisé sept teneurs en chaux (5, 10, 15, 20, 25, 50, 75%) et cinq teneur en ciment blanc (1, 2, 3, 4, 5%) dans la fabrication des brique, suivi par des essais mécaniques et thermiques en fin pour obtenir une synthèse générale.

Mots clés : Brique, Argile, Chaux, Sable des dunes .Propriété mécanique, propriété thermique.

ملخص :

تتمتع المناطق الصحراوية في بلدنا بمناخ حار وجاف في فصل الصيف، بارد وجاف في فصل الشتاء، ومواد البناء المستخدمة عادة في هذه المناطق هي الخرسانة أو الملاط التي لها خصائص حرارية سيئة. من أجل صنع الطوب الطيني ذو الخواص الميكانيكية والحرارية الجيدة كان موضوع هذه الدراسة. هذا العمل هو نتيجة للعمل التجريبي في مجالين واسعين من العلوم التطبيقية، الميكانيكي والحراري. الهدف من هذا العمل هو دراسة الخواص الحرارية والميكانيكية للطوب الأرضي (الطين) التي تم اختيارها كمادة مرجعية معززة بألياف نخيل التمر المعالجة بالجير وبعد ذلك تم استقرارها بالإسمنت الأبيض. في هذا السياق، استخدمت سبعة محتويات الجير (5، 10، 15، 20، 25، 50، 75%) وخمسة محتويات لإسمنت الأبيض (1، 2، 3، 4، 5%) في صناعة الطوب، تليها الاختبارات الميكانيكية والحرارية في النهاية للحصول على تركيب عام. **كلمات المفتاح:** الطوب، الطين، الجير، رمل الكثبان، الخصائص الميكانيكية، الخصائص الحرارية.

ABSTRACT:

The Saharan regions of our country have a hot and dry climate in summer, cold and dry in winter; building materials ordinarily used in these regions are concrete or mortars which introduce poor thermal ownership. In a worry to fabricate bricks on earth having good mechanical and thermal ownership been the object of this study. The present report is the result of an experimental job touching two vast domains of applied sciences the mechanics and the thermal of the building. The purposeful objective in this job is the study of the thermo-mechanical ownership of the bricks of earth (klay) chosen as reference material reinforced by grains of palms date palm stabilized by lime. In this frame they used seven content of lime (5, 10, 15, 20, 25, 50, and 75%) in the manufacture of the brick, followed by mechanical and thermal tests at the end to acquire a general synthesis.

KEYWORDS: Brick, Klay, Lime, Sand of the dunes, mechanical properties, thermal properties

Sommaire

Dédicace	
Remerciement	
Résumé	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Notations utilisées	
Introduction générale	
Chapitre I : Etude bibliographique	
A) Généralités sur les Techniques de Production des Briques et leurs Propriétés Thermo-mécaniques	
I.1 Introduction	1
I.2 Briques de terre crue	1
I.2.1 L'adobe	1
I.2.2 Le pisé	4
I.2.3 Le torchis	6
I.2.4 La brique de terre crue compressée (BTC)	9
I.2.5 Les caractéristiques de brique terre crue (adobe, pisé, Brique de terre comprimée)	11
I.3 Briques de terre cuite	12
I.3.1 Matière première	12
I.3.2. Processus de production	12
I.3.2.1 L'extraction	12
I.3.2.2 La préparation des matières premières	13
I.3.2.3 La préparation pour le broyage et malaxage	13
I.3.2.4 Le moulage ou façonnage	13
I.3.2.5 Séchage	14

I.3.2.6 Cuisson	15
I.3.2.7 Emballage	15
I.3.3. Les produits de briques en terre cuite	16
I.3.3.1. Brique silico-calcaire	16
I.3.3.2. Les briques ordinaires	18
I.3.3.3. Les briques creuses	19
I.3.3.4. Propriétés thermo-mécaniques de quelques briques	19
I.4. Conclusion	19
B) Quelques Données sur la Région d'étude.	
I.1. Situation Géographique	21
I.2. Climat de la région	21
I.2.1. La Température	22
I.2.2. Précipitation	23
I.2.3. L'Insolation :	23
I.2.4. Les Vents	24
I.2.5. L'évaporation	24
I.2.6. L'humidité	25
I.3. Conclusion	26
Chapitre II : Les caractéristiques des matériaux utilisés	
II.1. Introduction	27
II.2. Le sable de dunes	27
II. 2.1. Analyse granulométrique	28
II.2.2.Masse volumique	29
II.2.3. Equivalent de Sable	30
II.2.4. Analyse chimique	31
II.2.5. Diffraction des rayons X (DRX)	31
II.3. l'Argile	32
II.3.1. Analyse granulométrique par sédimentation	33
II.3.2. Densité sèche	35

II.3.3. Bleu de méthylène	35
II.3.4. Limite d'Atterberg	35
II.3.5. Analyse chimique	<i>37</i>
II.3.6. Diffraction des rayons X (DRX)	37
II.4. Les Fibres	38
II.4.1. Caractéristiques des Fibres de palmier dattier	39
II.4.2. Composition chimiques des fibres de palmier dattier	39
II.5. La chaux	39
II.5.1. Mécanismes	40
II.5.2. Domaine d'application	41
II.5.3. La composition chimique	41
II.6. Ciment blanc	42
II.6.1. Le processus de fabrication du ciment blanc	43
II.6.2. Types et domaines d'application	43
II.7. Eau de gâchage	44
II.8. Conclusion	45
Chapitre III : Résultats et interprétations	
III.1. Introduction	46
III.2. Essais réalisés pour la détermination des propriétés thermomécaniques	46
III.2.1. Essais mécaniques	46
III.2.1.1. Essai de la résistance de traction par flexion	46
III.2.1.2. La Résistance à la Compression	47
III.2.1.3. Vitesse de propagation du son	48
III.2.2. Essai thermique	48
III.3. Préparation et confection des briques	50
III.4. Résultats obtenus et discussion	51
III.4.1. Traitement par chaux	51

III.4.1.1. La masse volumique	51
III.4.1.2. Caractéristiques mécaniques	52
III.4.1.3. Propriété thermique	54
III.4.2. Stabilisation par ciment blanc	57
III.4.2.1. La masse volumique	57
III.4.2.2. Caractéristiques mécaniques	58
III.4.2.3. propriété thermique	61
III.5. Conclusion	64
Chapitre IV : Analyse et simulation	
IV.1. Introduction	65
IV.2. Volumes élémentaires représentatifs (V.E.R)	65
IV.3. Homogénéisation V.E.R périodique	66
IV.4. Les logiciels de simulations par éléments finis	66
IV.5. Logiciel ABAQUS	67
IV.6. Analyse des contraintes linéaires	68
IV.6.1. Vue d'ensemble de l'analyse des contraintes linéaires	69
IV.7. Easy PBC	69
IV.8. Etude mécanique	70
IV.8.1. Conception assistée par ordinateur du modèle V.E.R.	70
IV.8.2. Définition des propriétés	70
IV.8.3. Création d'assemblage	71
IV.8.4. Création une technique de maillage	71
IV.8.5. Les résultats	73
IV.8.5.1. Exécution complète avec Easy PBC	73
IV.8.5.2. Les modules de Young et les coefficients de Poisson	73
IV.8.5.3. Les module de cisaillement	74
IV.8.6. Les interprétations	78

IV.9. Etude thermique	79
IV.9.1. Évolution de la température	79
IV.9.2. Les interprétations	80
IV.10. Conclusion	81
Conclusion générale et recommandations	82
Bibliographique	
Annexe	

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Etude bibliographique

A) Généralités sur les Techniques de Production des Briques et leurs Propriétés Thermo-mécaniques

Figure I.1 : A gauche : des adobes au séchage sous soleil. A droite : construction en adobe	2
Figure I.2 : moule de l'adobe	3
Figure I.3 : Ancienne construction en pisé	5
Figure I.4 : Mise en œuvre du coffrage du pisé suivant la méthode lyonnaise	5
Figure I.5 : Mise en œuvre du coffrage du pisé suivant la méthode du Bugey d'après Pignal	5
Figure I.6 : construction en torchis	7
Figure I.7 : Différents types du torchis	8
Figure I.8 : Presse manuelles	10
Figure I.9 : Presses motorisées	10
Figure I.10 : Types de blocs de terres comprimées	11
Figure I.11 : Gisement d'argile de B. amer à Ouargla	12
Figure I.12 : Broyage et malaxage de l'argile	13
Figure I.13 : Moulage et façonnage	14
Figure I.14 : A gauche : séchage à l'air libre. Adroite : séchage artificiel	15
Figure I.15 : Cuisson des briques	15
Figure I.16 : Description schématique clair du processus de production de BTC...	16
Figure I.17 : Briques pleins et perforées	18

B) Quelques données sur la région d'étude

Figure I.1 : Situation géographique de la région d'Ouargla.....	21
Figure I.2 : La température mensuelle moyenne de la région d'Ouargla (2018)	23
Figure I.3 : La précipitation mensuelle moyenne de la région d'Ouargla (2018)	23
Figure I.4 : Durée mensuelle moyenne d'isolation de la région d'Oouargla	24
Figure I.5 : Le vent mensuel moyen de la région d'Ouargla (2018)	24

Figure I.6 : L'évaporation mensuelle moyenne de la région d'Ouargla (2018)	25
Figure I.7 : L'humidité mensuelle moyenne de la région d'Ouargla (2018)	25

Chapitre II : les caractéristiques des matériaux utilisé

Figure II.1: Sable des dunes	27
Figure II.2: Courbe granulométrique de sable	29
Figure II.3: Définition de l'équivalent de sable	30
Figure II.4: Analyse chimiques de sable des dunes	31
Figure II.5: Diffractogramme de sable des dunes	32
Figure II.6: Echantillon de l'argile utilisé	33
Figure II.7: Courbe granulométrique d'argile	34
Figure II.8: Présentation des limites d'atterbeg	36
Figure II.9: Abaques de CAZAGRANDE de l'argile	37
Figure II.10: Analyse chimiques d'argile	37
Figure II.11: Défractogramme d'argile	38
Figure II.12: Le lif après son arrachement du palmier dattier	39
Figure II.13: Les fibres résultant de la décomposition du lif	39
Figure II.14: Les fibres découpées en morceaux	39
Figure II.15: Analyse chimiques de ciment blanc	44

Chapitre III : Résultats et interprétations

Figure III.1: Dispositif pour l'essai de traction par flexion	47
Figure III.2: Dispositif de rupture en compression	47
Figure III.3: Mécanisme de l'appareille d'ultrasonique	48
Figure III.4: La sonde Hot Disk	49
Figure III.5: Dispositif de serrage	49
Figure III.6: Mesure de propriétés thermique à l'aide du system «Hot Disk»	49
Figure III.7: Variation de la masse volumique des briques en fonction du pourcentage de la chaux	51
Figure II.8: Résistance de la flexion des briques en terre	52

Figure II.9: Résistance de la compression des briques en terre	53
Figure III.10 : La vitesse de propagation du son des briques.	54
Figure III.12 : Résistance Thermique en fonction de pourcentage de lachaux	56
Figure III.13 : La chaleur spécifique en fonction de pourcentage de lachaux	56
Figure III.14 :	57
Figure III.15 : Résultats de la masse volumique	58
Figure III.16: Résistance de la flexion des briques en terre	59
Figure III.17: Résistance de la compression des briques en terre.	60
Figure III.18: La vitesse de propagation du son des briques.	61
Figure III.19: La conductivité thermique en fonction de pourcentage de ciment blanc	61
Figure III.20 : La résistance thermique en fonction de pourcentage de ciment blanc	63
Figure III.21: La chaleur spécifique en fonction de pourcentage de ciment blanc	63

Chapitre IV : Analyse et simulation

Figure IV.1: Représentation d'un composant composite à deux phasesaccumulation de V.E.R.	65
FigureIV.2: Représentation schématique de la limite de déplacementconditions nécessaires pour estimer les propriétés élastiques effectives.	66
Figure IV.3 : Organisation de l'interface Abaqus CAE (Complete Abaqus Environnement)	68
Figure IV.4 : Réalisation d'une simulation numérique sous Abaqus CAE.	68
Figure.5. Les paramètres géométriques du V.E.R.	70
Figure.6. l'assemblage matrice et fibre.	71
Figure IV.7 : type d'elemetdemaillage utilisé	71
Figure IV.8 : Choisir type d 'element et technique de balayage.	72
Figure IV.9 : Choisir imposer un maillage régulier	72

Figure IV.10 : Résultat de maillage EF du modèle V.E.R (9780 element)	72
Figure IV.11 : Fenêtre principale d'EasyPBC.	73
Figure IV.12 : module de Young E_{11} et le coefficient de Poisson ν_{12} et ν_{13} .	73
Figure IV.13 : Le champ de contrainte de Von Mises correspondant à les charges traction .	74
Figure IV.14 : module de cisaillement G_{12}	75
Figure IV.15 : Le champ de contrainte de Von Mises correspondant à les charges de cisaillement.	75
Figure IV.16 : Le champ des déformations et des déplacements correspondant aux charges des tractions	76
Figure IV.17 : Le champ des déformations et des déplacements correspondant aux charges des cisaillements	77
Figure IV.18. Condition aux limites thermiques.	79
Figure IV.19. La distribution de la température sur le VER.	79
Figure IV.20. Répartition de la température sur le long de VER.	80

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I. Etude bibliographique

A) Généralités sur les Techniques de Production des Briques et leurs Propriétés Thermo-mécaniques

Tableau I.1: les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé et BTC) 11

Tableau I.2: propriétés thermo-mécaniques de quelques briques en terre cuites. 19

Quelques données sur la région d'étude

Tableau I.1: les données climatiques de la région d'Ouargla (2018) 22

Chapitre II : les caractéristiques des matériaux utilisé

Tableau II.1 : Résultats d'analyse granulométrie de sable des dunes 28

Tableau II.2 : Analyse granulométrie d'argile 33

Tableau II.3 : Valeur de bleu de méthylène de l'argile utilisé 35

Tableau II.4 : Classification des argiles selon BURMISTER 36

Tableau II.5 : Classification des argiles selon atterbeg 36

Tableau II.6 : Analyse chimique de la poudre des fibres calcinées à 400°C 39

Tableau II.7 : Analyse chimique de la chaux éteint (selon la fiche technique élaborée par l'unité de production de chaux de Ghardaïa, Algérie) 42

Tableau II.8 : Types et domaines d'application de ciment blanc 43

Tableau II.9 : Composition chimique de l'eau 44

Chapitre III : Résultats et interprétations

Tableau III.1 : compositions utilisées 50

Tableau III.2 : Résultats de la variation de la masse volumique des briques 51

Tableau III.3 : Résultats de la résistance à la flexion des briques 52

Tableau III.4 : Résultats de la résistance à la compression des briques 53

Tableau III.5 : Résultats de la vitesse de propagation du son des briques 54

Tableau III.6: Les valeurs de la conductivité thermique λ des briques stabilisé par chaux 55

Tableau III.7: Les valeurs de la résistance thermique R_{th} des briques stabilisé par chaux 56

Tableau III.8: Les valeurs de La chaleur spécifique des briques stabilisé par la chaux 56

Tableau III.10: compositions utilisés 57

Tableau III.11 : Résultats de la variation de la masse volumique des briques	57
Tableau III.12 : Résultats de la résistance à la flexion des briques	58
Tableau III.13 : Résultats de la résistance à la compression des briques	59
Tableau III.14 : Résultats de la vitesse de propagation du son des briques.	60
Tableau III.15 : Les valeurs de la conductivité thermique λ des briques stabilisé par ciment blanc	61
Tableau III.16 : Les valeurs de la résistance thermique R_{th} des briques stabilisé par ciment blanc	62
Tableau III.17 : Les valeurs de La chaleur spécifique de ciment blanc stabilisé par la chaux	62
Tableau III.19 : le meilleur résultat des caractéristiques thermiques et mécaniques des briques	63

Chapitre IV : Analyse et simulation

Tableau IV.1 : les propriétés mécaniques et thermique de composite.	70
Tableau IV.2 : Résultats des conditions aux limites et Von mises sous Easy PBC.	75
Tableau IV.3 : Résultats des déformations et des déplacements sous Easy PBC.	78

Liste des notations

Alphabétiques

a : dimension	cm
b : dimension	cm
Cp : Chaleur spécifique	J/kg.C°
d : diamètre	Mm
Di : dilatation thermique	Mm/mk
e : épaisseur d'éprouvette	Cm
E : module de young	MPa
F : force appliquée	N
G : module de cisaillement	/
h : Hauteur	Cm
IP : indice de plasticité	%
L : longueur	Cm
m: masse	Kg
MF : module de finesse	%
P : densité sèche	g/cm³
Rc : résistance à la compression	MPa
Rf : résistance à la flexion	MPa
Rt : résistance à la traction	MPa
R, Rth : Résistance thermique	m².K/w
S : section d'éprouvette	mm²
T, température	°C, K
TA : Taux d'absorption	%
V : Volume	m³
Va : volume absolue	m³
W : Taux d'humidité	%

WL : limite de liquidité	%
Wp : limite de plasticité	%

Romains

λ : Conductivité thermique	W/m.k
ρ : masse volumique	kg/m³
ρ_a : masse volumique apparente	kg/m³
ρ_s : masse volumique absolue	kg/m³
ε : déformation	%
ν : coefficient de poisson	

Abréviations

AFNOR : Association française de normalisation

CAE : complète abaqusenvironment

CAO : conception assiste par ordinateur

CRATERRE : Centre international de la construction en terre

PBC : periodicboundary condition

VER :volume élémentaire représentatifs

INTRODUCTION GENERALE

« Un matériaux n'est pas intéressant pour ce qu'il est, mais pour ce qu'il peut faire pour la société. »

La terre est un des premiers matériaux utilisés par l'Homme dans le domaine de la construction. Ainsi la technique de construction en Terre remonte à plus de dix mille ans avant l'édification de la ville de Jéricho en Turquie.

Depuis, les civilisations les plus brillantes ont construit avec ce matériau. En effet les Perses, les Assyriens, les Egyptiens et les Babyloniens l'ont utilisé avec abondance. Cette technique s'est ensuite perpétuellement transmise à travers les siècles jusqu'à nos jours. L'utilisation de la terre dans le secteur de la construction, dans une optique de développement durable, implique l'analyse de la situation qui motive ce choix ; en prenant en considération les aspects écologiques, les aspects légaux et moraux, la viabilité culturelle et la durée temporelle des impacts positifs et négatifs résultant de ce choix [1].

La majorité des matériaux de construction utilisés actuellement (ciments, acier, aluminium) sont contraires aux exigences de développement durable. De ce fait le matériau terre s'est développé de plus en plus et a connu un regain d'intérêt dans le contexte international actuel. Ce développement est accompagné par un perfectionnement et une modernisation du procédé.

Le terre présente des avantages importants en termes d'isolation thermique permettant aux populations des régions chaudes de mieux faire face aux températures élevées et aux vagues de chaleur qui ont tendance à devenir de plus en plus fréquentes avec le changement climatique.

Le Sahara est une région très ventée et aride. Les amplitudes thermiques sont généralement considérables à cause des variations de températures et aussi extrêmement élevées pendant le jour et très basses durant la nuit. Dans la plupart des pays chauds, arides ou aux climats tempérés, la terre a toujours été le matériau le plus répandu dans la construction.

Aujourd'hui au sud d'Algérie la construction en béton armé a montré son déboire pour donner un climat ambiant sain et confortable, parce que la résistance thermique de béton est faible. La plupart des bâtiments, qu'ils soient à usage d'habitation ou industriel, constituent des systèmes dont la consommation d'énergie est importante si l'on désire assurer un confort thermique acceptable par ses occupants. Pour améliorer le confort thermique dans une région

chaude comme la Wilaya de OUARGLA, le recours à la climatisation s'avère nécessaire donc la courbe de consommation d'énergie continue d'augmenter.

À chaque époque, les bâtisseurs ont essayé d'adapter l'habitat à l'environnement pour rechercher le meilleur confort. Il est par ailleurs, indispensable de mener des études qui permettent l'amélioration du confort thermique dans l'habitat non climatisé. Ce qui nous pousse à chercher des solutions permettant de valoriser les matériaux disponibles localement et d'essayer de les utiliser dans le domaine de la construction. Dans notre étude nous allons essayer de confectionner des briques en terre crue, dont le principal constituant, et par conséquent d'un grand intérêt économique pour la région sud du pays.

Dans cet objectif cette étude est lancée. D'un point de vue global le but de notre recherche est de confectionner une brique crue à base de trois matériaux locaux : à savoir (argile, sable de dune, fibre de palmier). Ceci, dans le but d'obtenir une brique à caractéristiques convenables (l'isolation thermique, résistance mécanique, ultrasonique et autres ...).

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

- Le premier chapitre est propre à une recherche bibliographique qui est composé de deux parties : La partie A présente les différents types de brique existante, les caractéristiques thermiques, mécaniques et physiques. Et l'état de brique en terre crues et cuites utilisées dans les régions sahariennes. - La partie B est consacrée à un aperçu et une présentation sur la zone d'étude avec une analyse climatique.
- Le deuxième chapitre, est consacré à la caractérisation des matériaux utilisés dans notre travail.
- Le troisième chapitre, expose l'étape expérimentale de notre travail qui consiste à confectionner des briques de terre crue à base d'argile et de sable de dunes renforcé par des fibres de palmier traité par la chaux et puis stabilisé par le ciment blanc, et à procéder à leurs essais mécaniques et thermiques.
- Le dernier chapitre est d'illustrer l'approche numérique suivie pour la détermination de comportement mécanique et la conductivité thermique de composite. On s'intéresse à la méthode des éléments finis, puis à la présentation du logiciel ABAQUSsimulation et complément EasyPBC, ainsi que la démarche à suivre pour la modélisation numérique.

Enfin, une conclusion générale qui résume les principaux résultats et les perspectives à entreprendre pour les études à venir.

Chapitre I

Etude bibliographique

A) Généralités sur les Techniques de Production des Briques et leurs Propriétés Thermo-mécaniques.

A) Généralités sur les Techniques de Production des Briques et leurs Propriétés Thermo-mécaniques.

I.1. Introduction :

L'enveloppe du bâtiment joue un rôle de séparation thermique entre l'ambiance intérieure et extérieure. Elle intervient comme un stockage de la chaleur dans le bâtiment et comme distributeur de cette dernière à l'air libre [1]. Les briques, depuis longtemps, sont considérées parmi les éléments les plus importants dans le domaine de la construction. La fabrication des briques est passée par plusieurs étapes de développement dont la première est la brique crue, puis la brique cuite, enfin la brique industrielle stabilisée. La technologie actuelle permet de réaliser plusieurs types de briques avec des performances supplémentaires pour différentes destinations (Brique de verre, brique cellulaire, brique monobloc ...etc.)

Dans ce chapitre, nous allons exposer les étapes de progression de la technologie de confection des différentes briques.

I.2 : Briques de terre crue :

La construction en terre crue recèle de nombreux avantages, grâce aux qualités inhérentes au matériau: recyclabilité, performance, énergétique, résistance au feu, durabilité.... mais évidemment, il est nécessaire de respecter les règles essentielles de l'art de bâtir en terre crue afin de garantir les œuvres. La terre crue est utilisée pour la construction de bâtiments depuis les temps les plus reculés, comme en témoigne l'habitat traditionnel en de nombreux points de notre planète. Après avoir été abandonnée et oubliée avec l'avènement des matériaux de construction industriels, en particulier le béton et l'acier, elle fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les pays en développement comme dans les pays industrialisés. Ce matériau, souvent critiqué pour sa sensibilité à l'eau et son manque de durabilité, présente dans sa forme actuelle de nombreux avantages pour la construction de logements durables, confortables et économiques (Houben,1996). Il existe plusieurs types de terre crue entre autre nous citons :

I.2.1 : L'adobe :

L'adobe est le nom le plus communément utilisé des briques séchées au soleil, C'est un matériau de construction fait d'un mélange de sol, d'eau et de chaume. Les briques d'adobe sont moulées à partir d'une terre argileuse humide. A l'origine, ces briques étaient formées à la main. Plus tard (et encore aujourd'hui), elles sont fabriquées manuellement à l'aide de moules à formes

prismatiques variées en bois ou en métal. Actuellement, des machines sont également employées. La Figure I.1 présente un exemple de fabrication et utilisation d'adobes [2].



Figure I.1. A gauche : des adobes au séchage sous le soleil [3]. A droite : une construction en adobes [4]

I.2.1.1 : La production

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

I.2.1.2 : Modes de production de l'adobe

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

a. Le mode de production manuel

-Moules simples

Il correspond à un moulage traditionnel soit par façonnage manuel ou à l'aide d'un moule Façonnée à la main (photo I .2), la terre est généralement utilisée à l'état de pâte plastique mi ferme La terre peut être employée à deux états hydriques différents, soit sous forme de pâte mi molle et selon une méthode dite du "coup d'eau" (moule préalablement nettoyé et mouillé pour faciliter le démoulage), soit sous forme de pâte mi- ferme et selon une méthode dite du "coup de sable" (le moule préalablement nettoyé et mouillé est sou-poudré de sable pour faciliter le démoulage). Dans ces deux techniques de moulage manuelles rendements moyens de production se situent de 400 à 600 blocs par jour pour 2 ouvriers.

-Moules multiples

Il associe l'utilisation de grands moules à compartiments multiples, généralement en forme d'échelles ou de forme carrée subdivisée en petits compartiments et la livraison de la terre, à l'état assez liquide par brouettes, dumpers ou bulldozers à godet. Parfois la terre est

directement déversée depuis le malaxeur qui est alors mobile et tracté par ou sur un camion. Les moules doivent être manipulés facilement par 2 ouvriers (pas trop lourds) et doivent être propres et mouillés avant d'y déverser la terre. Compte tenu de l'état hydrique plus liquide de la terre, les adobes produites de cette façon présentent un risque de retrait et donc de fissuration plus importante. Il convient donc de compenser ce risque en utilisant une terre dont la texture est riche en gros sables et petits graviers. L'organisation de la production mécanisée se fait autour de deux principaux postes qui sont le malaxage et le moulage et mobilise 5 à 6 ouvriers selon la taille des unités, La production moyenne pour ce type d'organisation est de l'ordre de 8 000 à 10 000 blocs par jour[5].

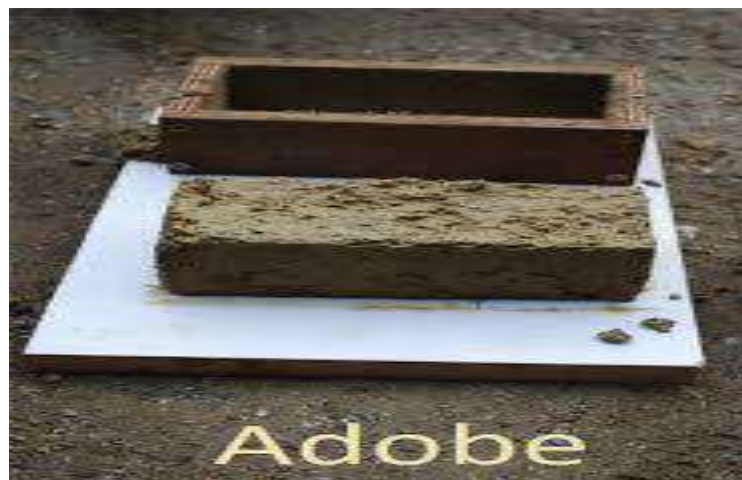


Photo I.2 : moule de l'adobe[6]

b. Le mode de production mécanisé

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

I.2.1.3 : Les produits

Les produits de la fabrication des adobes, manuelle ou mécanisée, sont extrêmement variés. Ils sont le plus souvent directement tributaires des savoir-faire traditionnels et varient quant au type de terre utilisée, au mode de moulage, aux dimensions des blocs (très changeantes) et aux destinations d'emploi plus ou moins spécifiques (blocs spéciaux). Les moules utilisés sont généralement en acier ou en bois (le plus souvent) et de forme très variée. Les dimensions les plus fréquentes de 40 x40x15

cm ou 40x30x15 cm ,ou 40x20x10 cm....) . On distingue globalement trois principaux types de produits : Produits classique, produits spéciaux, produits antisismiques [5].

I.2.1.4 : Avantages et inconvénients :

➤ Les avantages :

L'adobe possède plusieurs avantages par rapport aux matériaux industriels. Il a la capacité de régulariser l'humidité de l'air, d'emmagasiner la chaleur, de réduire la consommation d'énergie, de ne produire virtuellement aucune pollution, d'être réutilisable à 100 %, de préserver le bois et les autres matériaux organiques, en plus d'absorber les polluants atmosphériques présents à l'intérieur des maisons (Minke, 2006).

C'est un matériau de construction peu coûteux, toujours disponible, local et pouvant être utilisé directement par les petites communautés. Cette technologie n'entraîne pas la production de gaz à effet de serre et convient parfaitement pour diminuer les émissions à la fois du secteur des transports et de la construction. Les spécialistes hautement qualifiés, comme les architectes et les ingénieurs, ne participent généralement pas à ce genre de constructions. Apparemment, la terre serait donc le matériau idéal [7].

➤ Les inconvénients :

L'adobe présente des désavantages certains lorsqu'on le compare aux matériaux industriels d'usage commun. Il ne peut être standardisé, puisque sa composition varie en fonction des minéraux présents dans le sol, et le mélange doit être ajusté pour équilibrer ses différents composants (Minke, 2006). L'adobe se contracte lorsqu'il sèche, en raison de l'évaporation de l'eau utilisée dans la préparation du mélange, et, de plus, il n'est pas résistant à l'eau. Il doit donc être protégé par des toits à longue portée et par un revêtement approprié (Minke, 2006) [7].

I.2.2. Le pisé

La définition la plus connue et la plus souvent citée est celle de F. Cointeraux dans "Ecole d'architecture rurale et économique, Paris 1790" [8] : "Le pisé est un procédé d'après lequel on construit les maisons avec de la terre, sans la soutenir par aucune pièce de bois, et sans la mélanger ni de paille ni de bourse.

Le pisé est donc une technique de maçonnerie de mur en terre crue monolithique Coffrée, composée de couches superposées de terre compactée. Le mur obtenu est un mur porteur. Il a 50 cm d'épaisseur en moyenne, parfois plus. La densité du pisé traditionnel est d'environ 1,7 à 1,9 t/m³(Pignal [9]). Les édifices en pisé ont couramment deux niveaux. Certains, notamment en milieu urbain, peuvent présenter trois voire quatre niveaux. La Figure I.3 présente une ancienne construction en pisé.



Figure I.3. Ancienne construction en pisé [10]

I.2.2.1. Les produits : différents types de pisé

La technique de construction en pisé est variée suivant les régions, [9], [11] et elle change aussi suivant le fils du temps [12]. Aujourd’hui, on distingue principalement deux types de pisé : les pisés traditionnels et les pisés modernes qui sont fabriqués à partir des années 1980.

a- Pisé traditionnel

Le pisé traditionnel est fabriqué par des coffrages en bois et une dame manuelle. Il est monté sur un soubassement en maçonnerie (pierre, brique, galets) appareillée, hourdé au mortier de chaux. Cette maçonnerie a environ 50 cm de haut (Pignal [9]). Pourtant, elle peut être plus importante dans des cas particuliers : les étables, les écuries, etc. (le pisé risque d’être érodé par le passage des animaux) et quand le climat est à tendance humide, le soubassement protège alors le pisé des projections d’eau et des remontées d’humidité par capillarité [2].

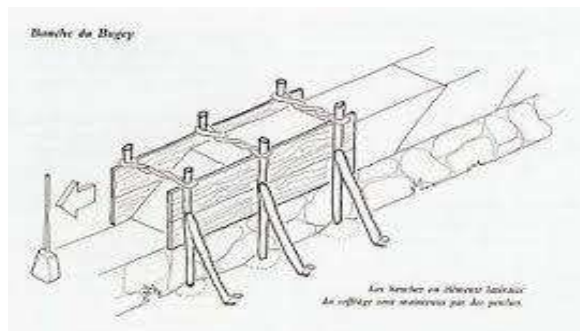
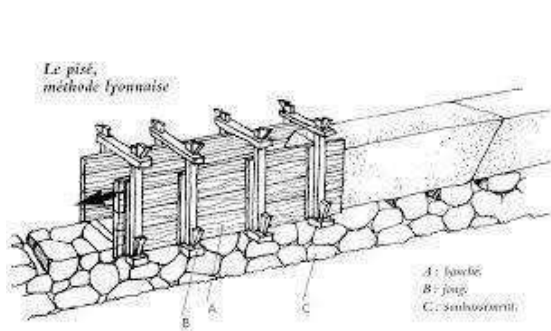


Fig. I.4 – Mise en œuvre du coffrage du pisé suivant la méthode lyonnaise, Pignal [9] Fig. I.5 – Mise en œuvre du coffrage du pisé suivant la méthode du Bugey, Pignal [9]

Avec cette méthode de mise en œuvre,
on peut éviter les trous sur le mur.

b- Pisé moderne

Depuis les années 1980, le pisé redevient un mode de construction dans le monde. Ces pisés dit « moderne » ne reproduisent pas à l'identique les procédés de construction anciens. La terre est mise en œuvre avec les apports de la technologie moderne pour aboutir à des logements ayant au moins le standard du confort actuel.

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

I.2.2.2. Avantages et inconvénients

➤ Avantage :

Outre des aspects écologiques et économiques indéniables, le pisé est un matériau qui offre de nombreuses qualités :

- Robuste et durable, il résiste aux épreuves du temps à la condition d'être très bien entretenu,
- Un matériau respirant, il régularise l'humidité à l'intérieur de la maison,
- Emmagasinage des chaleurs environnantes grâce à son inertie,
- Très bonne résistance aux feux et aux incendies,
- Un bon isolant phonique.

➤ Inconvénients :

- Le pisé est un matériau complexe à entretenir et à rénover,
- Il supporte mal l'humidité,
- Possibilité d'apparition des fissures au fil du temps ainsi que du salpêtre.

I.2.3. Le torchis

Le torchis est considéré comme le premier matériau composite de l'histoire, car il est composé d'une matrice plastique (terre) et de renforts (fibres végétales ou poils d'animaux) [13].

C'est une technique de remplissage en terre crue, le torchis est un matériau non porteur utilisé pour les murs et les cloisons dans les constructions à ossatures en bois.



Figure I.6 : Construction en torchis[14]

I.2.3.1. Production

Le torchis se produit selon deux méthodes, une traditionnelle et l'autre mécanisée[15].

a- Production traditionnelle

La production artisanale du torchis passe par quatre étapes :

1- La préparation

- tamisage de la terre humidifiée quelque jour à l'avance de tout débris végétal pour faciliter son utilisation.
- la paille préalablement coupée en tronçons de 20 à 30 cm.

2- Le mélange

- 1 volume de terre pour 1 volume de paille.
- Mélange associé à l'eau. (Il n'est pas possible de recommander un certain volume d'eau par rapport à la terre préparé. Mais, l'argile ayant une mémoire, c'est la matière qui dictera à l'utilisation le bon mélange et le bon emploi).
- Foulage du mélange à pieds.

3- Pose ou placage

Une torcheest faite de cet amalgame, ensuite posée sur le lattis, et recouverte. L'épaisseur dépend de celle du mur.

4- Le séchage

Le séchage dure de 3à4 semaines sous bâches.

b- Production mécanique

L'une des principales raisons de la désaffection du torchis est la pénibilité de sa préparation dans le cadre traditionnelle de fait, fabriquer le torchis demande beaucoup plus de temps que le mettre en œuvre.

En addition à la mécanisation de la production du torchis, aujourd'hui des filières de production du « torchis prêt à l'emploi » existent.

Le « torchis prêt à l'emploi » est préparé dans un malaxeur à cuve fixe ; les pales propulsent l'eau et les fibres à travers l'argile pour donner à la matière une parfaite homogénéité.

La production mécanisée du torchis passe par les étapes suivantes :

1-Préparation

Le corroyage des fibres naturelles finement voire très finement hachées et de l'argile se fait par bétonnière qui reste comme son nom l'indique parfaitement adapté pour réaliser des bétons y compris des bétons naturels.

-Alimentation de l'engin en eau, en argile et en fibres naturelles dans les justes proportions.

2- Projection du torchis

La technique par projection mécanique s'avère très concluante si l'on dispose d'une projeteuse mécanique des mieux adaptées notamment au niveau de la buse à la sortie du circuit emprunté par le torchis ; son diamètre d'ouverture et l'intégration du gicleur à air pulsé devant correspondre aux sections et aux longueurs des fibres naturelles venant s'agglomérer en continu mélangées à la barbotine d'argile, à l'intérieur de la buse, pour en faciliter leur expulsion.

I.2.3.2.Les produits

Les torchis sont classés selon :

a- Le type de mélange

On distingue deux grands types selon le mélange :

- un torchis lourd : beaucoup de terre, un peu de paille,
- un torchis léger : beaucoup de paille, un peu de terre

b- Leurs modes de mise en œuvre

Torchis plaqué,

Torchis façonné en mèche.



Figure I.7 différents types du torchis

I.2.3.3. Avantages et inconvénients

➤ Avantages

- Plus solide que la terre crue seule
- Séchage rapide
- Financièrement plus économe que les autres types de terre crue [15].

➤ Inconvénients

- Construire en torchis peut prendre énormément de temps vu qu'il faut attendre que chaque couche sèche avant d'appliquer la suivante.
- Le torchis est un matériau très sensible à l'eau et l'humidité dans il faut penser à un enduit d'argile très fine ou de sable ou de chaux pour les murs extérieurs.
- Il est peu adapté pour les zones avec un climat pluvieux [16].

I.2.4. Les Blocs de terre comprimée

Par rapport à l'histoire de la construction en terre, la technique du bloc de terre comprimée (BTC) est une technique récente. Elle a été développée dans les années 50 dans le cadre d'un programme de recherche sur l'habitat rural en Colombie. Cette technique est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe. Au lieu qu'ils soient moulés à la main dans un cache en bois, les blocs sont obtenus par compression de la terre, légèrement humide dans une presse métallique. Comparé au bloc moulé à la main, le BTC est très régulier en formes et en dimensions, plus dense et présente une meilleure résistance à la compression et à l'eau (CRATerre, 1991).

I.2.4.1. Production des blocs de terre comprimée

Les blocs de terre comprimée sont produits par une presse mobile, qui est capable de produire sur place des blocs pour des projets plus importants aussi longtemps que la terre du bâtiment est de bonne qualité. La couche de sol fertile supérieure est temporairement mise de côté, la terre argileuse de la sous-couche est séchée par le soleil et le vent, puis pulvérisée. Elle est ensuite humidifiée et mélangée avec du sable en fonction de la proportion d'argile dans de terre. La machine à comprimer fabrique alors à partir de ce mélange des blocs de terre uniformes qui seront prêts à être utilisés après quelques semaines de séchage.

I.2.4.2. Modes de production des blocs de terre comprimée

On distingue quatre grandes catégories de presses et unités de production : Presses manuelles (figure (I.6)), Unités de production foraines (mobiles légères), Presses motorisées (figure (I.7)), Unités de production fixes.



Figure (I.8) : presses manuelles[17]



Figure (I.9) : presses motorisées [18]

I.2.4.3. Avantages et inconvénients

➤ Les avantages

- BTC est un matériau écologique : composée essentiellement d'argile, sable et gravillons et d'un peu de ciment, fabriquée sans cuisson ;
- BTC procure un confort thermique et phonique excellent : de par son inertie thermique et sa masse, un mur en BTC apporte confort thermique et isolation phonique ;
- BTC offre une grande résistance : la résistance à la compression d'une BTC dépasse les 60 bars (60kg/cm²) ;
- BTC présente un intérêt architectural et esthétique : en cloison, en mur porteur, la BTC permet une richesse de formes, et de motifs variés dans son utilisation ;
- BTC est simple à mettre en œuvre : la BTC se monte avec un mortier de terre amendé. Les règles de construction sont simples à suivre [19].

➤ Les inconvénients

- Fabrication des briques longue et fatigante ;
- Fragilité : au moindre choc la brique se brise ou s'effrite ;
- Se détériore sous l'effet du gel.

I.2.4.4. Les types des blocs de terre comprimée

Il existe pour ces presses plusieurs sortes de moules produisant différents types de briques. Il existe **les blocs pleins**, convenant pour des usages variés ; **les blocs creux** dont les vides représentent 15 à 30% du volume et qui permettent un allègement du bloc et une meilleure accroche du mortier ; **les blocs alvéolaires** qui présentent un pourcentage de vides plus important que pour les blocs précédents ; **les blocs à emboîtement** qui ne nécessitent pas de mortier lors de la pose ; **les blocs parasismiques** qui permettent d'intégrer des systèmes structuraux parasismiques ; et finalement, **les blocs spéciaux** fabriqués exceptionnellement pour des applications particulières. Des moules

spécifiques permettent également la réalisation de motifs sur les faces des blocs qui seront visibles afin d'obtenir un effet décoratif du bloc sans avoir recours à un traitement de finition [20].



Figure (I .10) Types de blocs de terre comprimée[21]

I.2.5. Les Caractéristiques des briques en terre crue

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

Tableau I .1 les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé et BTC)[13]

Caractéristiques	Types de briques de terre crue		
	Adobe	Pisé	BTC
Masse volumique (kg/m^3)	1200 – 1700	1700 – 2200	1700 – 2200
Résistance à la compression (MPa)	2 – 5	< 2,4	< 2,4
Résistance à la traction (MPa)	–	0,5 – 1	–
Conductivité thermique λ ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	0,46 – 0,81	0,81 – 0,93	0,81 – 1,04
Chaleur spécifique ($\text{J/Kg}^\circ\text{C}$)	850	900	–
Capacité thermique $^\circ\text{C}$ 3 (KJ/m)	1350	510	–
Absorption d'eau (%)	5	10 – 20	10 – 20

Isolation acoustique (dB)		50 dB pour 40cm 40 dB pour 20cm	50 dB pour 40cm 40 dB pour 20cm
Retrait au séchage (mm/m)	1	1 – 2	0,2 – 1

I.3 : Brique de terre cuite

Alors que la construction durable est devenue un véritable enjeu de société, la brique en terre cuite (BTC) reste le matériau par excellence qui contribue à un environnement bâti sain, durable et performant en matière de confort intérieur.

La brique de terre cuite (BTC) est un matériau de construction des plus performants qui permet de répondre à toutes les exigences de confort thermique, acoustique, de sécurité, de durabilité et de flexibilité du bâtiment [22].

I.3.1. Matière première utilisée : les argiles

Origine

La décomposition des roches primaires (éruptives) tel que granite, causé par action chimique (oxydation, carbonations...), action physique (variation de température, l'action d'eau, de gel, érosion) [23].

Dans la suite on va citer les étapes principales de la fabrication de brique de terre cuite.

I.3.2. Processus de production

I.3.2.1. L'extraction

L'extraction de l'argile s'effectue actuellement et le plus souvent avec des excavateurs à godets et des grues à grappin [24]. Celle-ci doit être proche, assez grande et fournir une argile, ni trop maigre ni trop grasse, qui sèche facilement avec un retrait limité. Elle doit cuire sans problème, et ne pas être polluée en soufre, fluor, chlore [25].



Figure (I.11) gisement d'argile de B .Amer à Ouargla [26]

En général la fabrication des briques se compose des cinq opérations principales comme indiquées sur le schéma ci-dessous.



I.3.2.2. La préparation des matières premières

Elle consiste à retirer les pierres, à mélanger intimement l'argile avec le sable dégraissant, à broyer les grains trop gros, à mouiller et à malaxer le mélange afin d'obtenir la plasticité voulue.

I.3.2.3. La préparation pour le broyage et le malaxage

La préparation comprend deux opérations principales : le broyage et le malaxage d'une part, le dosage et le mélange des matières premières d'autre part.

a- Broyage et malaxage

Ces opérations ont pour but de rendre la masse d'argile homogène et de lui conférer la plasticité nécessaire au moulage des briques. Cette étape très importante est effectuée dans des broyeurs mécaniques à meules verticales ou à cylindres horizontaux [22].

b- Dosage et mélange:

S'effectuent dans des machines constituées de réservoirs contenant les divers ingrédients. Ils alimentent régulièrement (et dans les proportions requises) un ou plusieurs mélangeurs qui assurent la mixture homogène de la pâte. Enfin, pour que l'argile soit de qualité optimale, elle sera stockée quelque temps dans un lieu humide appelé « Cave à terre » [25].



Figure I.12. Broyage et malaxage de l'argile [26] [27]

I.3.2.4. Le moulage ou le façonnage

Le moulage des briques peut se faire de différentes façons :

a- Le Moulage à la main :

Le travail se fait sur un banc de moulage, les moules utilisés sont en bois dont les dimensions sont majorées de 10% pour compenser le retrait, une fois les moules sont remplis ils sont égalisés avec une règle et retournés sur une planche. Après démoulage la brique est mise dans une installation de séchage.

b- Moulage semi mécanique :

Une mécanisation partielle est appliquée en pressant l'argile mise sur une table dans deux moules métalliques. Les briques ainsi formées sont chaque fois démoulées par l'action d'un levier et conduites aux sections.

c- Moulage mécanique :

- Par presse à moules : Dans la presse à moules, l'argile est d'abord mouillée dans un pétrin à la mes tournantes. Sous son propres poids et par le mouvement des lames. l'argile du fond du pétrin est pressée dans des moules métalliques.
- Par étirage à la filière ou extrusion : pour une production importante, cette méthode est la plus employée. Elle consiste à mettre dans la machine de l'argile préparée et de l'eau dans un fond perforé et pressé par une vis sans fin vers une embouchure. L'argile est ainsi extrudée sous forme d'un boudin rectangulaire dont la section répond au format demandé. Ensuite le boudin est coupé en morceaux à l'aide de fils en acier qui montent et descendent mécaniquement.



Figure I.13. Moulage ou façonnage[28]

I.3.2.5. Séchage

Après le moulage des briques, celles-ci aboutissent au stade de séchage de deux manières.

Séchage à l'air libre :

Les briques formées sont stockées sous un hangar, placées légèrement en oblique et distantes de la largeur d'un doigt, le séchage se fait progressivement de la surface jusqu'au noyau, et pour bien aboutir à cela, les briques doivent rester en stade de trois à quatre semaines moins de cette période,

les briques sont mal séchées à l'intérieur et soumises à la cuisson, elles risquent de se déformer et de se fissurer.

Séchage artificiel:

Il s'effectue dans des chambres ou tunnels chauffés à l'air ou à la vapeur dans un temps de 60 minutes à 48 heures suivant les briqueteries. La chaleur fait dilater les pores de l'argile ce qui facilite l'évaporation de l'eau encore présente dans les briques.



Figure I.14. A gauche: Séchage à l'air libre. Adroite: Séchage artificiel[29]

I.3.2.6. Cuisson

La cuisson s'effectue dans des fours tunnels de section environ 93 (m) et d'une longueur variante de 60 à 120 m. Au centre du four, il y a une source de chaleur qui produit une température d'environ 1400°C. A la sortie du tunnel, de l'air froid est soufflé pour refroidir les briques cuites, les gaz usés se dirigent de la source de chaleur vers la cheminée qui se trouve à l'entrées du four. Dans le tunnel, les briques passent successivement dans la zone de séchage, dans la zone de cuisson où se trouve la source de chaleur et dans la zone de refroidissement[24].



Figure I.15. Cuisson des briques [30]

I.3.2.7. Emballage

Après la cuisson, les briques sont prêtes à être transportées et livrées sur chantier ou au magasin de stockage. Pour des raisons de facilité et de sécurité, elles sont préalablement empilées sur des palettes et emballées de façon à minimiser la quantité d'emballage utilisé.

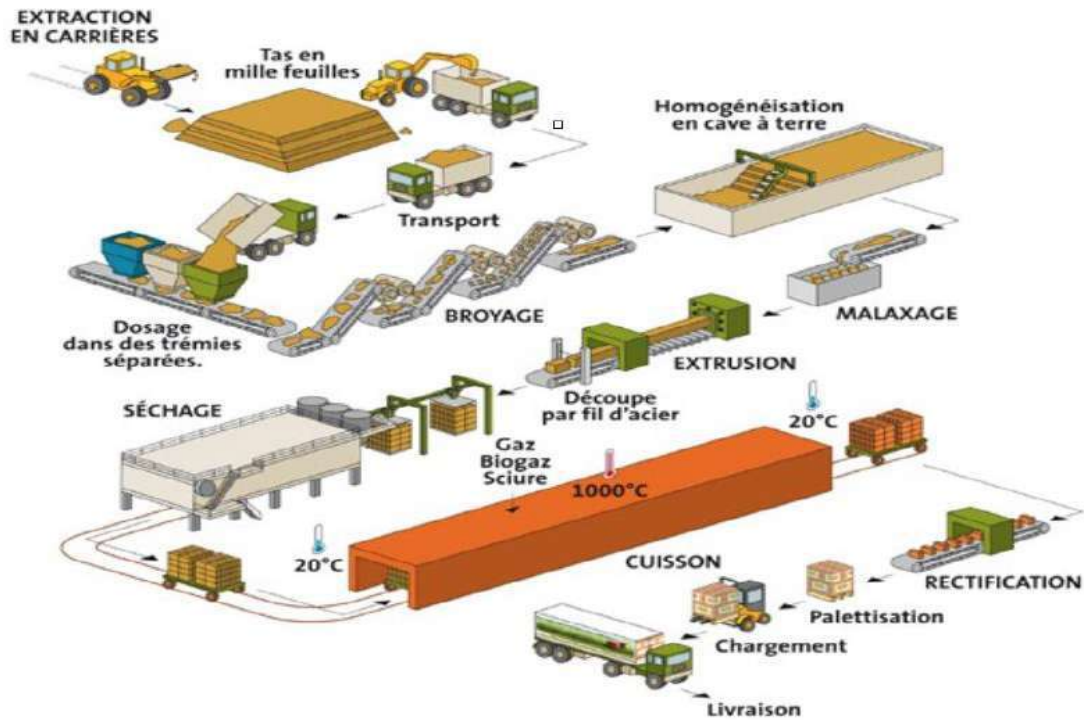


Figure I.16. Description schématique clair du processus de production de BTC[31]

I.3.3. Les produits de briques en terre cuite :

I.3.3.1. Brique silico-calcaire :

Les briques silico-calcaires sont essentiellement formés d'un mélange des matériaux siliceux finement broyés et de chaux hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ appelée chaux grasse (Ou de ciment portland) soumis généralement à un traitement à l'autoclave. Il y a deux catégories de produit ils sont fabriqués et utilisés comme matériaux de construction.

a- Silico- calcaire denses :

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

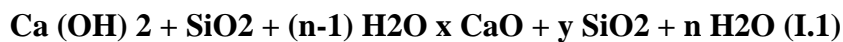
Les premiers brevets , qui furent pris en 1880 par l'allemand MICHAELIS et en 1886 par l'anglais VAN DERBURGH étaient relatifs à la fabrication de briques silico-calcaires obtenues par un mélange soigneusement dosé de chaux et silice broyé puis moule par pression et traite par vapeur , la première application industrielle a été faite en Allemagne vers 1894 les pays qui ont les plus fortes production des briques silico-calcaires denses sont : la Russie , L'Allemagne , les pays bas , la France [32,33,34].

b- Silico-calcaire léger

Les briques silico-calcaires légères sont fabriqués à partir des mêmes matériaux que les silico-calcaires denses, mais avec ajout d'un constituant produisant des vides artificiels fermes, sous forme des bulles gazeuses obtenues par réaction chimique, ils appartiennent à la classe des matériaux appelés improprement béton cellulaire ou béton gaz. Les premiers brevets datent de 1890. Mais on considère souvent le suédois J.A .ERIKSSON comme le père de ces produits, ces brevets datent de 1923 et en 1929 il utilisa le traitement à l'autoclave, ces produits furent d'abord commercialisés en Suède en 1924 au Danemark en 1928, en URSS en 1930. Les principaux producteurs sont la Russie, le Japon, l'Allemagne et la Grande-Bretagne [32,35].

c- Les phénomènes physiques de processus d'autoclave des briques silico-calcaires

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



Au fur et à mesure que la température s'élève la vitesse de réaction (I. 1) croît. Ce processus a lieu dans les autoclaves sous pression de la vapeur saturée (0.8 - 1.2 MPa).

L'augmentation de température et pression de vapeur est suivie par la dissolution des composants initiaux. La solubilité des constituants varie avec la température c'est à dire, la solubilité de $\text{Ca (OH) } 2$ diminue avec l'augmentation de la température et celle du SiO_2 , H_2O (H_4SiO_4) augmente [35].

d- La Fabrication

• Silico-calcaire dense

Le mélange (5-12%) chaux vive (CaO) et sable propre de 0/5 mm et l'eau de l'ordre de (4 à 8 %) de la masse des matières sèches. Généralement des mélangeurs continus alimentent d'une façon régulière la matière comprimée ou comprimée – vibrée suivant les modèles de presses, sous des pressions variant de 15 à 45 MPa, exceptionnellement 60 MPa, après démoulage les produits sont traités dans des autoclaves durant de 6 à 14 h et la pression varie de 0,8 à 1,2 MPa (à 170 - 190°C environ) [32,34,35,36].

- **Silico-calcaire léger**

Ces matériaux sont obtenus par traitement à l'autoclave d'un mélange de sable siliceux (60 à 65%), de chaux et de ciment (35 à 40% pour l'ensemble), une multitude de petite cellule étant créés dans un mélange par dégagement gazeux résultant de l'addition, au moment du gâchage, de poudre d'aluminium [19].

I.3.3.2. Les briques ordinaires

Les briques de terre ordinaire se présentent sous la forme de parallélépipèdes rectangles obtenus par extrusion « filage » ou éventuellement par pressage lorsqu'il s'agit de briques pleines. Selon la norme XP P13 305 la brique pleine ordinaire se compose en deux catégories pleines ou perforées [15].

- **Briques pleines :**

Elles possèdent des faces planes sans reliefs et comprennent aucune perforation leurs dimensions les plus courantes sont : (22*11*6) cm ou (25*12*5.5) cm [15].

- **Briques perforées :**

Ce sont des briques comportant des alvéoles perpendiculaires au plan de pose, ces alvéoles doivent représenter moins de 40% de la surface totale de la brique.

Les briques perforées qui comportent au moins quatre conduits non débouchant sont fabriqués par voie demi-sèche (25*12*5.5-8.8) cm.

Les trous de la perforation sont faits soit verticalement dans la proportion de 60% de la section totale, soit horizontalement avec alvéoles parallèles au lit de pose dans la proportion de 40% de la section totale.

Selon la fabrication des briques traditionnelles il est difficile d'obtenir des briques ayant des dimensions précises, cette difficulté est due au retrait à l'air et à la cuisson.

Selon la Norme, les tolérances peuvent être calibrées comme suit : ± 6 mm sur la longueur ; ± 4 mm sur la largeur et ± 3 mm sur l'épaisseur [15].

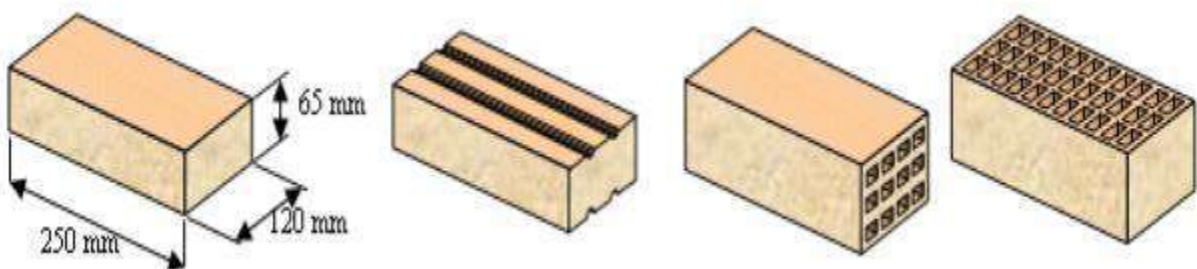


Figure I.17 : Briques pleines et perforées [15].

I.3.3.3. Les briques creuses :

La brique creuse est une brique ayant des perforations verticales ou plus couramment horizontales, elles sont isolants et légères, comparées aux briques pleines.

Elle se divise en deux types :

✓ **Brique creuse avec perforations verticales (bloc perforé) :**

Les blocs perforés comportent des perforations perpendiculaires à la face de pose, avec une largeur d'au moins 14cm ou la somme des perforations est égale ou inférieure à 60% de la section totale du bloc, ces blocs peuvent être classés en deux types selon leurs caractéristiques thermiques :

-Des blocs de types G.

-Des blocs normaux [15].

✓ **Brique creuse avec perforations horizontale :**

Elle comporte des perforations parallèles au plan de pose, et dont la section totale dépasse 40% de la section totale de la brique.

Les briques avec perforations horizontales sont classées selon deux critères : forme et résistance.

I.3.3.4. Propriétés thermo-mécaniques de quelques briques

Tableau. I.2 : propriétés thermo-mécaniques de quelques briques en terre cuites[13].

Caractéristiques	Type de brique		
	Creuse	Pleine	Perforé
Masse volumique Kg /m ³	1750 à 2050	1650 à 2000	1650 à 2000
Résistance à la compression MPa	4 à 8	12,5 à 40	12,5 à 40
Conductivité thermique λ (W/m.°C)	0,45 à 0,51	1,1 à 1,16	0,28 à 0,38

I.4. Conclusion :

Cette étude nous a permis d'étudier les différents types des briques en terre existants dans le domaine de construction à savoir : les briques crues, les briques cuites, brique silico-calcaires, ainsi que leurs développements dans l'histoire de la construction sur la base :

- Les différentes procédures des fabrications : four (brique de terre cuite), four autoclave (brique silico-calcaires).

-Les principales caractéristiques mécaniques, physiques et thermiques de chaque type de ces briques.

A partir de cette étude nous avons constaté qu'aucune brique ne peut présenter le choix parfait du point de vue :

- Résistance mécanique;
- Isolation thermique et acoustique ;
- Durabilité.

Nous avons constaté que la construction en terre comporte une palette très large d'avantages : propriété mécanique, propriété thermique avec une excellente isolation, hygiénique, respect de l'environnement. Donc la terre est le matériau écologique par excellence.

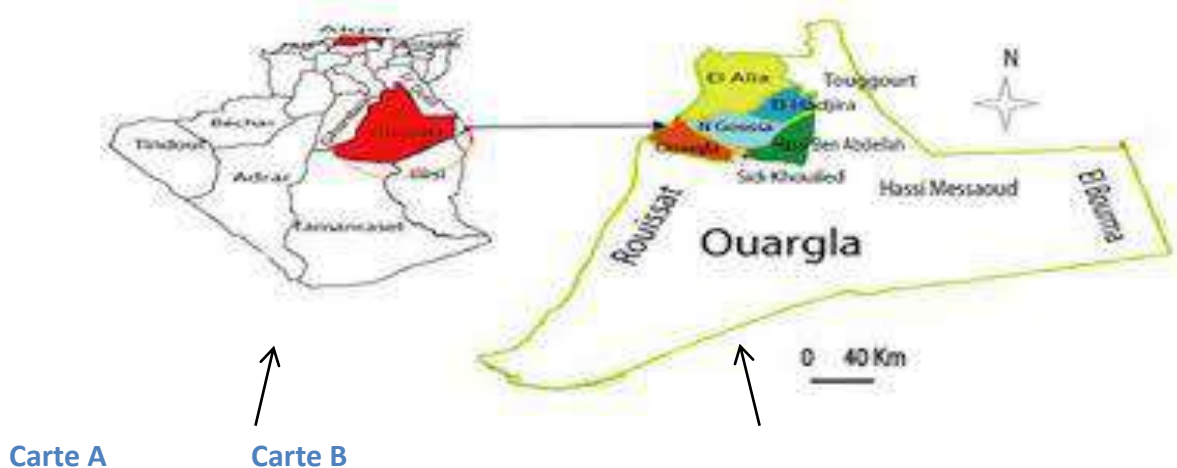
B) Quelques Données sur la Région d'étude.

I.1. Situation Géographique :

La wilaya d'Ouargla est située au Sud-Est du pays couvrant une superficie de 163.230 Km². Elle demeure une des collectivités administratives les plus étendues du pays. Elle est limitée :

- Au Nord, par les wilayas de Djelfa, Biskra et El Oued.
- Au Sud, par Illizi et Tamanrasset.
- A l'Est, par la Tunisie.
- A l'Ouest, par Ghardaïa.

La wilaya comporte actuellement 21 communes regroupée en 10 Daïras.



Carte A : Carte politique de l'Algérie (Encarta, 2012)

Carte B : Division administrative de la wilaya d'Ouargla (D.P.A.T, 2010)

Figure I.1 : Situation géographique de la région d'Ouargla [37]

I.2. Climat de la région :

Le climat en raison de ses composantes tels que la température, les précipitations, le vent et l'humidité relative de l'air, contrôle de nombreux phénomènes biologiques et physiologiques. La température et l'humidité en sont les facteurs climatiques les plus importants. Elles créent directement ou indirectement un milieu favorable pour le développement des populations de ravageur du palmier dattier surtout en milieu saharien, où le seul facteur limitant leur développement s'avère la palmeraie (DUBIEF, 1950; QUEZEL, 1963; TOUTAIN, 1979).

Météorologie(O.N.M) d'Ouargla (Tableu1)

Tableau I.1 : Les données climatiques de la région d’Ouargla (2018) [38].

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Températures Moyennes max T X (°c)	20.7	19.7	26.8	30.6	34.9	39.7	47.4	40.4	38.5	30.1	24.1	20.5
Températures Moyennes min T N (°c)	5.5	6.9	11.9	16.4	20.2	24.5	30.5	26.8	24.7	16.9	10.4	4.9
Température s Moyennes annuelle T M (°c)	13.1	13.3	19.35	23.5	27.55	32.1	38.95	33.6	31.6	23.5	17.25	12.7
Humidité relative moyenne H%	48	49.5	31.5	31	31	24.4	15.5	31	33	39	47.5	52.5
Vent max (m/s)	9.2	10.9	13.1	11.8	12.5	10.3	10.0	11.4	9.4	8.6	7.8	6.1
Précipitations mm	0.0	5.3	0.0	0.0	4.8	0.0	0.0	0.9	11.0	0.0	0.8	0
Evaporation mm	118.6	97.5	193.6	261.4	275	290.6	566.6	358.1	265.4	214.3	143.7	105.6
Insolation (En Heures)	253.4	208.6	246.9	262.3	313.3	241.5	284.5	321.2	281.4	247.9	244.5	272.1

Les données climatiques du tableau (01) montrent que :

I.2.1. La Température :

Des fortes variations saisonnières sont enregistrées entre le mois le plus chaud en Juillet avec 47.4 °C et le mois le plus froid en décembre avec 4.9 °C où la moyenne annuelle est de 23.87 C°.

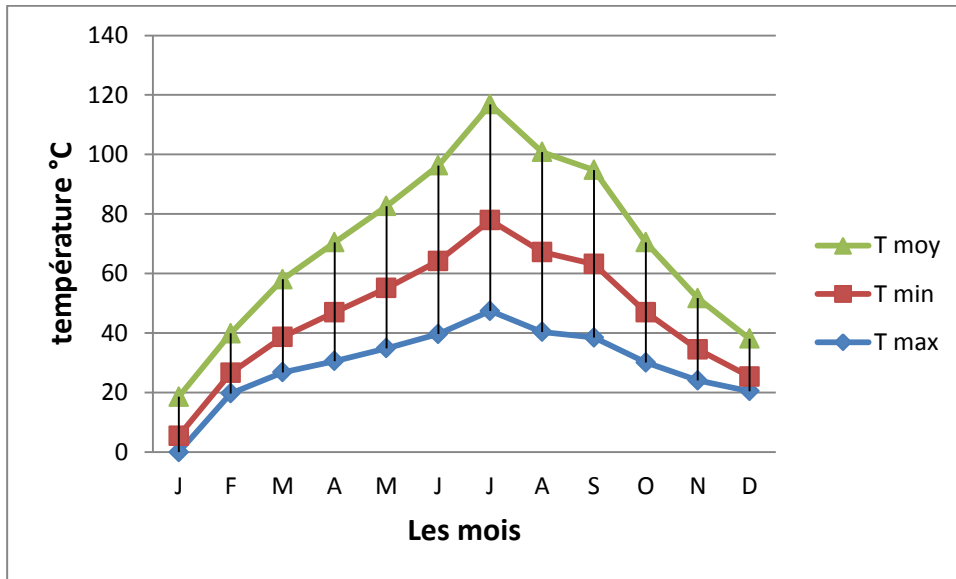


Figure I.2 : La Température mensuelle moyenne de la région d’Ouargla (2018)[38].

I.2.2. Précipitation :

Les précipitations sont très rares et irrégulier, La moyenne annuelle des précipitations dans cette région d’étude est de 1,9 mm avec un maximum de 11 mm en septembre et un minimum de 0 mm en (janvier, mars, avril, juin, Juillet, octobre, décembre).

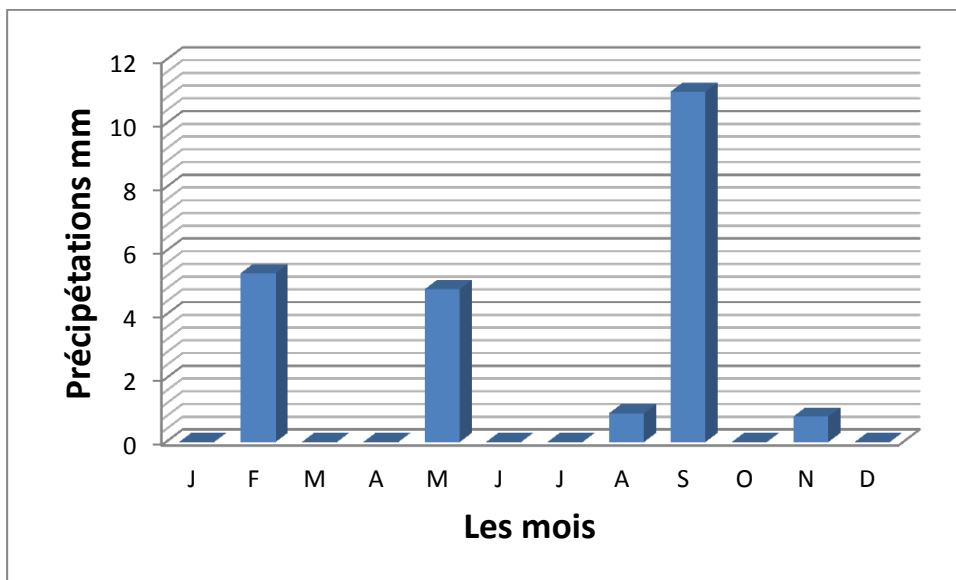


Figure I.3 : La précipitation mensuelle moyenne de la région d’Ouargla (2018)[38].

I.2.3. L’Insolation :

La durée moyenne de l’insolation est de (286.7 h/mois), avec un maximum de (321,2 heures) en Août et un minimum et de (208.6 heures) en Février.

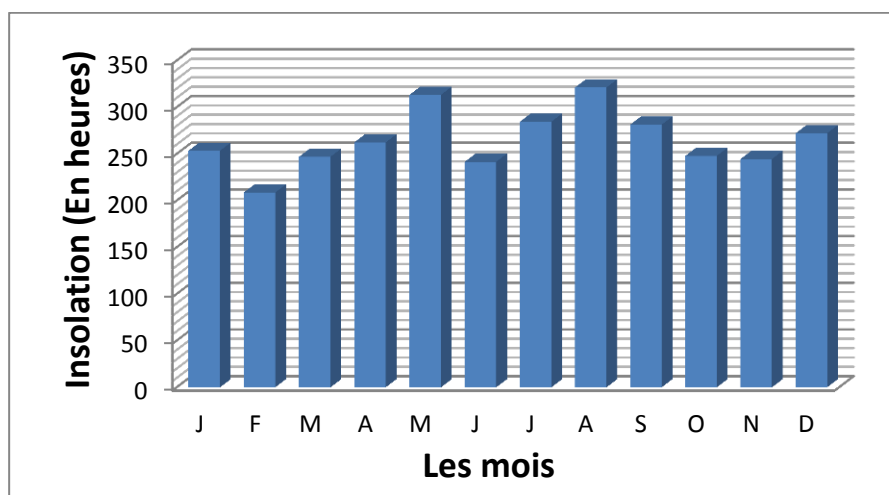


Figure I.4 : Durée mensuelle moyenne d’insolation de la région d’Ouargla (2018) [38].

I.2.4. Les Vents :

Il joue un rôle important dans le déplacement des insectes. D’après le tableau1, on constate que le vent est ou cours de toute l’année avec une vitesse moyenne de 10.09km/h.

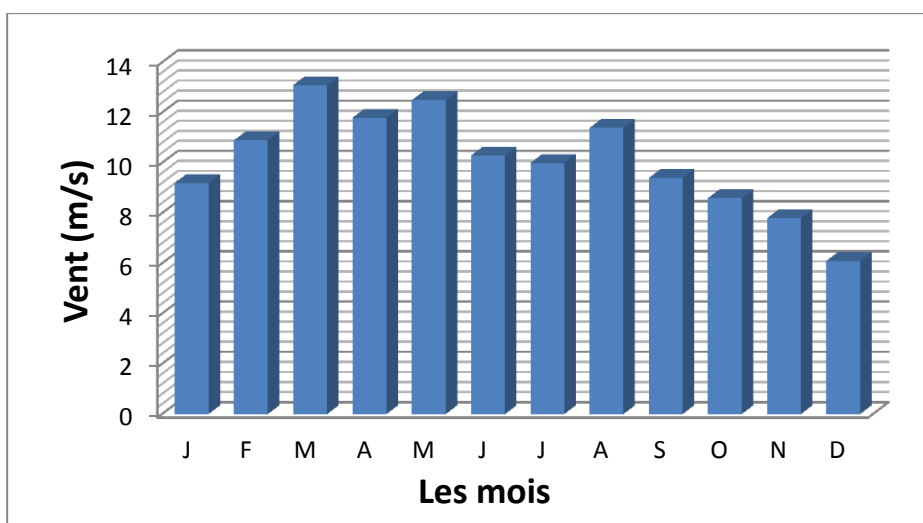


Figure I.5 : Le vent mensuel moyen de la région d’Ouargla (2018) [38].

I.2.5. L’évaporation :

L’évaporation dans la région d’Ouargla est très forte surtout durant les mois les plus chauds. La moyenne annuelle par mois est de l’ordre de (240.8 mm).Le maximaux remarqué au mois de Juillet (566,6 mm).Le minimum au de mois de Février (97.5 mm).

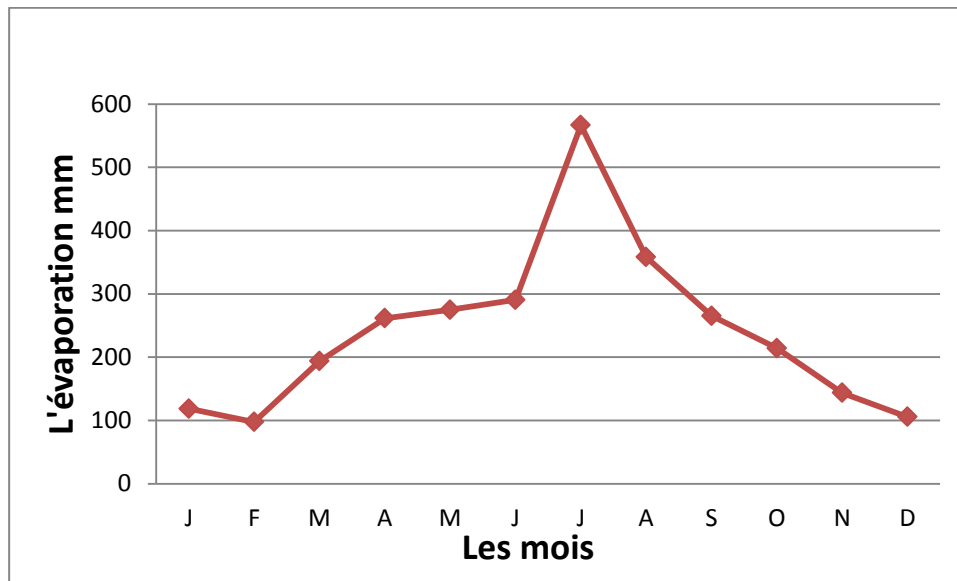


Figure I.6 : L'évaporation mensuelle moyenne de la région d'Ouargla[38].

I.2.6. L'humidité :

Dans la région d'Ouargla l'humidité relative de l'air est faible, avec une moyenne annuelle de (36.1 %). Elle diminue au mois de Juillet (15.5 %) à cause des vents chauds et la forte évaporation. Elle atteint son maximum aux mois de Décembre (52.5 %)

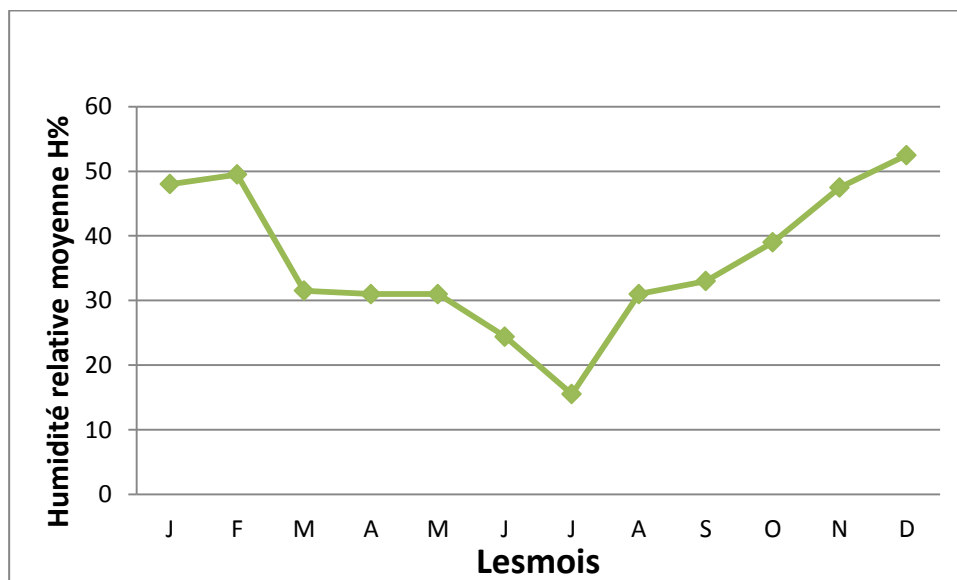


Figure I.7: L'humidité mensuelle moyenne de la région d'Ouargla (2018) [38].

I.3. Conclusion :

Dans les zones arides et semi-arides comme la région d'Ouargla, le climat et l'environnement doivent être déterminants dans toute étude de bâtiment.

Dans les périodes de surchauffe (juin, juillet et Août) que connaît la ville d'Ouargla, la consommation énergétique due à l'utilisation de la climatisation est énorme, c'est la raison pour laquelle il faudrait revoir les stratégies de construction dans cette région telles que les conceptions architecturales choisies, les matériaux de construction utilisés.....etc.

Chapitre II

*Les caractéristiques des
matériaux utilisés*

II.1. Introduction :

La terre crue est considérée comme le matériau de construction le plus vieux de la Terre, elle est à la base d'une multitude de constructions témoignage vivant de l'histoire et de la culture des peuples. Cependant le matériau terre n'est pas considéré, comme peuvent l'être le bois ou l'acier, comme un matériau noble. Bien au contraire les constructions en terre, ont le plus souvent une connotation dépréciée et sont recouvertes, dissimulées sous une couche de paraitre moderne.

Dans ce chapitre, nous étudions les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la fabrication des briques de terre locale et des fibres de palmier.

II.2. Le sable de dunes :

Le sable de dunes est le résultat d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivi d'un transport fluvial et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constitué de quartz. Il est caractérisé par une granulométrie fin et très serrée. Dans une autre signification le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, constitue la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir [39].

Pour notre étude nous avons utilisé le sable des dunes de Sidi-Khouiled (OUARGLA).



Figure II.1 : Sable des dunes[40].

Nous avons effectué les essais suivants :

- Analyse granulométrique ;
- La masse volumique absolue ;

- La masse volumique apparente ;
- Equivalent de sable ;
- Analyse chimique ;
- DRX.

Ces analyses sont effectuées au niveau de laboratoire de génie civil d'UKMO et laboratoire de travaux public de L.T.P.Sudunité d'OUARGLA et L.T.Ps unité de GHUERDAIA.

II. 2.1. Analyse granulométrique (norme NF P 18 -560)

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. L'échantillon représentatif doit avoir une masse comprise entre 200D et 600D, ou D est la plus grande dimension des granulats dans notre cas nous avons pris 1000 Kg. Les résultats obtenus sont présentes sur le tableau suivant :

Tableau II.1: résultats d'analyse granulométrie de sable des dunes.

ouverture des tamis (mm)	Refus cumulé (%)	Tamisât
5	0	100
2,5	0	100
1,25	0	100
0,63	2.45	97,55
0,315	40.58	59,42
0,16	79.87	20,13
0,08	99.71	0,29

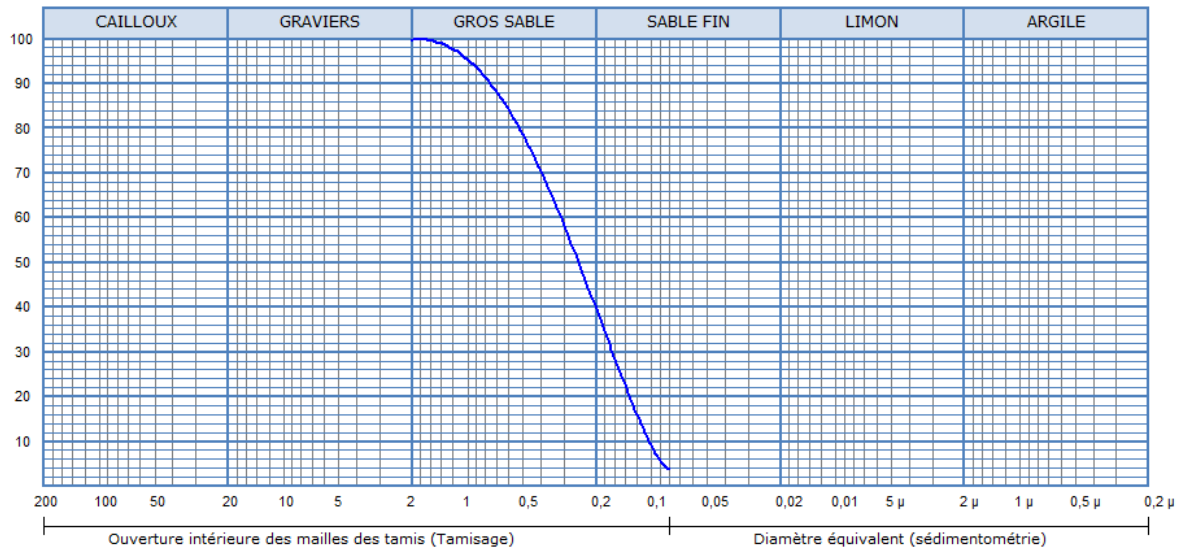


Figure. II.2 : courbe granulométrique de sable des dunes.

La figure II.2 montre que la courbe granulométrique de sable est caractérisée par une granulométrie fin et très serré

➤ **Module de finesse (NF P 18-540)**

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (M_F). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis (5, 2,5, 1,25, 0,63, 0,315, 0,16) mm [13][41].

Pour les sables utilisés dans notre étude on a trouvé la valeur suivante :

$$M_F = 1,224$$

Le module de finesse du sable fin utilisé dans la confection du béton doit être situé entre 1,7- 2,8.

Le module de finesse de l'échantillon de sable que nous avons utilisé est inférieur aux valeurs de cet intervalle, et cela confirmera la finesse de notre sable.

II.2.2.Masse volumique

a- Absolue (annexe A1)

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

$$\rho_s = \frac{M_t}{V_a}$$

ρ_s : Masse volumique absolue ;

M_t : Masse totale d'échantillon ;

V_a : Volume absolue d'échantillon ;

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

b- Apparente (annexe A2)

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

$$\rho_a = \frac{M}{V}$$

ρ_a : Masse volumique apparente ;

M : Masse totale de l'échantillon ;

V : Volume total de l'échantillon.

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

II.2.3. Equivalent de Sable (norme NF P 18-598)

L'essai d'équivalent de sable permet de manière courante pour évaluer la propreté des sables. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie celui-ci l'essai effectué sur fraction 0/5 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout au bout de 20 minutes on mesure les éléments suivants :

-h1 : hauteur de sable propre + éléments fines (floculat).

-h2 : sable propre seulement. (Annexe A3)

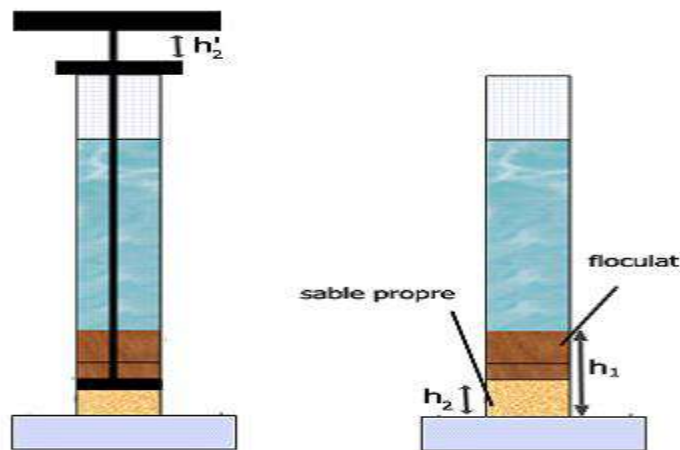


Figure II.3: Définition de l'équivalent de sable [42].

Les résultats obtenus sont les suivants :

Visuel= 97,4

Piston=93,8

Donc ce sable est très propre et acceptable pour la composition de béton et de mortier Selon la norme NF P 18 598.

II.2.4. Analyse chimique

Le secteur montre les pourcentages des composants chimiques du sable des dunes. Cette analyse est réalisée au laboratoire LTP Sud de OUARGLA (Annexe A4).

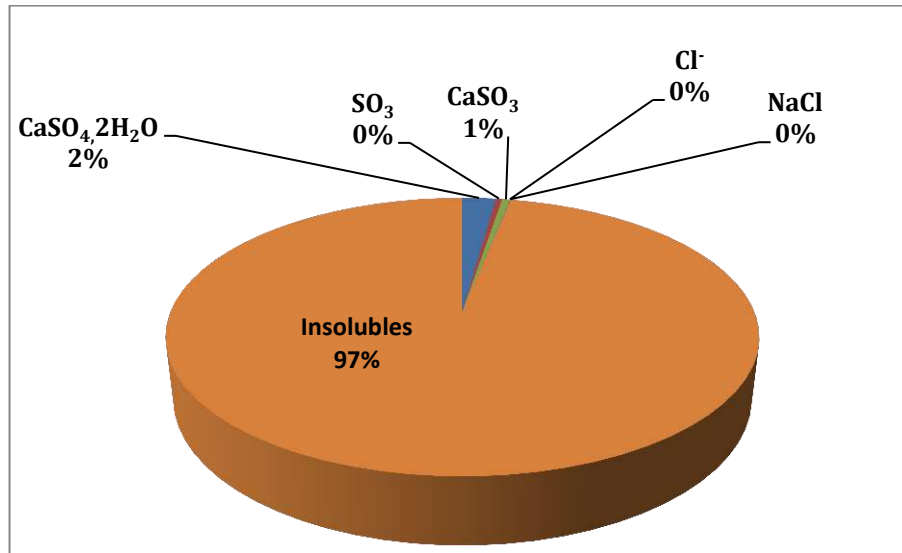


Figure II.4:Analyse chimique de sable des dunes.

Nous remarquons que le pourcentage du (Ca SO₃), (SO₃) est inférieur à la limite préconisée. De ce fait le sable utilisé est non agressif.

II.2.5. Diffraction des rayons X (DRX) :

La diffraction des rayons X consiste à applique un rayonnement de la longueur d'onde des rayons X ($0.1 < \lambda < 10\text{nm}$) sur un échantillon argileux orienté ou non. Le rayonnement pénètre le cristal, il ya absorption d'une partie de l'énergie et excitation des atomes avec émissions de radiations dans les toutes les directions. Les radiations émises par des plans atomiques qui sont en phases vont engendrer un faisceau cohérent qui pourra être détecté.

La figure II.5 montre le diffractogramme de sable des dunes:

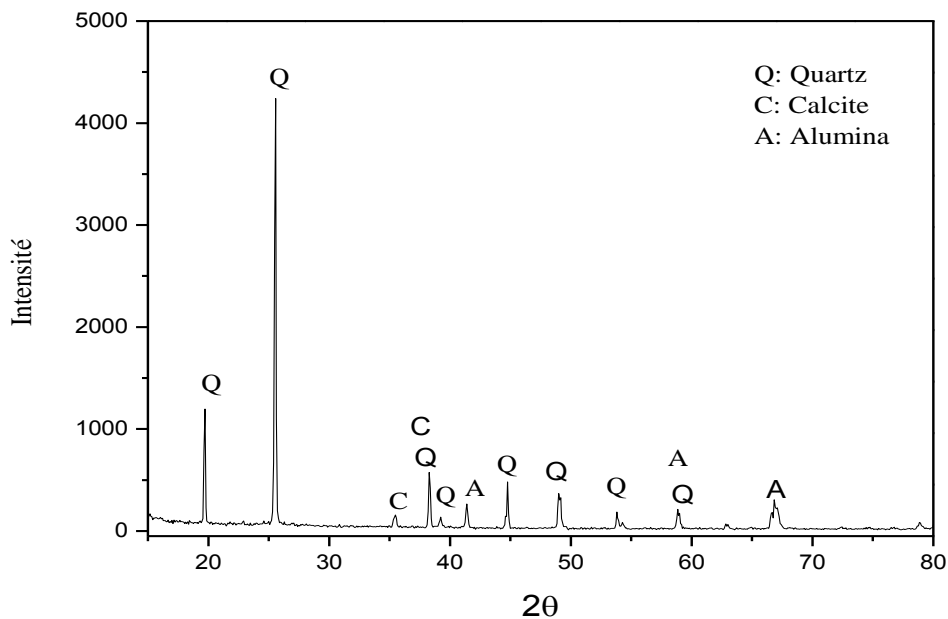


Figure II.5 :Diffractogramme de sable des dunes

Suivant mesures menées à partir de diffractogramme figure (II-5), qui a été effectué au niveau du laboratoire de L.T.Ps unité de GUERDAIA, on peut constater ce qui suit :

- Le quartz forme une grande part des minéraux avec un pourcentage de 80 %.
- Le gypse se trouve sous forme des grains fins de couleur blanchâtre avec un Pourcentage de l'ordre de 3 %.
- Le alumina et la calcite sont trouvés avec des pourcentages faibles au tour de 10 % [5].

II.3. l'Argile :

L'argile est uneroche sédimentaire meuble, constitué d'un ensemble de particules fines (de diamètre inférieur à $2\mu\text{m}$). Du point de vue structural, les minéraux argileux sont formés d'un empilement de feuillets, entrecoupé par un espace inter foliaire. Cette structure rend les matériaux argileux particulièrement sensibles à l'eau [15].

Pour notre étude on a utilisé l'argile de Touggourt le gisement de Beldet Amer.



Figure II.6 : Echantillon de l'argile utilisé

Nous avons effectué les essais suivants sur l'argile :

- Analyse granulométrique sédimentation ;
- Densité sèche ;
- Bleu de méthylène ;
- Limite d'Atterberg ;
- Analyse chimique ;
- DRX.

Ces essais sont réalisés au laboratoire de travaux public de L.T.P.Sud OUARGLA et L.T.Ps GHUERDAIA.

II.3.1. Analyse granulométrique par sédimentation (norme NFP94- 056/NF P 94-057)

L'analyse granulométrique par sédimentation est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage, l'essai a pour objet de détermination de la distribution pondérale de la taille des particules fines de sols de dimension inférieure à 0,08mm.

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

Tableau II.2 : analyse granulométrie d'argile

Type d'essai	Diamètre des tamis (mm)	Tamisât (%)
Tamisage	5	100
	2	100
	1	100
	0.4	99

	0.2	98
	0.1	96
	0.08	95
Sédimentation	0.075	95
	0.055	82
	0.038	78
	0.025	78
	0.017	76
	0.012	73
	0.008	69
	0.006	65
	0.004	65
	0.003	58
	0.002	36
	0.001	9
	0.0005	4

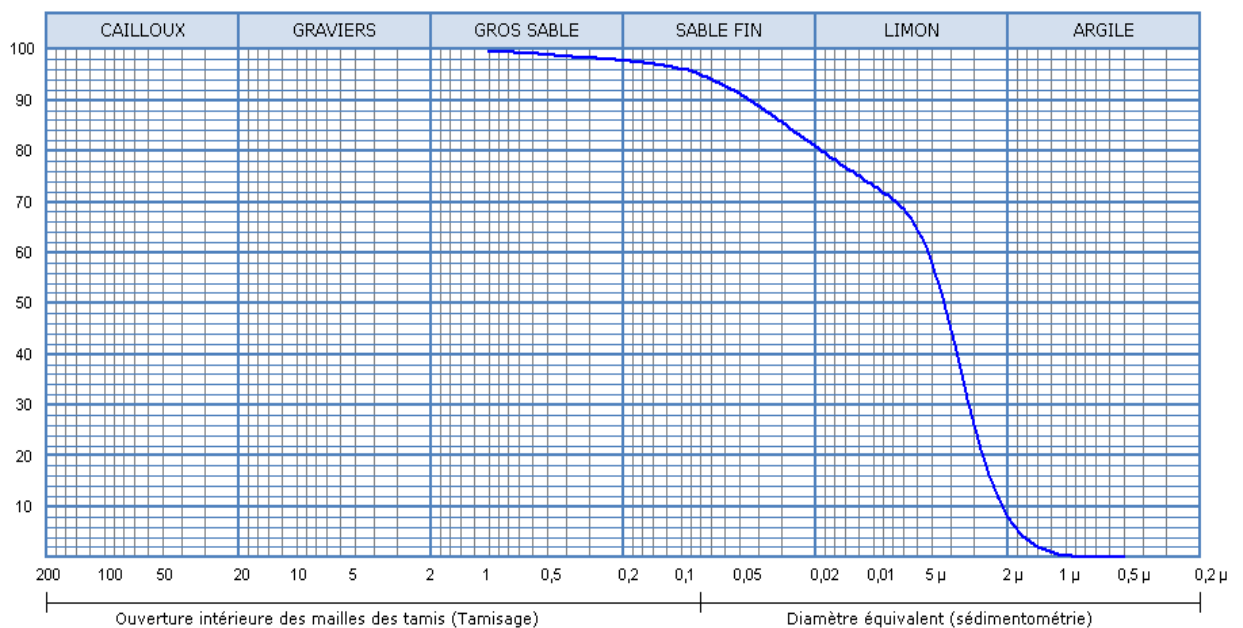


Figure II.7 : Courbe granulométrique d'argile

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

≈ 10 % d'argile

≈ 70 % de limon

≈ 20 % de sable fin.

II.3.2. Densité sèche (norme NF P 94-064)

Le résultat de la densité sèche est :

- La densité sèche $P = 1,91 \text{ g/cm}^3$

II.3.3. Bleu de méthylène (NF EN 933-9)

L'essai au bleu de méthylène permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la surface interne et externe des grains argileux [15].

Pour ce faire, on fixe sur les grains d'argile des molécules de bleu de méthylène et par un test simple, on évalue la quantité de bleu fixé. On en déduit la valeur au bleu du sol, ou V_{bs} .

Les résultats sont représentés dans le tableau II.3 ci-dessous :

Tableau II. 3: Valeur de bleu de méthylène de l'argile utilisé

Echantillon	Valeur de bleu	Classification
Argile	8	Sol argileux

II.3.4. Limite d'Atterberg (Norme NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales, caractéristiques du sol. Elles correspondent à des comportements particuliers de celui-ci sous l'action des variations de la teneur en eau. Ces limites sont déterminées sur la fraction de sol passant au travers du tamis $400\mu\text{m}$ [13].

Les deux limites sont :

WL : limite de liquidité: teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.

WP : limite de plasticité: teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide.

A partir des résultats obtenus, l'indice de plasticité I_p sera déterminé avec :

IP : indice de plasticité: différence entre les limites de liquidité et de plasticité.

Cet indice définit l'étendue du domaine plastique (voir Figure II.8).

$IP = WL - WP$

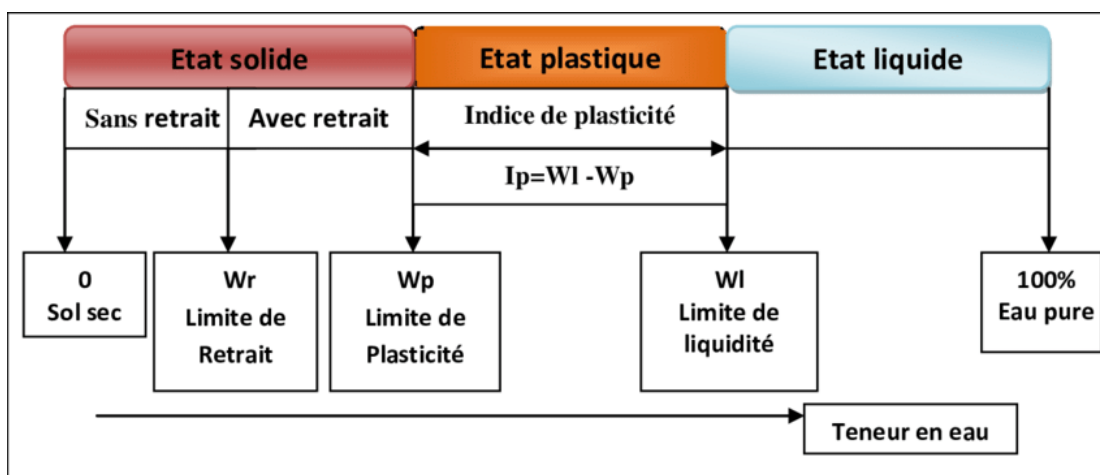


Figure II.8: Présentation des limites d'atterberg[43]

Classification des argiles selon les limites d'ATTERBERG

➤ Selon BURMISTER,1967 :

Il propose une classification détaillée de la plasticité des argiles en fonction de l'indice de plasticité tableau II.3.

Tableau II. 4: Classification des argiles selon BURMISTER[41][44]

$I_p(\%)$	0	1à5	5à10	10à20	20à40	>40
Plasticité	non plastique	légère	faible	moyenne	élevée	très élevée

Atterberg (1973) classe la plasticité des argiles en trois niveaux comme montrés dans le tableau II.5.

Tableau II. 5:Classification des argiles selon Atterberg.

IP (%)	<7	7 à 17	>17
Plasticité	Faible	Moyenne	Elevée

Les résultats obtenus des limites d'Atterberg sont :

WL = 69,58 %

WP = 24,71 %

IP = 44,87 %

Ces essais sont réalisés au laboratoire de travaux publics de sud L.T.P.S OUARGLA.

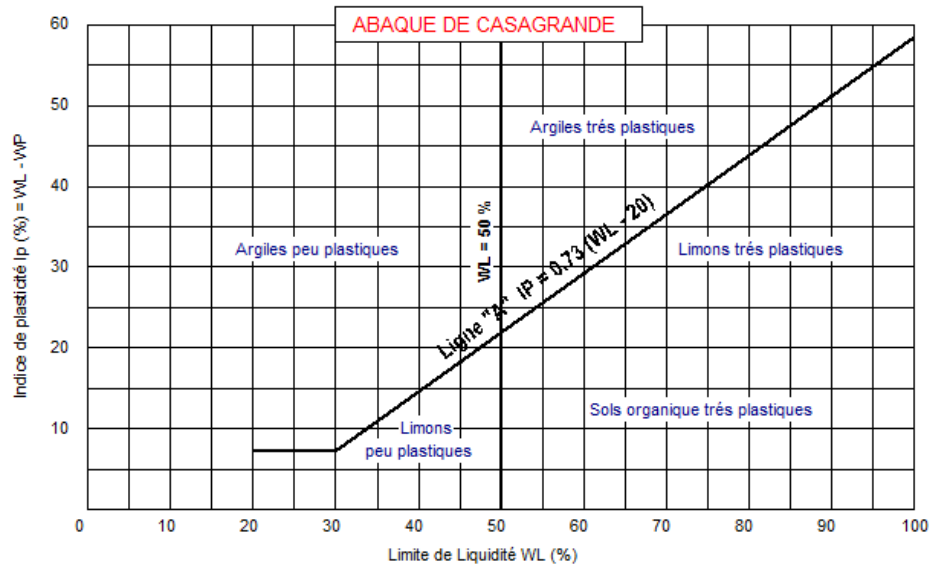


Figure. II.9: Abaques de CAZAGRANDE de l'argile

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

II.3.5. Analyse chimique

Les résultats des analyses chimiques réalisées sur un échantillon d'argile utilisé son représentés dans le secteur ci-dessous :

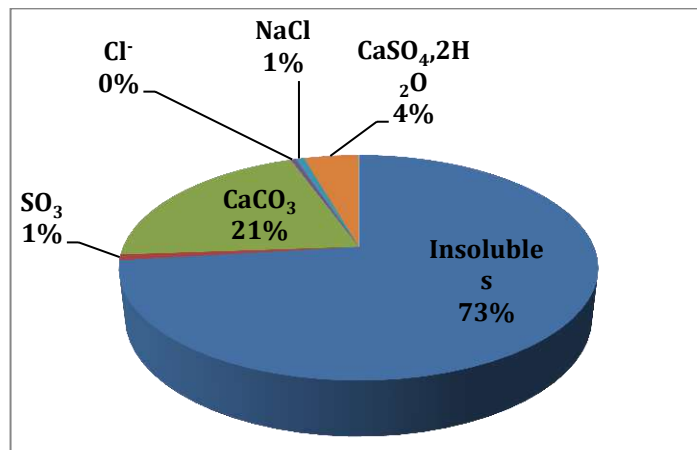


Figure II.10 : Analyse chimique d'argile.

Ces essais sont réalisés au laboratoire de travaux publics de sud L.T.P.S Ouargla. Le secteur montre que les éléments dans le sol est les insolubles en pourcentage environ de 73 %, les teneurs en sulfates et en chlorures sont très faible.

II.3.6. Diffraction des rayons X (DRX) :

L'analyse minéralogique des argiles a été faite à l'aide de la diffraction des rayons X (DRX). Cette technique permet d'identifier les phases cristallines présentes dans l'argile et de déterminer les paramètres de maille associés. Ces applications sont possibles grâce à l'interférence des rayons X avec la matière. L'identification des phases a été réalisée à l'aide de Xpoder [45].

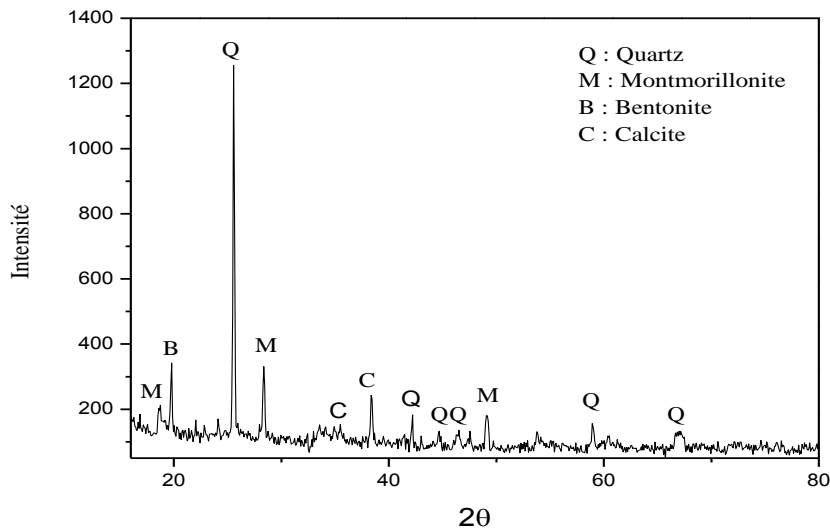


Figure II.11 : Défractogramme d'argile

D'après la Figure II.11 qui représente le diffractogramme de l'argile. Nous constatons que l'échantillon est constitué essentiellement de minéraux associés de quartz et de Montmorillonite, ainsi que la Bentonite.

II.4. Les Fibres:

Les fibres sont dégagées du tronc du palmier sous forme d'une toile presque rectangulaire (300 à 500 mm de longueur et 200 à 300 mm de largeur), qui est composée de trois couches superposées (figure II.12). Il est facile de les séparer en fibres individuelles d'un diamètre de 0,1 à 0,8 mm dans l'eau (figure II.13). Ces fibres sont finalement découpées en morceaux de longueurs entre 20 et 35mm (figure II.14), (annexe A9, 10,11).

Dans cette étude, on a utilisé des fibres de surface de palmier dattier mâle (lif) (FSPDM) de dokar KRIKER [29], après ces études effectuées sur quatre types de fibre de surface de palmier dattier (les fibres de dokar, deglettenour, deglabida et d'elghers), il a constaté que les fibres de dokar donnent le meilleur résultat de point de vue résistance à la traction. C'est pour cette raison notre choix est porté pour les fibres de dokar.



Figure II.12: Le lif après son **Figure II.13:** Les fibres résultant. **Figure II.14:** Les fibres arrachement du palmier dattier. de la décomposition du lif. découpées en morceaux.

II.4.1. Caractéristiques des Fibres de Palmier Dattier :

Les essais effectués sur les fibres ont permis de caractériser les fibres de palmier dattier d'Ouargla comme suit [46] :

- Masse volumique apparente : $\rho_a = 512.21 - 1088.81 \text{ Kg/m}^3$;
- Masse volumique absolue : $\rho_s = 1300 - 1450 \text{ Kg/m}^3$;
- Charge de rupture à la traction : $F_t = 85 \text{ N}$ (fibre de diamètre 8 mm);
- Déformation à la rupture : $\delta = 0.232$ (fibre de diamètre 8 mm);
- Taux d'humidité : $w = 9.5 - 10.5 \%$;
- Taux d'absorption (après 24 H): $TA = 96.83 - 202.64 \%$;
- Diamètre (des fibres utilisées) : $d = \text{varié entre } 0.2 - 1 \text{ mm}$;
- Longueur (des fibres utilisées) : $L = 1 \text{ cm}$.

II.4.2. Composition chimiques des fibres de palmier dattier

L'analyse spectrochimique de la poudre des fibres après calcination à 400 °C a donné les éléments suivants : les essais dont réalise au laboratoire " INSA Lyon"[46]

Tableau II.6 : Analyse chimique de la poudre des fibres calcinées à 400 °C

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
%	48.04	6.12	2.51	0.05	4.88	14.2	1.81	2.8	0.42	0.45	18.08

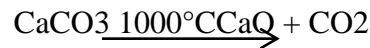
Vu le pourcentage élevé de SiO₂ et CaO, nous remarquons que les fibres utilisées contiennent aussi de la silice et de la chaux.

II.5. La chaux :

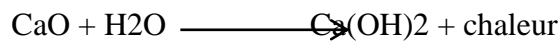
L'utilisation de la chaux dans la stabilisation des sols est connue depuis l'antiquité. Elle a été utilisée comme stabilisant de la chaussée par les Romains et d'autres civilisations anciennes (Jarrige, 1989). La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Chimiquement, c'est un oxyde de calcium avec plus ou

moins d'oxyde de magnésium, mais la désignation usuelle de chaux peut englober différents états chimiques de ce produit. On les distingue notamment dans le langage courant par rapport à leurs utilisations dans la construction :

–**La chaux vive** est le produit direct de calcination du calcaire, principalement de l'oxyde de calcium (CaO).



–**La chaux aérienne**, ou chaux éteinte, est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est constituée surtout d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂). Elle est dite « aérienne », car elle réagit avec le CO₂ de l'air.



–**La chaux hydraulique** contient en plus des silicates et des aluminates, car elle provient de calcaires argileux. Elle est appelée « hydraulique » parce qu'elle durcit en présence d'eau. Tous les types de chaux peuvent être employés, mais la préférence est donnée néanmoins aux chaux aériennes qu'aux chaux hydrauliques (Doat, 1979).

La chaux est surtout conseillée pour les sols contenant une fraction argileuse de 20 % et les sols ayant IP > 17 et LL > 40.

La chaux éteinte est beaucoup plus conseillée que la chaux vive, car cette dernière présente deux inconvénients majeurs : conservation difficile à l'abri de l'humidité avant son emploi et manipulation pénible lors des mélanges (Le Roux, 1969) ; (Gresillon, 1976). Le Roux (Le Roux, 1987) a prouvé que pour des sols riches en kaolinite, la résistance (de 2 jusqu'à 90 jours) croît avec la teneur en chaux, mais que pour des sols riches en illite, un optimum de 5 % de chaux se caractérise à moyen et à long terme[47].

II.5.1. Mécanismes

Deux phases regroupant quatre types de réactions peuvent se produire lors d'une stabilisation à la chaux ; l'**échange cationique**, la **floculation et l'agglomération** des argiles, la **carbonatation** de la chaux et les **réactions pouzzolaniques** entre la chaux, la silice et/ou l'alumine (Choquette, 1988; Locat, 1990; Roger, 1996a). Dans un premier temps, les deux premières réactions augmentent la plasticité, la maniabilité ainsi que la résistance du sol et réduisent typiquement l'indice de plasticité. Cette première phase est reconnue comme étant la période de modification du sol.

La deuxième phase est celle de la stabilisation qui englobe le troisième et quatrième type de réaction. Cette période entraîne une cimentation du produit qui augmente progressivement la résistance au cisaillement et la durabilité du sol. Il est reconnu qu'une température inférieure à 13 °C peut décélérer le processus de stabilisation alors qu'une température plus élevée l'accélère

(Moore, 1987). En utilisant de la chaux vive, la diminution de la teneur en eau sera plus forte en raison de la chaleur dégagée par la réaction (réaction exothermique). Quoique la chaleur dégagée par la réaction soit en grande partie responsable de l'évaporation de l'eau, le malaxage peut également provoquer une aération qui, elle aussi, est bénéfique à l'évaporation. Un apport de matériaux secs peut aussi contribuer au processus d'assèchement[47].

II.5.2. Domaine d'application :

Les chaux aériennes et les chaux ayant des propriétés hydrauliques sont destinées au domaine de la construction en général (bâtiment et génie civil). Cependant, leurs caractéristiques, leurs propriétés, et donc leur domaine d'application, diffèrent d'une famille à l'autre.

- **Dans le domaine du bâtiment :** les chaux aériennes, sous forme hydratée, et les chaux ayant des propriétés hydrauliques sont principalement utilisées dans la confection de mortiers, enduits et badigeons ainsi que dans la fabrication du béton de chanvre. Les chaux aériennes calciques sous forme vive entrent dans la composition du béton cellulaire et des briques silico-calcaires.
- **Dans le domaine du génie civil :** les chaux aériennes, principalement calciques à l'état vive, sont utilisées pour le traitement des sols et des matériaux (recyclage, valorisation, réemploi). La chaux aérienne calcique, sous forme vive ou hydratée, est utilisée comme composant, et éventuellement activateur, dans des liants à base de ciments, laitiers, cendres volantes, etc.
- La chaux aérienne calcique sous forme hydratée entre dans la composition des mortiers techniques (mortiers d'injection, mortiers de bourrage de tunnels, etc.).
- **Dans le domaine des enrobés bitumineux :** la chaux aérienne calcique, sous forme hydratée peut être utilisée comme additif multifonctionnel dans les enrobés bitumineux.
- Les laits de chaux calciques, trouvent une application en protection des couches d'accrochages. Ces dernières, répandues avant la pose de l'enrobé bitumineux, restent fragiles vis-à-vis de la circulation des engins de chantier. Les laits de chaux les protègent contre l'arrachement des roues et des chenilles d'engins[48].

II.5.3. La composition chimique :

Dans cette étude on a utilisé la chaux éteint produite par l'unité de chaux de Ghardaïa (Algérie). La composition chimique de la chaux éteint, selon la fiche technique élaborée par l'unité de production, est présentée dans le tableau :

Tableau II.7 : La composition chimique de la chaux éteint (selon la fiche technique élaborée par l'unité de production de chaux de Ghardaïa, Algérie)[47].

Désignation		NHL
Provenance	Usines ERCO de Hassasna (wilaya de Saida, Algérie)	
Propriétés physiques	Densité volumique	600-900g/l
	Coefficient d'absorption	< 5
	Sensibilité au gel	
	Volume d'extinction	2,73 cm³
Composition chimique	Humidité	< 5
	CaO	> 83,3%
	MgO	<0,5%
	Fe₂O₃	< 2%
	Al₂O₃	< 1,5%
	SiO₂	< 2,5%
	SO₃	< 2,5%
	Na₂O	< 4,7-0,5%
	CO₂	< 5%
	CaCO₃	<10%
	Insolubles dans HCl	< 1%

II.6. Ciment blanc :

Le ciment blanc est un ciment Portland, il est fabriqué à partir des matières premières brutes particulièrement choisies qui sont généralement la craie pure et l'argile blanche (kaolin) contenant de très petites quantités d'oxyde de fer et d'oxyde de manganèse. Le ciment blanc est fréquemment choisi par les architectes pour son utilisation dans la fabrication du béton blanc, blanc cassé ou coloré, qui sera exposé, à l'intérieur ou à l'extérieur des édifices, au regard du public. Il est bien connu que la fabrication du ciment blanc exige un contrôle rigoureux et précis durant l'ensemble des étapes du processus technologique afin d'empêcher la contamination du produit avec le fer, le manganèse, et le titane. Le ciment blanc se caractérise par une teneur extrêmement basse de C₄AF (moins de 1,5%) et une teneur élevée de C₃S et de C₂S[49].

II.6.1. Le processus de fabrication du ciment blanc

Le processus de fabrication du ciment blanc est tout à fait semblable à celui du ciment portland gris. Le processus inclut le choix des matières premières, la préparation du mélange cru,

la cuisson du clinker, le blanchiment et le refroidissement et le broyage. La production se fait selon des conditions précises, qui sont contrôlées à chaque étape, afin d'éviter les contaminations possibles et les changements peu désirés. Cependant, la principale différence technologique réside dans la combinaison du refroidissement et du blanchiment, nécessaires pour améliorer la blancheur du ciment et garantir l'homogénéité de la couleur. Le ciment Portland blanc a donc essentiellement les mêmes propriétés que le ciment gris, excepté la couleur. La blancheur du ciment blanc est une des caractéristiques les plus importantes. Les spécifications de la blancheur font ressortir les grades suivants :

- ✓ 1er Grade: blancheur > 80%.
- ✓ 2ème Grade: blancheur de 75 à 80%.
- ✓ 3ème Grade: blancheur de 68 à 75%[48].

II.6.2. Types et domaines d'application :

Tableau II.8 : Types et domaines d'application de ciment blanc[49].

type	Domaine d'application
Ciment Portland blanc au calcaire	Constitué de clinker Portland et de calcaire blancs, le CEM II/A-LL 42,5 N couvre tous les usages courants.
Ciment Portland Blanc	Le ciment Portland blanc peut être obtenu en diverses classes de résistance, permettant de couvrir tous les cas particuliers d'application

Le ciment utilisé dans notre travail est celle de Lafarge Algérie (BISKRA)

Les résultats des analyses chimiques réalisées sur un échantillon de ciment blanc utilisé sont représentés dans le secteur ci-dessous :

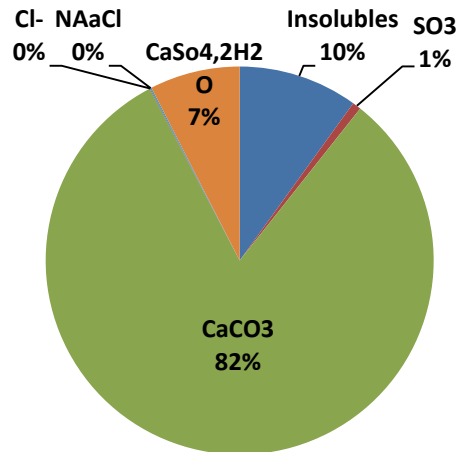


Figure II.15 : Analyse chimique de ciment blanc

Le secteur montre que les éléments dans le ciment est CaCO₃ en pourcentage environ de 82 %, les teneurs en sulfates et en chlorures sont très faible.

II.7. Eau de gâchage

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

Tableau II.9 : Composition chimique de l'eau.

Ca ⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	PH
242	125	31	536	755	14.5	755	124	6.75

Les concentrations sont données en mg/l.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé d'identifier les caractéristiques des matériaux utilisés suivant les normes "AFNOR", on peut conclure ce qui suit :

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

- La granulométrie de sable étudié est très serrée ;
- La valeur de module de finesse de sable dunaire est très faible, cette valeur confirme qu'il est presque vacant de grains moyens et grossiers.

L'argile utilisée est une argile extraite de gisement de BeldetÂmer daïra de Touggourt Wilaya de OUARGLA qui se caractérise par :

- Une granulométrie de grande proportion de limon (70%) ;
- La densité sèche =1.91 g/cm³ ;
- Indice de plasticité d'ordre 44.87% ;
- Nature d'argile très plastique.

La chaux utilisée est une chaux éteint produite par l'unité de chaux de Ghardaïa.

Les analyses chimiques du ciment blanc montrent que les teneurs en sulfates et chlorures sont très faible.

L'eau de gâchage est de robinet du laboratoire de génie civil de l'université OUARGLA avec une salinité acceptable.

Chapitre III

*Résultats et
interprétations*

III.1. Introduction :

Le but du présent chapitre consiste à confectionner et ensuite déterminer les caractéristiques thermomécaniques des briques à base de terre locale crues de dimensions (4*4*16) cm par l'utilisation d'argile, de sable de dunes et des fibres de palmier traité par la chaux et stabilisé par le ciment blanc. Nous avons procédé à trois mesures (essais), pour chaque formulation pour effectuer des différents essais sur les briques à savoir :

- Essais mécaniques :
 - Flexion ;
 - Compression ;
 - Essai ultrasonique.
- Essai thermiques :
 - Conductivité thermique (λ)
 - Résistance thermique (R_{th})
 - Chaleur spécifique (C_p)

Il est à noter que tous ces essais sont effectués aux :

- Laboratoire de génie civil de l'université d'Ouargla.
- Laboratoire LNHC Ouargla.
- L.T.Ps de GHUERDAIA.

III.2. Essais réalisés pour la détermination des propriétés thermomécaniques :

III.2.1. Essais mécaniques :

III.2.1.1. Essai de la résistance de traction par flexion

Des éprouvettes prismatiques sont soumises jusqu'à rupture à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale atteinte au cours de l'essai est enregistrée et la résistance en flexion est calculée.

La résistance à la flexion d'une brique est déterminée selon la norme inspirée (NF P 15- 471) par un dispositif de flexion trois points. Le chargement se fait suivant la figure III.1

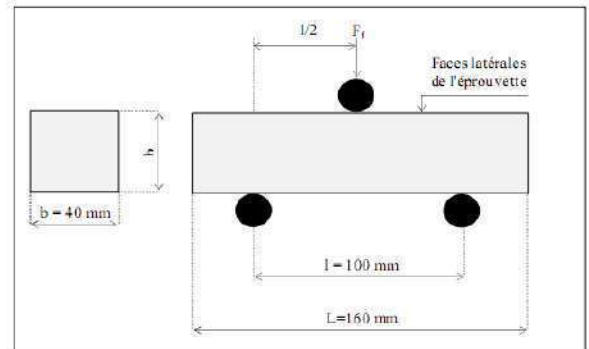


Figure III.1 : Dispositif pour l'essai de traction par flexion

La résistance à la flexion sera déterminée par la formule ci-dessous :

Avec :

$$R_f = \frac{3FL}{2ba^2} = \frac{6F}{a^2}$$

R_f : est la résistance à la flexion.

F : est la force appliquée en N.

a : est la côté de la brique en mm^2 .

III.2.1.2. La Résistance à la Compression :

La résistance à la compression est déterminée selon la norme NF P 18-406, cet essai a pour objet la détermination de la résistance à la compression ou la résistance à l'écrasement d'une partie de la brique après l'essai de flexion. La figure suivante montre le dispositif expérimental de l'essai de compression.

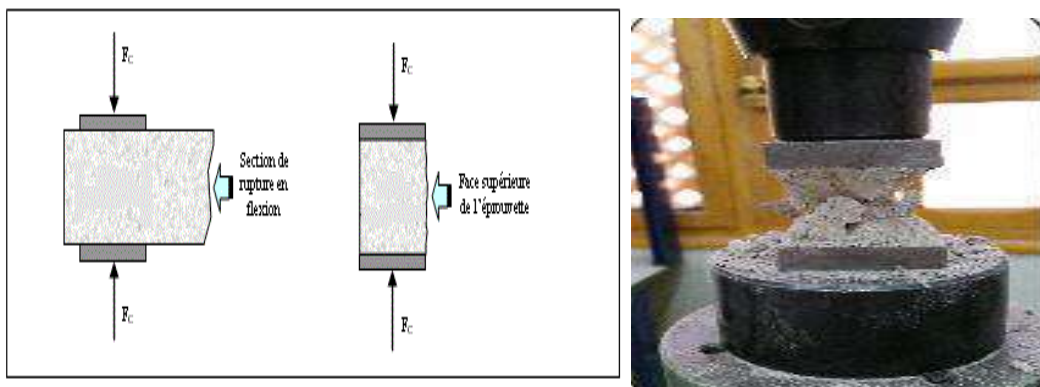


Figure III.2 : Dispositif de rupture en compression

La résistance à la compression sera déterminée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{S}$$

Avec :

R_c : Résistance à la compression exprimée en MPa.

F : Charge maximale supportée par l'éprouvette en N.

S : la section transversale de l'éprouvette mm^2 .

III.2.1.3. Vitesse de propagation du son :

a- Objectifs d'essai :

Mesure de la vitesse des impulsions ultrasoniques de vibrations longitudinaux passant à travers la brique peut être utilisé pour les applications suivantes:

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

b- Principes de l'essai :

Mesure du temps de propagation de la première impulsion d'un d'ondes appelées ondes longitudinales généré par un transducteur entre deux points déterminés de la brique (photo III.3). On peut à partir du temps propagation mesuré, exprimer une vitesse conventionnelle de propagation : c'est le quotient de la distance entre transducteur par le temps mesuré.

Expression des résultats

La vitesse conventionnelle de propagation est calculée par la formule :

$$V = \frac{l}{t}$$

L : est la distance entre le transducteur en mètres.

t : est le temps de propagation en secondes.

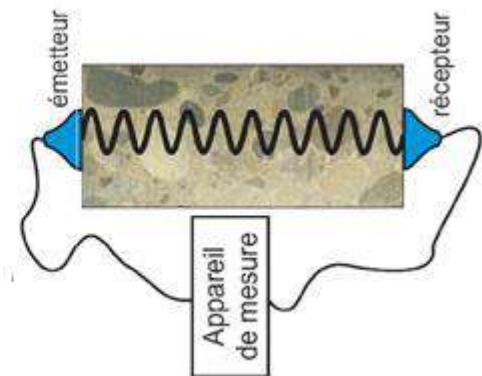
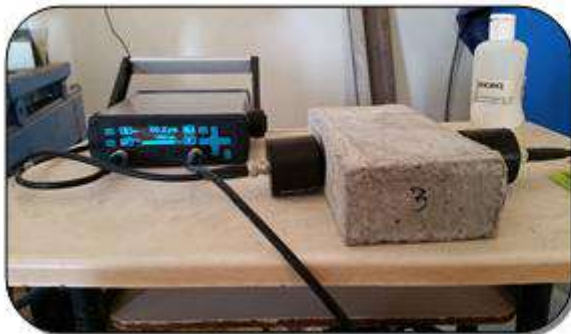


Figure III.3 : Mécanisme de l'appareil d'ultrasonique

III.2.2. Essai thermique :

Les propriétés isolantes des matériaux de construction se quantifient au travers de deux paramètres usuels : la conductivité thermique « λ » et la diffusivité « a ». Ceux-ci dépendent des caractéristiques intrinsèques des constituants, de la microstructure du matériau et des conditions de conservation (rôle de l'eau).

Dans notre travail expérimental on a pu réaliser l'essai thermique permettant de calculer :

La **conductivité thermique** « λ » exprimée en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, traduit l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur.

La **diffusivité thermique** « a » d'un matériau exprime la vitesse de propagation d'une perturbation thermique dans un milieu, elle est exprimée en (m^2/s) .

Pour cette mesure il existe plusieurs méthodes d'essai, nous avons utilisé dans notre cas la méthode dite de la Source Plane TPS.

a- Technique de la Source Plane TPS :

➤ **Démarche expérimentale :**

La conductivité thermique, la diffusivité thermique et la chaleur spécifique par unité de volume de chaque éprouvette, ont été déterminées en utilisant la technique **Hot Disk TPS1500 de Thermal Constant Analyzer Test System (Photo III.4)** disponible au niveau du laboratoire de génie civil, division : Développement et Valorisation des Matériaux Locaux « Durabilité et Transfert thermique » de l'université de GHURDAIA.



**Photo III.4. La sonde
Hot Disk**



**Photo III.5. Dispositif
de serrage**



Photo III.6 : Mesure de propriétés thermique à l'aide du system «Hot Disk».

L'essai consiste à serrer la sonde de dimensions (40x60mm) celle dans la (Photo IV.6) entre deux échantillons des mêmes dimensions (40x40x20mm) selon un dispositif sandwich tenus entre un support (voir Photo IV.5) afin d'empêcher de bouger les échantillons, ensuite on délivre un flux de chaleur d'une puissance égal à (0.25W) pour l'état saturé des échantillons et (0.55W) pour l'état sec. On obtient par la suite le graphe des températures expérimentales T_0 enregistrées à chaque seconde. La durée totale du régime transitoire varie de 40 à 80 secondes selon état (sec). Le thermographe enregistrant l'élévation de la température dans la sonde TPS a montré que l'évaluation des paramètres

thermiques peut être effectuée en utilisant une plage de points de mesures située entre 60 à 160 de chaque série de mesure.

b- Caractéristiques thermiques :

- La conductivité thermique(λ)
- La chaleur spécifique (C_p)
- Résistance thermique (R)

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Où :

e : l'épaisseur ;

λ : la conductivité thermique ;

C_p : la chaleur spécifique.

III. 3. Préparation et confection des briques

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

1. Peser l'argile (voir photo annexe N°12) ;
2. Peser le sable de dunes (voir photo annexe N°13) ;
3. Peser les fibres (voir photo annexe N°14) ;
4. Imbiber l'argile jusqu'à la saturation durant 24h (voir photo annexe N°15) ;
5. Résoudre la chaux dans l'eau(voir photo annexe N°16) ;
6. Ajouter la solution (eau + chaux) aux ingrédients;
7. Mélanger les ingrédients manuellement (voir photo annexe N°17) ;
8. Met le gras dans le moule (voir photo annexe N°18);
9. Remplir les moules en métal (4*4*16) (voir photos annexe N°19) ;
9. Sécher les briques à l'air libre pendant 4 jours (voir photo annexe N°21).

Nous avons proposé sept compositions en plus la composition de référence. Les compositions utilisées sont indiquées dans le tableau III.1.D'après l'étude bibliographique, la quantité d'eau optimale pour la confection de brique est 35 % de la masse sèche (sable + argile + fibre) :

Tableau III.1.Compositions utilisées

	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
M (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
Chaux(%)	0	5	10	15	20	25	50	75

M= 67% Argile+ 30% Sable+ 3% Fibre

III.4. Résultats obtenus et discussion :

III.4.1. Traitement par chaux :

III.4.1.1. La masse volumique apparente:

Nous montrons une réduction de la masse volumique des briques selon l'augmentation des pourcentages des quantités de la chaux, en effet la masse volumique d'argile est plus grande que celle de la chaux.

- La masse volumique des échantillons (C1) est la plus élevée avec 5% de chaux.
- On remarque que l'addition de 5% de chaux augmente la masse volumique des briques ceci est dû à la capacité de la chaux à s'infiltrer et colmater les orifices existants dans la brique. De même, la chaux stabilise le comportement de l'argile en terme gonflement/retrait. Ceci permet de confectionner des briques de forme régulière.
- L'ajout des pourcentages de chaux supérieur à 5% diminue progressivement la masse volumique car cet effet permet de substituer les particules d'argile par celle de chaux.

III.4.1.2. Caractéristiques mécaniques :

❖ Résistance à la flexion :

Nous constatons que :

- Une augmentation de la résistance à la flexion des briques par rapport aux briques témoins ($R_f = 0.8\text{MPa}$) est remarquée, d'où sa valeur maximale est notée dans la composition C1 avec $R_f = 1.9\text{MPa}$ ce qui signifie que la cohésion, l'adhérence et la consistance de la matrice est améliorée par le biais de l'ajout d'un pourcentage 5% de chaux.
- On note une diminution légère dans la résistance des briques à la flexion après avoir atteint la valeur maximale en C1.
- La résistance à la flexion des échantillons (C2 C3 C4 C5 C6 C7) est moins importante que celle de l'échantillon (C1), ceci est dû à la présence de la chaux avec des teneurs plus élevées. En outre, c'est la réflexion de la diminution de la masse volumique illustrée au paragraphe III.4.1.1.

❖ Résistance à la compression :

On constate une augmentation de la résistance à la compression des briques par rapport aux briques témoins ($R_c = 0.8\text{MPa}$) ou sa valeur maximale est notée dans la composition C1 avec $R_c = 2.1\text{MPa}$ une preuve de la bonne adhérence entre ces grains.

Notons que les valeurs de la résistance à la compression jusqu'à C4 avec 20% de la chaux, restent toujours supérieures à celle des briques témoins.

Une augmentation de la résistance l'hors l'ajout de chaux avec pourcentage de 5% améliore le comportement d'argile.

Une diminution de la résistance en fonction de l'augmentation des pourcentages de la chaux plus de 5% ça est dû à la densité de la chaux la plus petite.

❖ Essai ultrasonique :

on constate une diminution de la vitesse de propagation du son à partir de C1 en fonction d'augmentation des pourcentages de la chaux.

La vitesse de propagation du son dans les briques est un indice qui définit le taux de vide dans la matrice, ce dernier influe directement sur :

- la masse volumique ;
- la résistance à la flexion ;
- la résistance à la compression.

Le choix des briques dépend de la vitesse du son qui donne un comportement mécanique convenable.

III.4.1.3. Propriété thermique :**❖ La conductivité thermique λ :**

La conductivité thermique λ des matériaux est la propriété le plus couramment étudiée car Elle dépend uniquement de la structure du matériau et de ses composants.

Elle renseigne sur le pouvoir d'isolation thermique d'un matériau donné. En effet, la Conductivité thermique mesure la capacité d'un matériau à conduire de la chaleur. Elle varie avec la masse volumique du matériau.

La technique de mesure que nous avons utilisée pour déterminer la conductivité thermique est la méthode dite Source Plane TPS dont la démarche expérimentale est détaillée et décrite au début .Chaque résultat représente la moyenne de trois mesures effectuées sur chaque échantillon.

Les valeurs moyennes des conductivités thermiques λ , pour différents pourcentages obtenues avec la méthode du Source Plane TPS, sont reportés dans le tableau III.6 :

on remarque une réduction de la conductivité thermique en fonction de l'augmentation du dosage en ciment.

D'après les résultats de cette figure nous pouvons observer que la conductivité varie dans le sens inverse de l'augmentation du % de la chaux.

❖ Résistance thermique (R_{th}) :

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

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda}$$

indique que la résistance thermique à automatiquement augmenté car elle est inversement proportionnelle à la conductivité thermique.

❖ **La chaleur spécifique massique :**

Le tableau (III.8) regroupe la variation de la chaleur spécifique des briques en fonction du pourcentage de ciment dans la confection de nos briques. **C_p (MJ/m³.K)**

on remarque que la chaleur spécifique diminue en fonction du pourcentage de la chaux dans le mélange, Cela est logique du fait que théoriquement C_p varie dans le même sens que la conductivité thermique λ.

III.4.2. Stabilisation parciment blanc :

Après avoir fini la stabilisation avec la chaux on a composé autre mélange stabilisé avec le ciment blanc pour faire une comparaison entre ces deux liants (la chaux et ciment blanc)

On a proposé cinq compositions plus composition de référence :

Tableau III.9 : compositions utilisés

Composition	C0	C'1	C'2	C'3	C'4	C'5
Argile(%)	67	66	65	64	63	62
Sable(%)	30	30	30	30	30	30
Fibre(%)	3	3	3	3	3	3
Ciment blanc(%)	0	1	2	3	4	5

III.4.2.1. La masse volumique :

on constate une augmentation continue dans la valeur de la masse volumique des briques selon l'augmentation des pourcentages des quantités de ciment blanc ajoutées aux compositions.ca est dû à la densité du ciment blanc lorsque sèche, elle devient supérieure à celle de l'argile, et l'augmentation de la densité est due au fait que le ciment augmente dans la floculation.

La masse volumique atteint ca valeur maximale dans la composition C5 avec 5% de ciment blanc.

La composition C0 a une faible densité en raison du manque d'homogénéité des matériaux entre eux.

III.4.2.2. Caractéristiques mécaniques :

❖ Résistance à la flexion :

On remarque:

Une augmentation de la résistance à la flexion des briques selon l'augmentation des pourcentages de ciment blanc ca est due à l'augmentation de la densité.

❖ Résistance à la compression :

On constate une augmentation de la résistance à la compression des briques selon l'augmentation des pourcentages de ciment blanc ou ca valeur maximale est notés dans la composition C5 avec $R_c = 1.9\text{MPa}$ une preuve de la bonne adhérence entre ces grains.

Une augmentation de la résistance l'hors l'ajout du ciment blanc améliore le comportement mécanique.

❖ Essai ultrasonique :

on constate une augmentation de la vitesse de propagation du son en fonction d'augmentation des pourcentages du ciment blanc ça prouve que le matériau est dense.

L'augmentation de la vitesse du son confirmera les résultats mécaniques des briques.

III.4.2.3. Propriétés thermiques :

❖ La conductivité thermique λ :

La figure III.18 montre la variation de la conductivité thermique des briques en fonction des différents pourcentages de ciment blanc plus brique témoin.

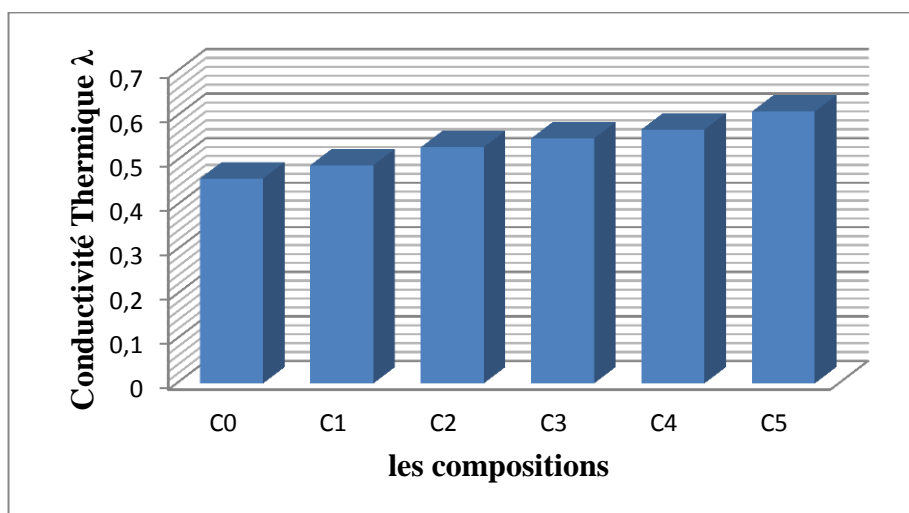


Figure III.18:La conductivité thermique en fonction de pourcentage de ciment blanc

❖ Résistance thermique (Rth) :

La figure III.19 montre la variation de la résistance thermique des briques en fonction des différents pourcentages de ciment blanc plus brique témoin.

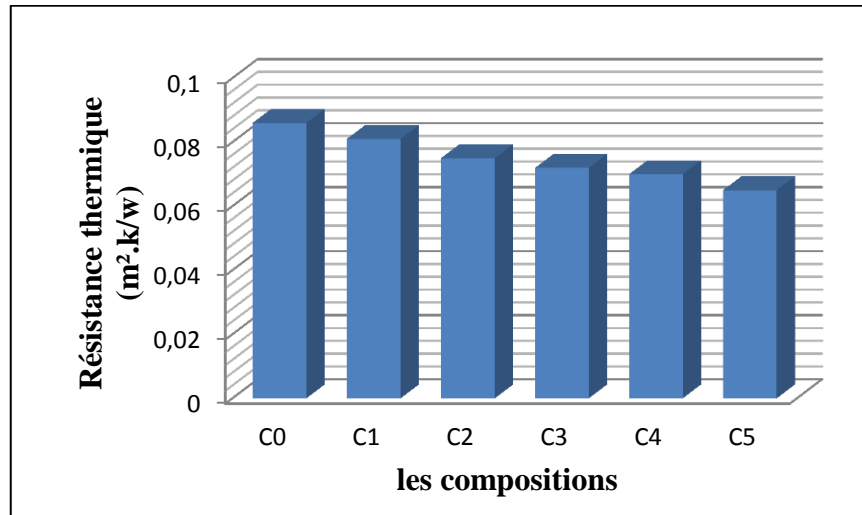


Figure III.19: La résistance thermique en fonction de pourcentage de ciment blanc

❖ La chaleur spécifique massique :

La figure III.20 montre la variation de La chaleur spécifique massique des briques en fonction des différents pourcentages de ciment blanc plus brique témoin.

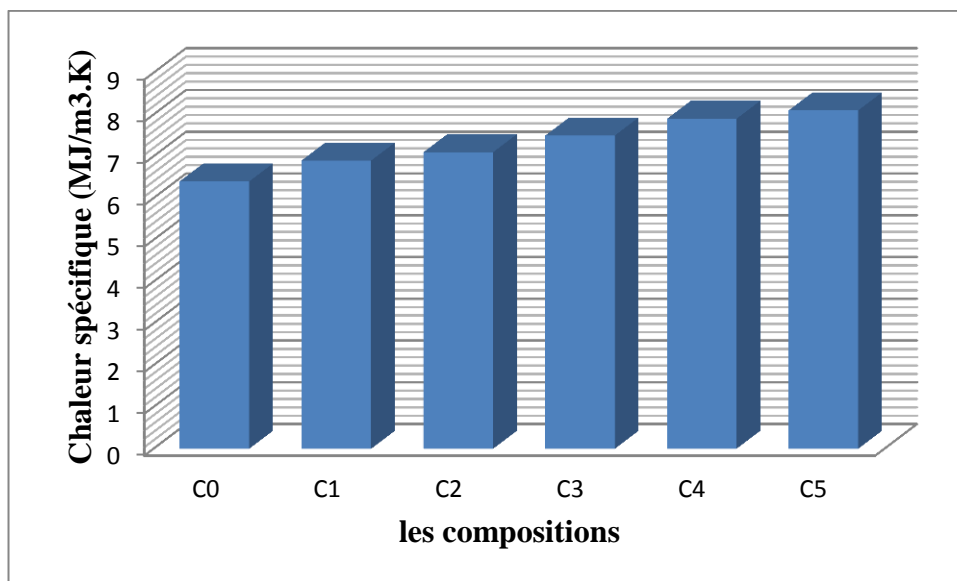


Figure III.20: La chaleur spécifique en fonction de pourcentage de ciment blanc

D'après les figure III (18, 19, 20) on constate que :

- Une augmentation continue de la conductivité thermique en fonction de pourcentage de ciment blanc
- La meilleure résistance thermique est celle de la composition C1.
- Une augmentation logique de la chaleur spécifique, elle varie dans le même sens que la conductivité λ .

Tableau III.17 : les meilleurs résultats des caractéristiques thermiques et mécaniques des briques

caractéristiques thermiques et mécaniques des briques	La chaux Echantillons C ₁ %	Ciment blanc Echantillons C ₅ %
Conductivité thermique : λ_{moy} (w/m.k)	0,32	0,49
Résistance thermique : R_{th} (m ² .k/w)	0,125	0,081
La chaleur spécifique massique : C_p (MJ/m ³ .K)	7,84	8,1
Traction par flexion : R_{fmoy} (N/mm ²)	2.1	1.8
Résistance à la compression : R_c (N/mm ²)	1.9	1.9
Vitesse de propagation du son (10 ³) m/s	3.4	2.7

III.5. Conclusion :

L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus après avoir réalisé les essais pour la détermination des propriétés mécanique et thermique des briques confectionnées nous a permis d'en tirer comme conclusion:

- La composition C₁ avec 5% de chaux est la composition optimale pour une bonne résistance à **la flexion** nous avons obtenu un gain résistance de R_f5% chaux =2.1 MPa.
- La composition C1 avec 5% de chaux représente la composition idéale pour une résistance élevée à **la compression**, nous avons obtenu un gain de résistance égale à 1.9MPa. En effet, l'ajout de la chaux dans la composition de la brique a amélioré ces propriétés mécaniques, dans point de vue thermique l'ajout de la chaux donne des faibles résultats dans C1 sur l'aspect thermique. Mais comme ils n'ont pas atteint la valeur maximale, ils restent acceptables.
- La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques est diminué en fonction de l'augmentation du pourcentage de chaux cela confirme les résultats de résistance.
- La composition C5 avec 5% de ciment blanc est la meilleure composition pour une résistance à la flexion égale 1.8MPa, et une résistance à la compression égale 1.9MPa.
- Une augmentation de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques en fonction de l'augmentation des pourcentages du ciment blanc, ce dernier confirme notre hypothèse que l'incorporation du ciment fait diminuer le % de vide ce qui augmente la conductivité thermique.
- Si nous comparons nos résultats de résistance par rapport aux résultats des références nous pouvons dire que nos briques sont acceptable de point vue thermique et mécanique.

Chapitre IV

Analyse et simulation

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons l'estimation des propriétés élastiques effectives dans la conception et l'analyse des matériaux composites. En tant que solution, l'EasyPBC le plugin est créé pour fonctionner avec ABAQUS CAE sans le besoin d'utiliser un logiciel tiers. Le concept mécanique du plugin impose des contraintes uniformes sur le RVE pour calculer les propriétés élastiques effectives. En attendant, maintenir la périodicité unifiée de RVE en appliquant automatiquement les équations de contrainte requises et la limite de déplacement conditions. Le plugin rend tout cela possible dans l'interface de l'utilisateur sans recourir à d'autres calculs, codages ou autres logiciels, ce qui contribue à améliorer l'efficacité en réduisant les risques d'erreur et en préservant l'effort et le temps de l'utilisateur. En outre, EasyPBC est capable de l'analyse des modèles entièrement personnalisés d'un utilisateur, alors que d'autres logiciels sont limités par des options de création de géométrie spécifiques [50].

IV.2. Volumes élémentaires représentatifs (V.E.R)

Le terme V.E.R a été utilisé pour la première fois par Hill et peut être défini comme le plus petit élément de volume de matériau pour lequel la représentation constitutive macroscopique est un modèle suffisamment précis pour représenter la réponse constitutive moyenne. Par conséquent, le V.E.R est choisi / modèle de telle sorte que la duplication fournit une précision suffisante de représenter plus grande échelle du matériau (voir Figure. 1). Pour ce qui est de la méthode d'homogénéisation V.E.R [50].

Les propriétés effectives du milieu homogène équivalent cherché peuvent être obtenues en résolvant un problème aux limites sur un volume élémentaire dV , à condition que celui-ci soit suffisamment grand pour être représentatif de la microstructure du matériau hétérogène. Dans le cas où les constituants présentent une structure périodique, le volume dV peut se réduire à un volume élémentaire [51].

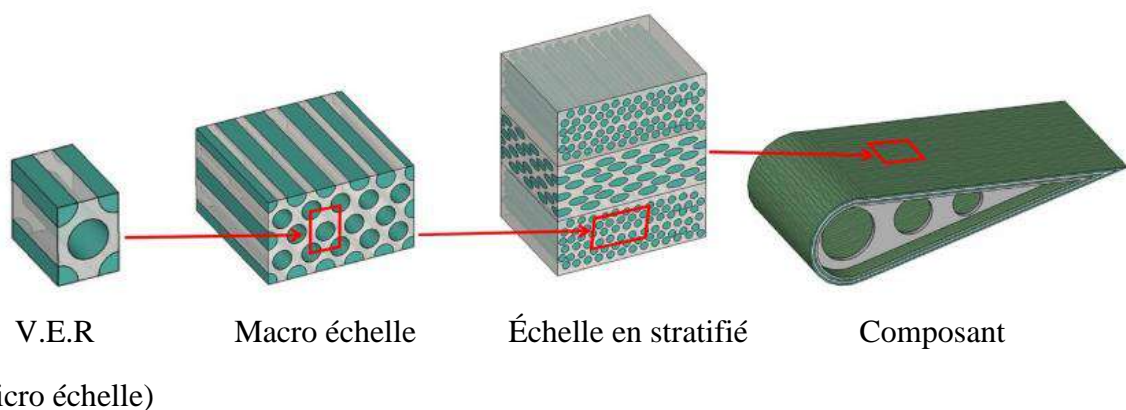


Figure IV.1 : Représentation d'un composant composite à deux phases accumulation de V.E.R

[50].

IV.3. Homogénéisation V.E.R périodique

Le concept de l'homogénéisation V.E.R consiste à imposer numériquement des déformations uniformes afin de calculer les propriétés élastiques effectives d'un modèle composite, comme illustré à la Figure IV.2. Généralement, ces déformations sont appliquées dans plusieurs ensembles indépendants, chaque ensemble calculant des propriétés de matériau élastique spécifiques. Le V.E.R est supposé faire partie d'un matériau périodique. Il est donc important de simuler la périodicité du V.E.R avec le matériau avant et après la mise à plat dans le logiciel EF [50].

Des études d'homogénéisation antérieures ont permis d'obtenir une périodicité en imposant des conditions aux limites garantissant que les surfaces des limites planaires de V.E.R restent planes après déformation [50].

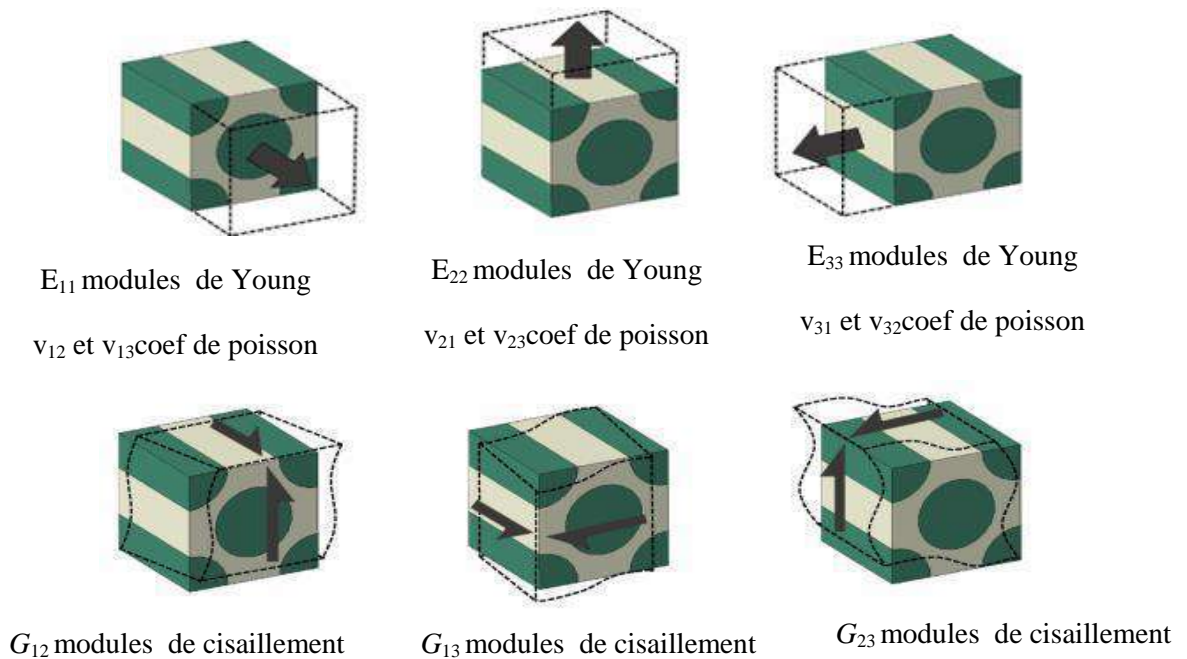


Figure IV.2: Représentation schématique de la limite de déplacement conditions nécessaires pour estimer les propriétés élastiques effectives [50].

IV.4. Les logiciels de simulations par éléments finis

Dans le domaine de la recherche industrielle privée ou publique (construction automobile, aéronautique, spatial, Naval, civil ...), des techniques de simulation et d'analyse numérique de phénomènes physiques se sont beaucoup développées ces dernières années et ont contribué grandement à améliorer la productivité des industriels et la vie de tous les consommateurs. La quatrième révolution industrielle en cours de démarrage et dont la clé de voute est l'usine digitale sera entièrement basée sur des outils numériques de représentation de la

réalité virtuelle combinée avec une robotisation de la production. Dans cette quête de logiciels de conception et de calculs assistés par ordinateur de plus en plus performants on peut mentionner le logiciel ABAQUS. ABAQUS c'est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en électromécanique des milieux continus. Il est très répandu et connu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires[52].

IV.5. Logiciel ABAQUS

ABAQUS est un progiciel de calcul éléments finis développé initialement par HKS (Hibbit, Karlsson et Sorensen) et depuis 2005 par ABAQUS Inc (Dassault Systèmes). Il se compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE (completeAbaqusenvironment) :

- ABAQUS/Standard est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.
- Le solveur ABAQUS/Explicit emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques transitoires ou quasi statiques non linéaires.
- ABAQUS/CAE constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs.

Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications. Les produits ABAQUS, ABAQUS/CAE notamment, sont écrits intégralement avec les langages Fortran pour les parties calcul C++ pour les parties visualisation graphique et Python pour les scripts et les paramétrisations. La gestion de l'interface graphique est assurée par FOX Toolkit. ABAQUS est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie, il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation. ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériaux. En 2005, ABAQUS Inc a été acquise par Dassault Systèmes et est devenue SIMULIA [52].

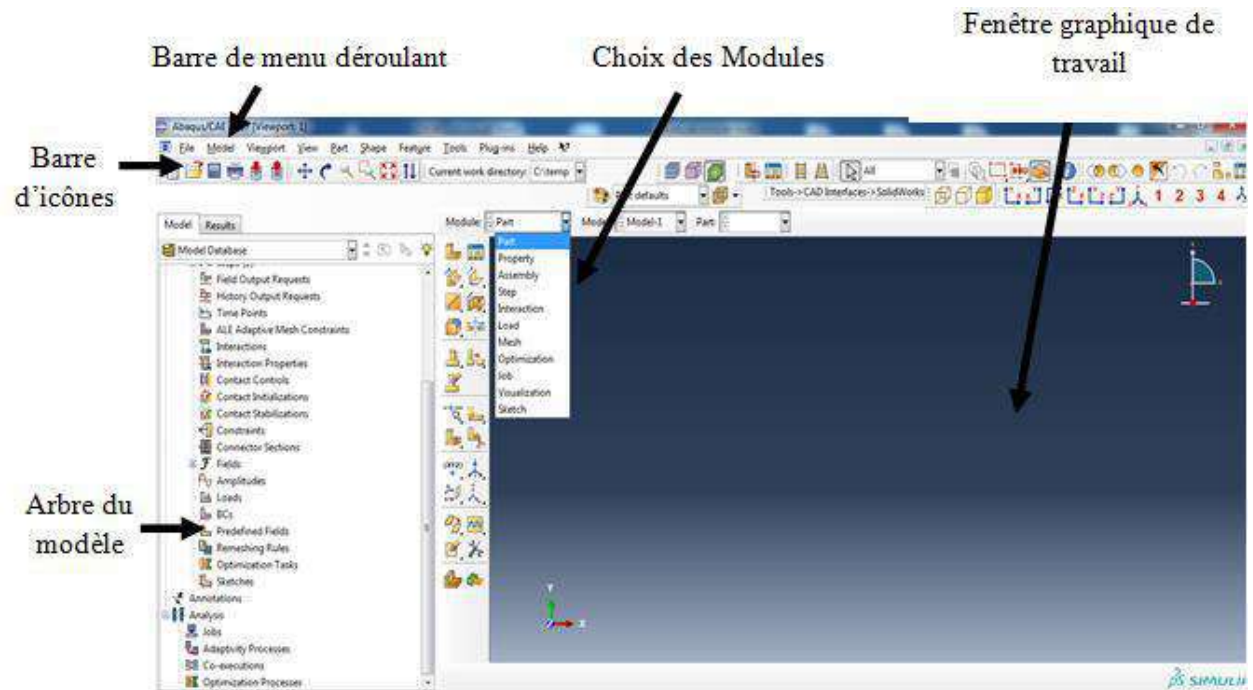


Figure IV.3 : Organisation de l'interface Abaqus CAE (Complete Abaqus Environnement).

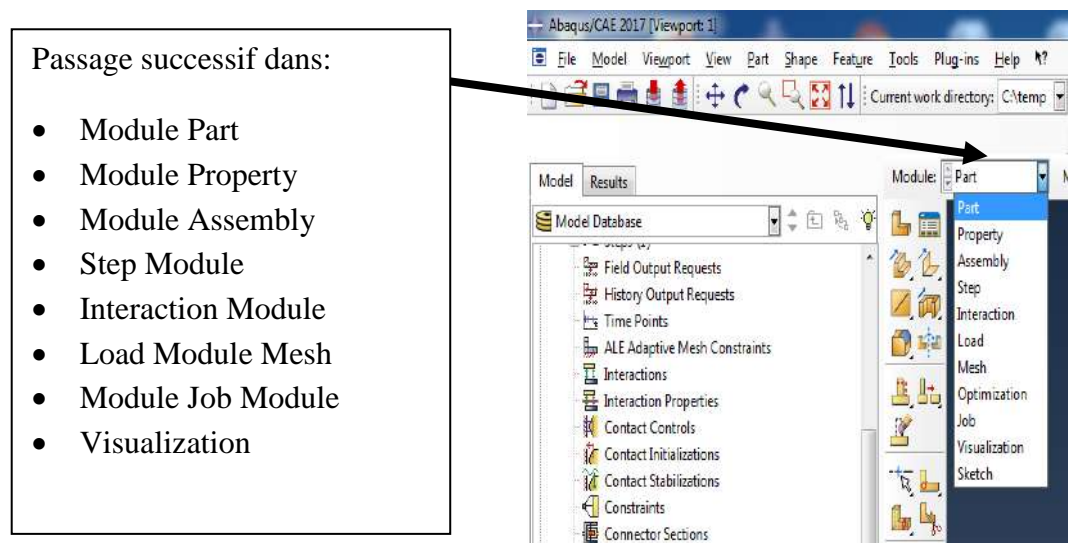


Figure IV.4 : Réalisation d'une simulation numérique sous Abaqus CAE.

IV.6. Analyse des contraintes linéaires

Calculez les contraintes et les déformations de modèle V.E.R causé par les chargements internes et externes afin de valider rapidement et de manière efficace la qualité, les performances au cours de la conception [53].

L'analyse des contraintes linéaires entièrement intégrée aux outils de C.A.O avec ABAQUS permet aux concepteurs et aux ingénieurs de valider rapidement et de manière efficace la qualité, les performances et la sécurité du produit au cours de la création de leur conception.

IV.6.1. Vue d'ensemble de l'analyse des contraintes linéaires

L'analyse des contraintes linéaires permet de calculer les contraintes et les déformations de la géométrie selon trois hypothèses de base[53] :

1. Le modèle V.E.R soumis à un chargement se déforme sous l'effet de petites rotations et déplacements ;
2. Le chargement du produit est statique (ignore l'inertie) et constant au fil du temps ;
3. Le matériau possède une relation contrainte-déformation constante (loi de Hooke);

ABAQUS Simulation utilise les méthodes de l'analyse par éléments finis (A.E.F) pour répartir les composants de conception en éléments solides, coques ou poutres et utilise l'analyse des contraintes linéaires afin de déterminer la réponse du modèle V.E.R en raison de l'effet des :

- Forces;
- Pressions;
- Accélération ;
- Températures;
- Contacts entre composants.

Les chargements peuvent être importés à partir des études de Simulation thermique, d'écoulement et de mouvement afin d'effectuer une analyse multiphysique[53].

IV.7. Easy PBC

EasyPBC est un plugin ABAQUS CAE développé pour estimer les propriétés élastiques effectives et homogénéisées des utilisateurs volumes élémentaires représentatifs périodique (V.E.R), tous situés dans ABAQUS sans qu'il soit nécessaire d'utiliser un logiciel tiers.

Le plug-in applique automatiquement les concepts du procédé d'homogénéisation de V.E.R périodique dans l'interface utilisateur du logiciel en classant, en créant et en reliant les ensembles nécessaires à la réalisation de surfaces limites périodiques déformables, qui peuvent déformer et ne restent plus plane [50].

La mise en œuvre de ces PBC est réalisable à l'aide d'un logiciel commercial à éléments finis, tel que ABAQUS. Easy PBC plugin exécute deux phases principales pour estimer les propriétés élastiques homogénéisées en mettant en œuvre les concepts de la méthode d'homogénéisation VER périodique unifiée, il s'agit [50] :

➤ **Phases de pré-traitement :**

Permettant à l'utilisateur de sélectionner les dimensions géométriques de VER, les propriétés élastiques homogénéisées requises et de définir la limite de précision du mappage de maillage si nécessaire identifie les surfaces limites, crée des ensembles nodaux, crée des équations de

contrainte nœud à nœud, et applique les conditions limites de déplacement requises. Dans le même temps, des contrôles intégrés, étape par étape, sont exécutés pour s'assurer que le calcul d'homogénéisation est exécuté sans erreur, sinon, il en avertit l'utilisateur.

➤ **Post-traitement:**

Alors que la phase de post-traitement traite les calculs de contrainte-déformation et d'autres opérations liées à l'estimation des propriétés élastiques, tout dans une interface utilisateur graphique fonctionnant sous ABAQUS CAE.

IV.8. Etude mécanique

IV.8.1. Conception assistée par ordinateur du modèle V.E.R.

La forme du RVE est décidée par la microstructure, qui peut être un reflet fidèle de la réalité ou une idéalisation. Bien que l'optimisation retenue soit laissée à l'appréciation de l'utilisateur, il convient d'envisager une microstructure idéalisée aussi représentative que possible de la réalité.

Les paramètres géométriques du V.E.R sont définis dans $l=L=H=2$ mm et fibre de diamètre $\varnothing=1$ mm comme indiqué à la Figure.5.

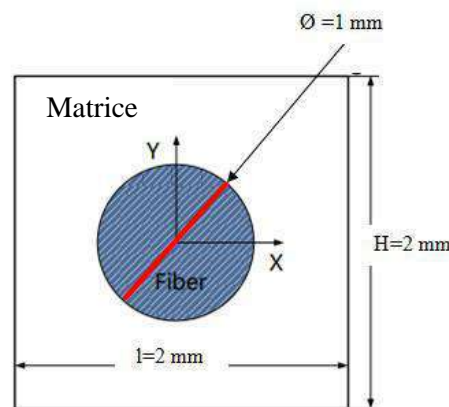


Figure.5. Les paramètres géométriques du V.E.R.

IV.8.2. Définition des propriétés

Pour effectuer une analyse des contraintes, vous devez connaître les données de matériaux des composants. La base de données de matériaux ABAQUS CAE standard est pré-remplie avec les matériaux pouvant être utilisés par ABAQUS Simulation. Elle est facilement personnalisable afin d'inclure vos besoins particuliers en équipements.

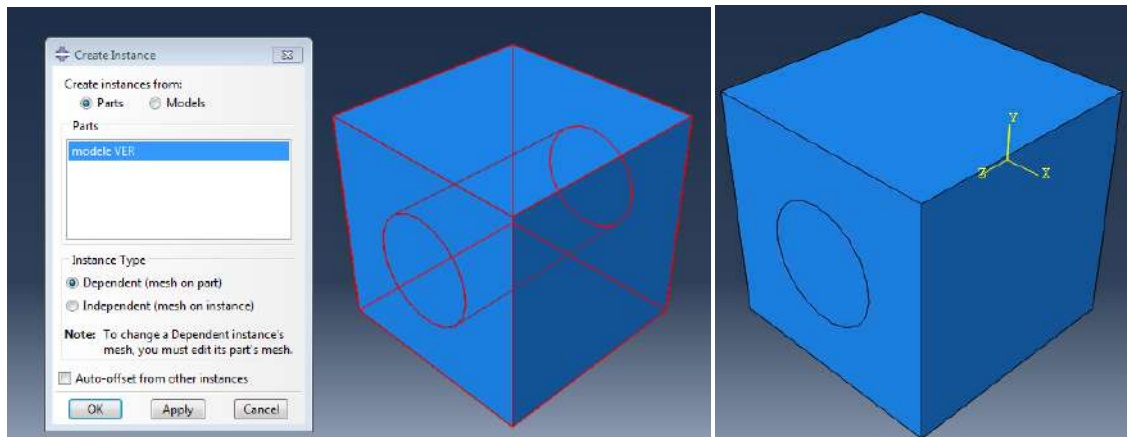
Tableau IV.1 : les propriétés mécaniques et thermique de composite.

Composants	Propriétés mécaniques		les propriétés thermiques
	Module d'Young (MPa)	Coefficient de poisson	Conductivité thermique (W/m.k)
Fibre palmier dattier	5000	0.26	0.084
Matrice(70% argile+30%sable)	2857.5	0.3	0.39

Pour les propriétés mécaniques de fibre prises à partir [54], et la conductivité à partir [55].

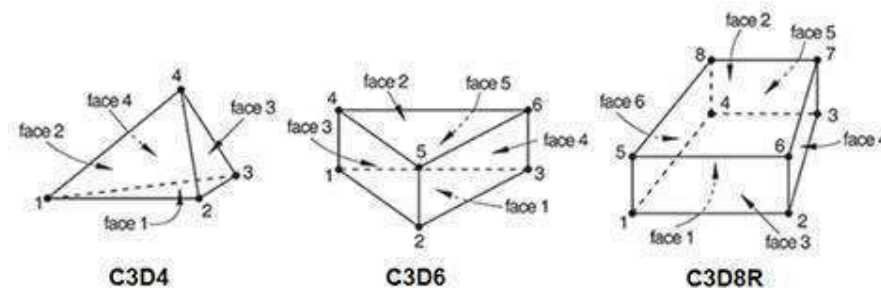
IV.8.3. Création d'assemblage

Les assemblages sont obtenus par la juxtaposition de matrice et fibre. La mise en position de V.E.R est définie par un ensemble des contraintes d'assemblage associant, deux entités respectives par une relation géométrique (coïncidence, tangence, coaxiale...).

**Figure IV.6.**l'assemblage matrice et fibre.

IV.8.4. Creationune technique de maillage

Le but de cette étude étant d'obtenir une bonne approximation des déplacements et contraintes en élasticité linéaire. Nous choisissons dans un premier temps des éléments tétraédrique quadratique. Le maillage utilisé dans notre travail est réalisé à l'aide d'un élément volumique quadratique à 8 nœuds avec intégration réduite C3D8R figure IV.7.

**Figure IV.7 :** type d'élément de maillage utilisé [51].

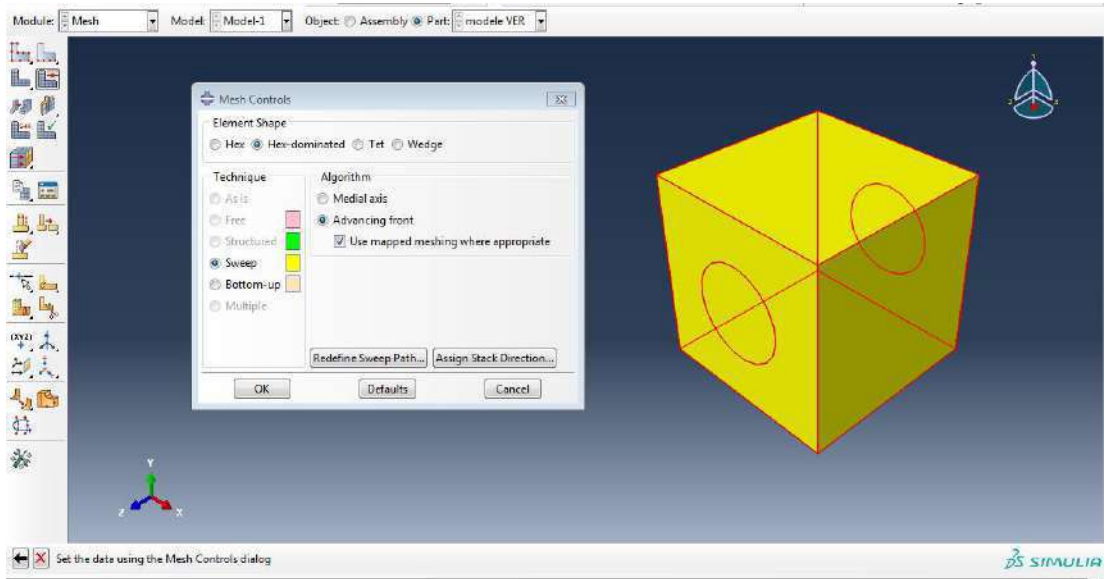


Figure IV.8 : Choisir type d'élément et technique de balayage.

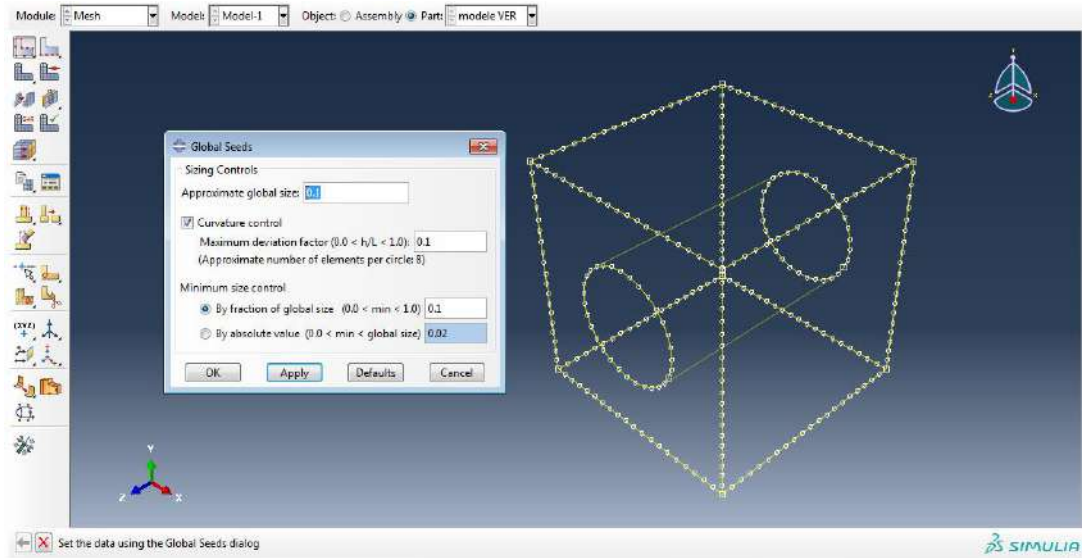


Figure IV.9 : Choisir imposer un maillage régulier.

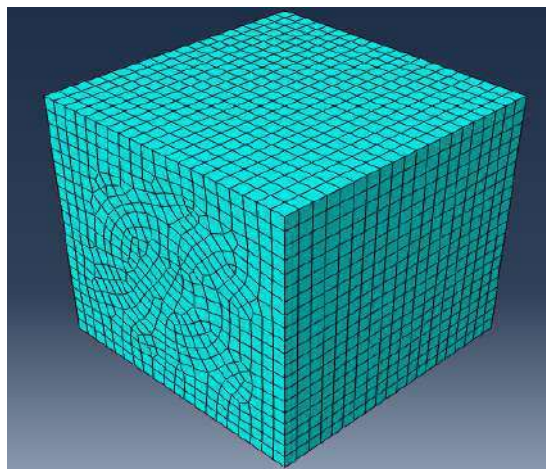


Figure IV.10 : Résultat de maillage EF du modèle V.E.R (9780 element).

IV.8.5 : Les résultats

IV.8.5.1 : Exécution complète avec Easy PBC

L'exécution d'EasyPBC (Figure IV.11) qui permet d'obtenir l'estimation des modules de Young et du coefficient de Poisson et différent de celui des modules de cisaillement.

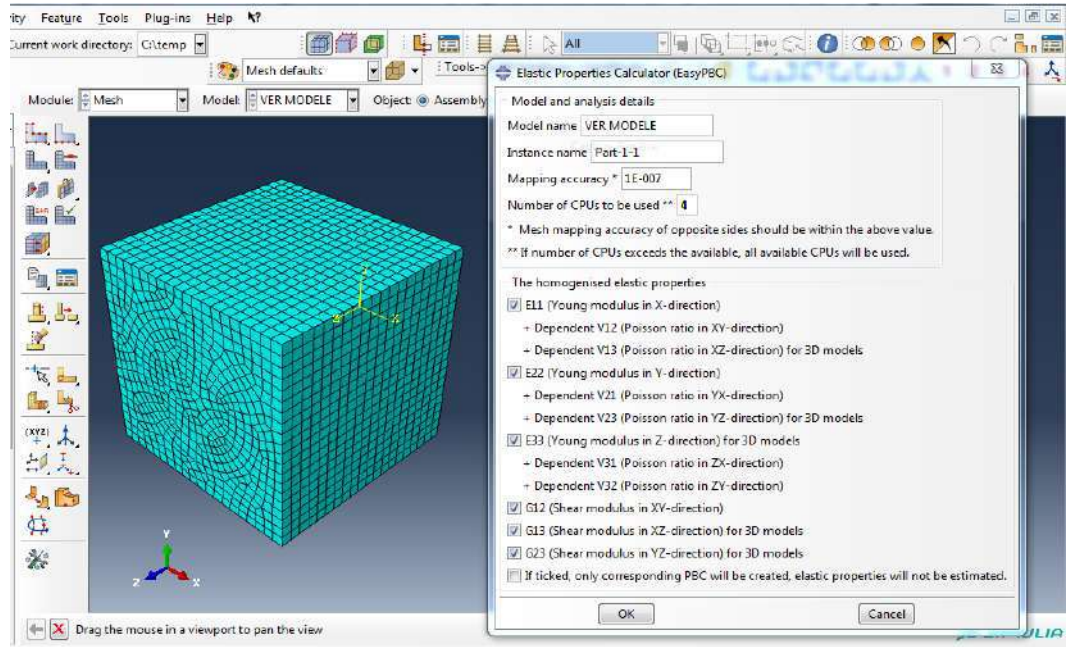


Figure IV.11 :Fenêtre principale d'EasyPBC.

IV.8.5.2 :Les modules de Young et les coefficients de Poisson

La valeur de la force de réaction à un point de référence est la somme des forces nodales aux limites de principe pertinentes générées aux nœuds aux limites effectuées. Cette valeur est divisée par l'aire de la surface affectée pour fournir la valeur de contrainte correspondant à la déformation prescrite (déplacement prescrit divisé par la longueur de la vitesse VER le long de l'axe effectué principal).La valeur de contrainte est ensuite utilisée pour estimer le module de Young en le divisant par la déformation connue, comme illustré dansEq1 [50].

$$E = \frac{\text{contrainte}}{\text{déformation axiale}}, E_{11} = \frac{\sum \text{forces nodales des surface avant dans 1 direction}}{\frac{\text{surface avant } (H \cdot L)}{\Delta L / L}} \text{Eq (1)}$$

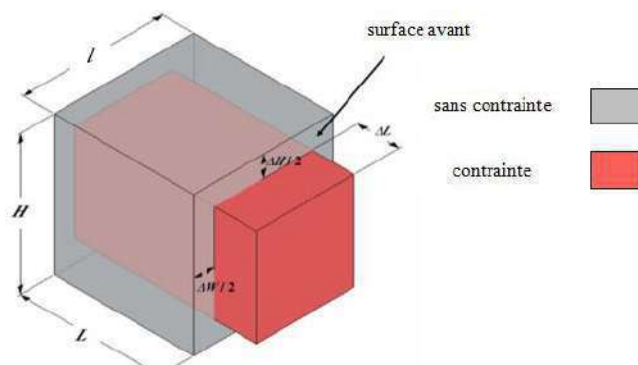
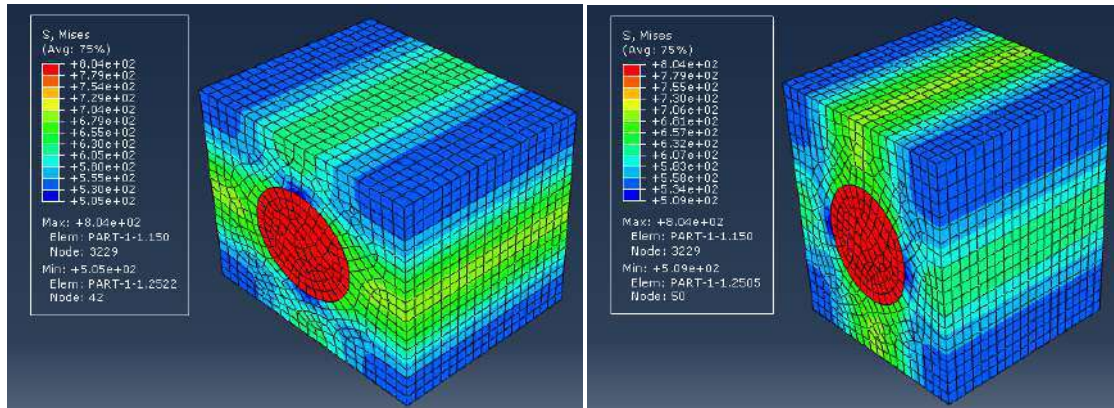


Figure IV.12 : module de Young E_{11} et le coefficient de Poisson ν_{12} et ν_{13} [50].

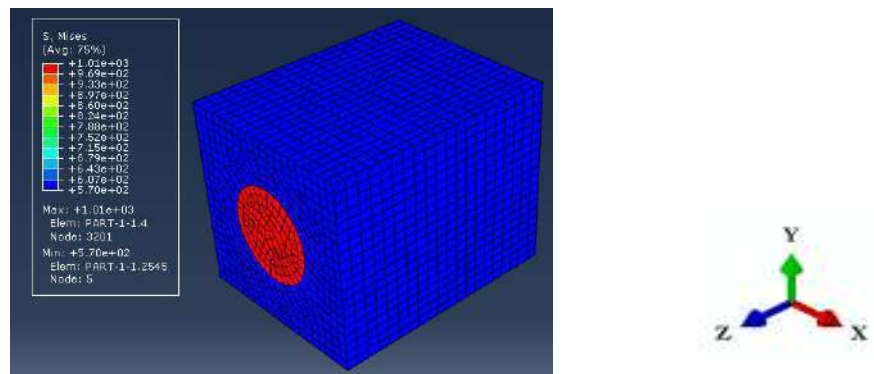
La sortie des données générées dans le même travail pour le calcul du module de Young est également utilisée pour estimer des coefficients de Poisson (pour deux directions transversales) en utilisant les données de déformation transversales. Ceci est réalisé en calculant la déformation transversale et en la divisant par la déformation axiale appliquée, comme illustré dans Eq (2) [50].

$$v = \frac{-\text{deformation transversal}}{\text{deformation axial}}, v_{12} = \frac{\Delta H/H}{\Delta L/L}, v_{13} = \frac{\Delta l/L}{\Delta L/L} \text{Eq (2)}$$



(a) $(\epsilon_x^0 = 1; \epsilon_y^0, \epsilon_z^0, \epsilon_{xy}^0, \epsilon_{xz}^0, \epsilon_{yz}^0 = 0)$

(b) $(\epsilon_y^0 = 1; \epsilon_x^0, \epsilon_z^0, \epsilon_{xy}^0, \epsilon_{xz}^0, \epsilon_{yz}^0 = 0)$



(c) $(\epsilon_z^0 = 1; \epsilon_x^0, \epsilon_y^0, \epsilon_{xy}^0, \epsilon_{xz}^0, \epsilon_{yz}^0 = 0)$

Figure IV.13 : Le champ de contrainte de Von Mises correspondant aux charges traction.

IV.8.5.3. Les modules de cisaillement

Les modules de cisaillement sont estimés en divisant la valeur de la contrainte de cisaillement par la contrainte de cisaillement des deux directions correspondantes, c'est-à-dire pour G12. La valeur de la contrainte de cisaillement est calculée en extrayant la somme des forces nodales limites principales de la direction pertinente des forces de réaction du point de référence affectées de l'une ou l'autre des surfaces déformées, divisée par la surface affectée, comme indiqué dans l'Eq (3) et figure IV.14 [50].

$$G = \frac{\text{contrainte de cisaillement}}{\text{tenseur de la contrainte de cisaillement}} G_{12} = \frac{\sum \text{forces nodales de surface dessus dans 1 direction}}{\text{surface dessus } (L \cdot l)} \frac{\Delta l/H + \Delta 2/L}{\Delta l/H + \Delta 2/L} \text{Eq(3)}$$

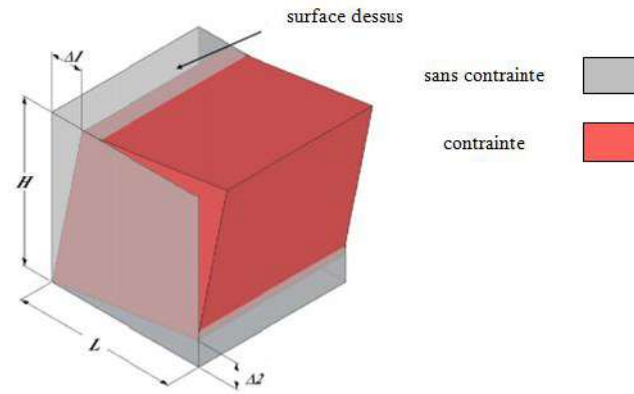
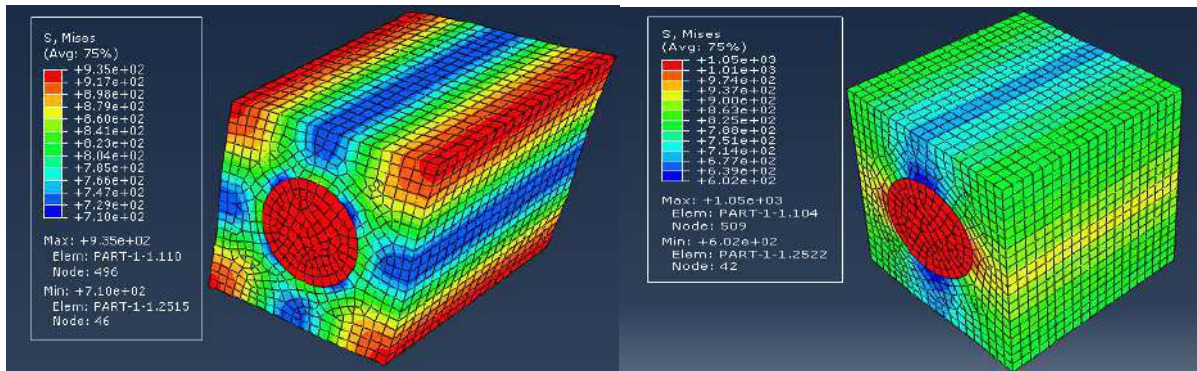
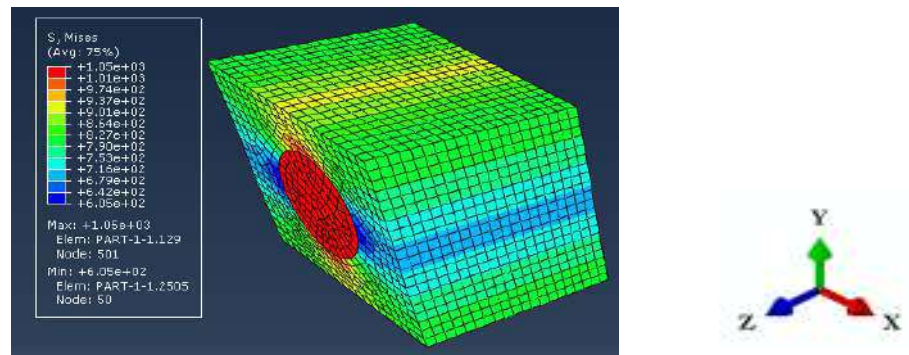


Figure IV.14 : module de cisaillement G_{12} [50].



(d) $(\epsilon_{xy}^0 = 1; \epsilon_x^0, \epsilon_y^0, \epsilon_z^0, \epsilon_{xz}^0, \epsilon_{yz}^0 = 0)$ (e) $(\epsilon_{xz}^0 = 1; \epsilon_x^0, \epsilon_y^0, \epsilon_z^0, \epsilon_{xy}^0, \epsilon_{yz}^0 = 0)$



(f) $(\epsilon_{yz}^0 = 1; \epsilon_x^0, \epsilon_y^0, \epsilon_z^0, \epsilon_{xy}^0, \epsilon_{xz}^0 = 0)$

Figure IV.15 : Le champ de contrainte de Von Mises correspondant aux charges de cisaillement.

Tableau IV.2 : Résultats des conditions aux limites et Von mises sous Easy PBC.

Les propriétés élastiques	Homogénéisation V.E.R sur Easy PBC				contraintes de Von Mises (MPa)	
	Limites élastiques		Coefficients de poisson		Min	Max
E11	les modules de Young (MPa)	3182.40081787	V12	0.296776923585	5.05 e+02	8.04e+02
E22		3182.37304688	V21	0.296774341493	5.09 e+02	8.04e+02
E33		3276.15936279	V23	0.283202347782	5.70 e+02	1.01e+03

G12	les modules de cisaillement (MPa)	1215.27641296	V13	0.283203232539	7.10 e+02	9.35e+02
G13		1229.40368652	V31	0.291546869089	6.02 e+02	1.05e+03
G23		1229.38362122	V32	0.291548487262	6.05 e+02	1.05e+03

A part les résultats des contraintes et Von Mises Easy PBC permet aussi d'afficher les résultats suivants et d'autre :

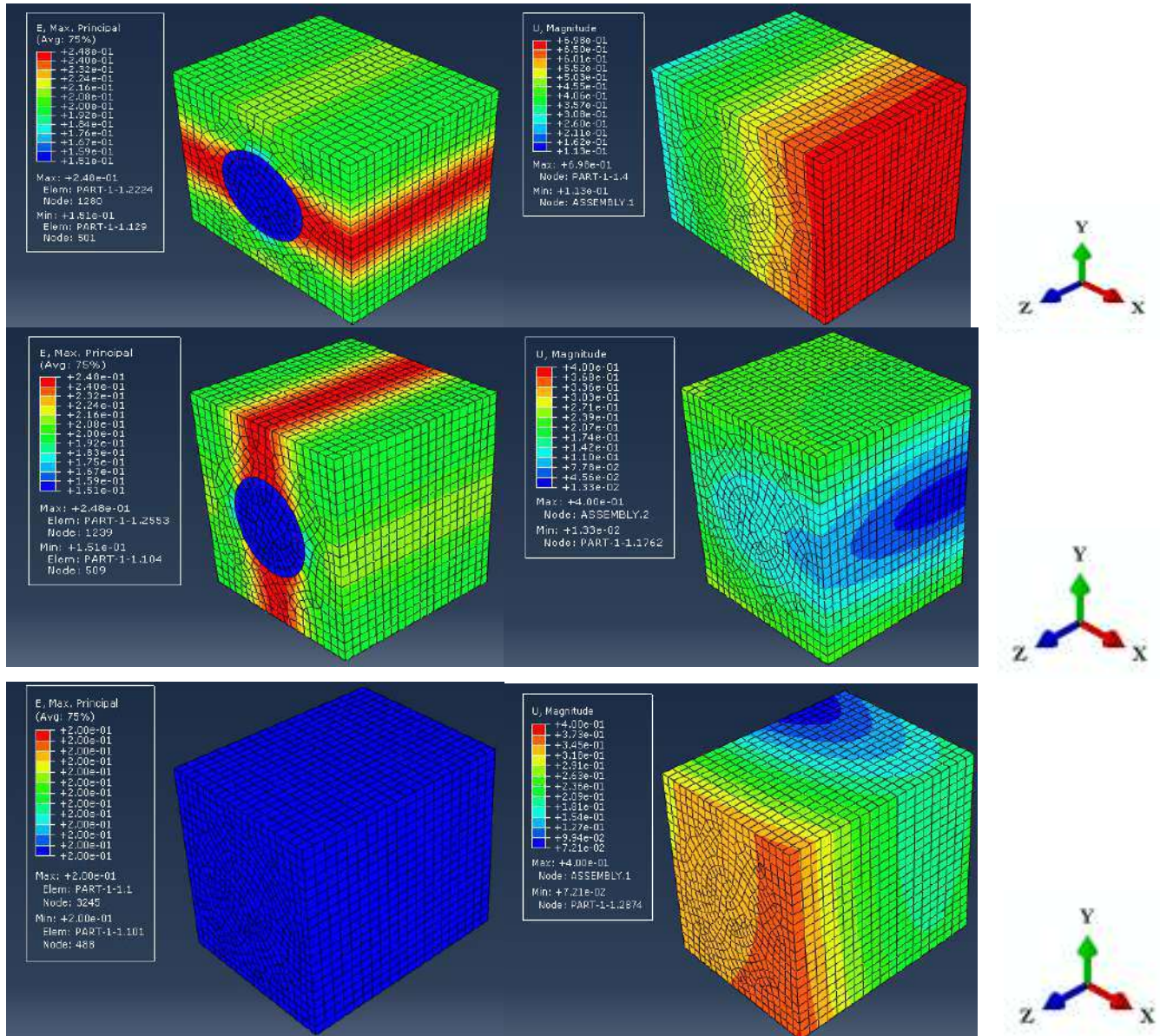


Figure IV.16 :Le champ des déformations et des déplacements correspondant aux charges des tractions

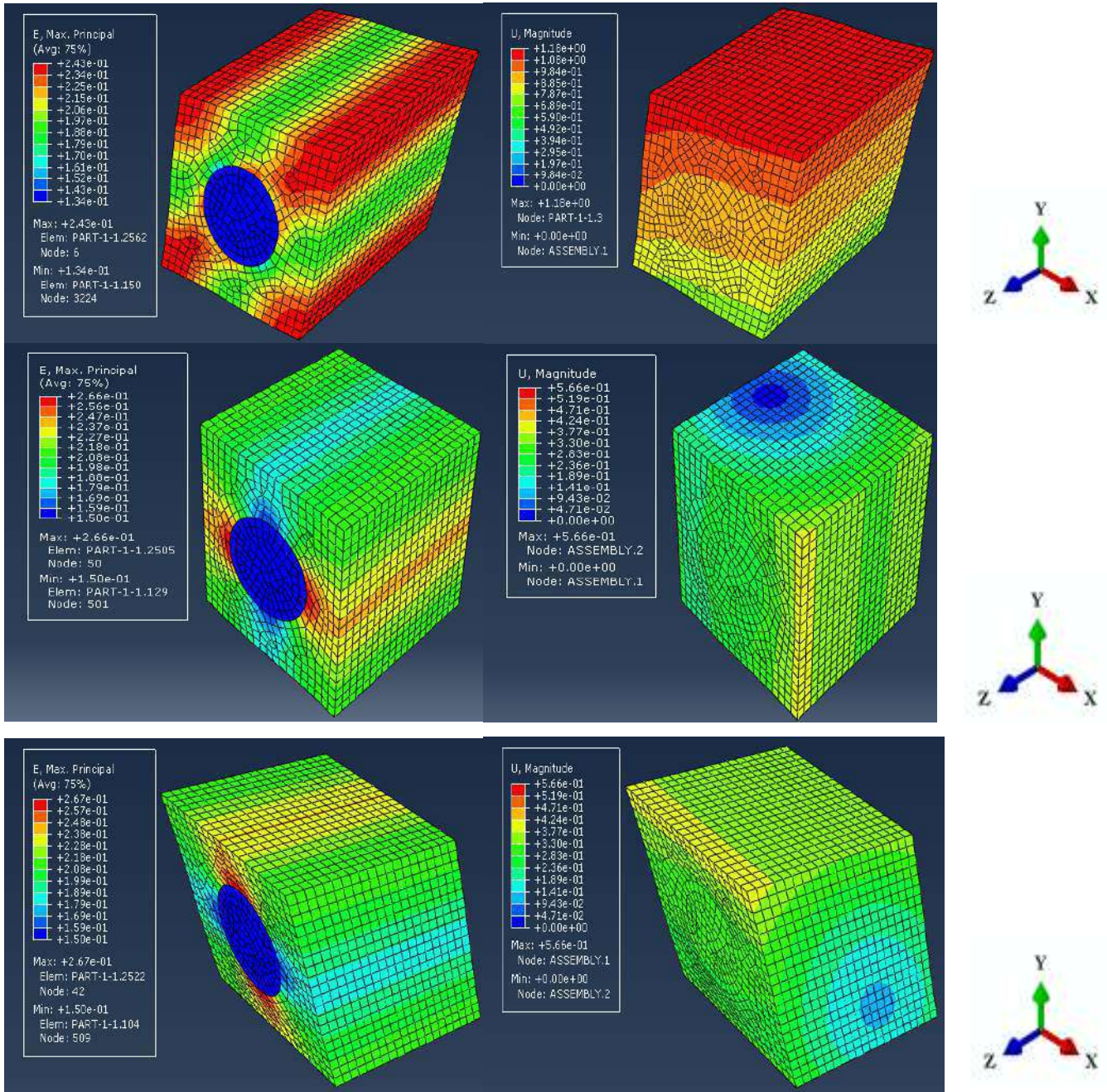


Figure IV.17 : Le champ des déformations et des déplacements correspondant aux charges des cisaillements.

Avec :

E : les composants de déformation aux points d'intégration.

S: composants de contrainte aux points d'intégration.

U: déplacement spatial aux nœuds.

Tableau IV.3 : Résultats des déformations et des déplacements sous Easy PBC.

Désignation	Type et direction des charges		Min	Max
Déformations	Traction par flexion	Suivant X	1.51e-01	2.48e-01
		Suivant Y	1.51e-01	2.48e-01
		Suivant Z	2.00e-01	2.00e-01
	Cisaillement	Suivant XY	1.34 e-01	2.43e-01
		Suivant XZ	1.50 e-01	2.66e-01
		SuivantYZ	1.50 e-01	2.67 e-01
Déplacements U (mm)	Traction par flexion	Suivant X	1.13 e-01	6.98 e-01
		Suivant Y	1.33 e-01	4.00 e-01
		Suivant Z	7.21 e-01	4.00 e-01
	Cisaillement	Suivant XY	0.00 e+00	1.18 e+00
		Suivant XZ	0.00 e+00	5.66 e-01
		SuivantYZ	0.00 e+00	5.66 e-01

IV.8.6. Les interprétations :

Le comportement microscopique mécanique selon (x, y, z) a permis de donner le module de young et module de cisaillement, à travers eux on peut suggérer où nous utilisons réellement nos briques.

❖ Critère de résistance

Les valeurs des contraintes de Von Mises donnent des valeurs maximales conditions nécessaires dans (tableau 2) qui sont loin des limites élastiques des matériaux composites utilisées et les limites élastiques microscopie en trois directions. Nous pouvons conclure que le critère de résistance est largement satisfait.

❖ Critère de rigidité

Les résultats trouvés, nous indiquent que les déplacements maximums conditions nécessaires dans (tableau 3) est n'accèdent pas des valeurs résultants, ce qui représente un très faible déplacement, donc on peut dire que le critère de rigidité est bien vérifié.

IV.9. Etude thermique

IV.9.1. Évolution de la température

A partir du modèle numérique 3D développé sous Abaqus, nous avons obtenu la distribution de la température sur VER. Nous avons également relevé l'évolution temporelle de la température sur différents points du VER que nous avons représenté sur la figure IV.17.

Le modèle microscopique permet d'analyser le comportement thermique de la zone perturbée par la présence des aspérités en fonction des paramètres de sollicitation. Pour ce faire, une analyse de la température à travers des chemins a été réalisée aux différents niveaux de contact.

Les paramètres géométriques du V.E.R sont définis dans $H=2\text{cm}$, $L=4\text{cm}$ et fibre de diamètre $\varnothing=1$ appliqué au long de VER.

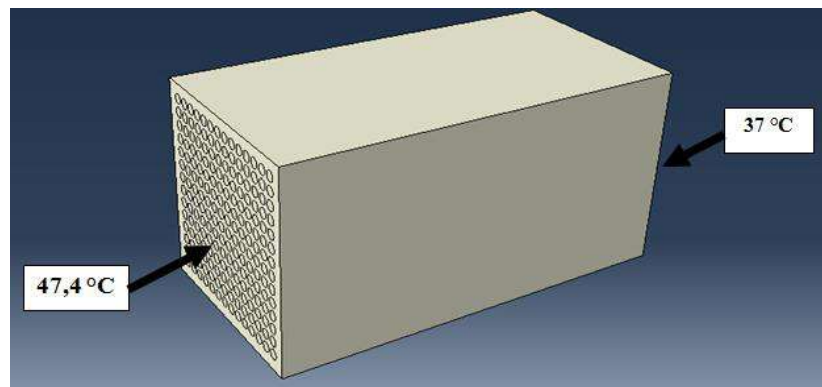


Figure IV.18. Condition aux limites thermiques.

On note que :

- La température Max= 47.4° d'après les résultats des données climatiques de la ville de Ouargla en 2018 [38], elle est appliquée à l'extérieur.
- La température Min= 27° est la température de confort [44], est appliquée à l'intérieur.

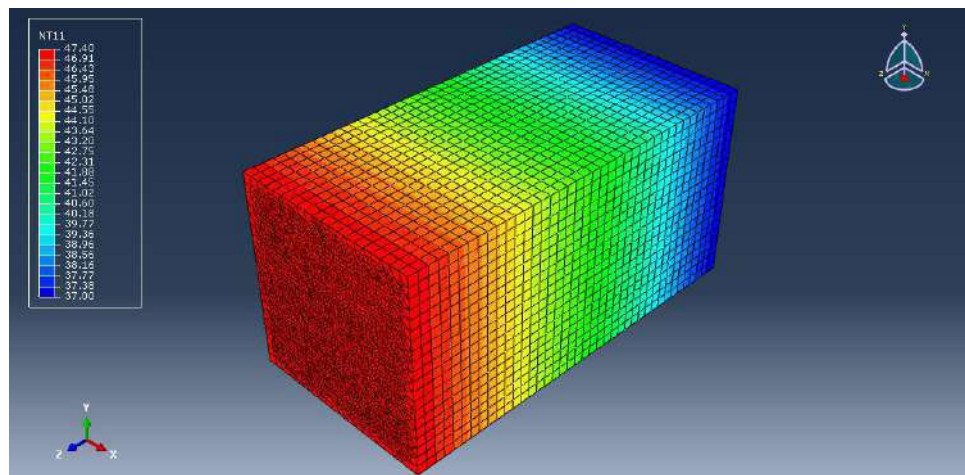


Figure IV.19. La distribution de la température sur le VER.

La figure IV.20 montre la variation de la température en fonction des différentes distances sur le long de VER

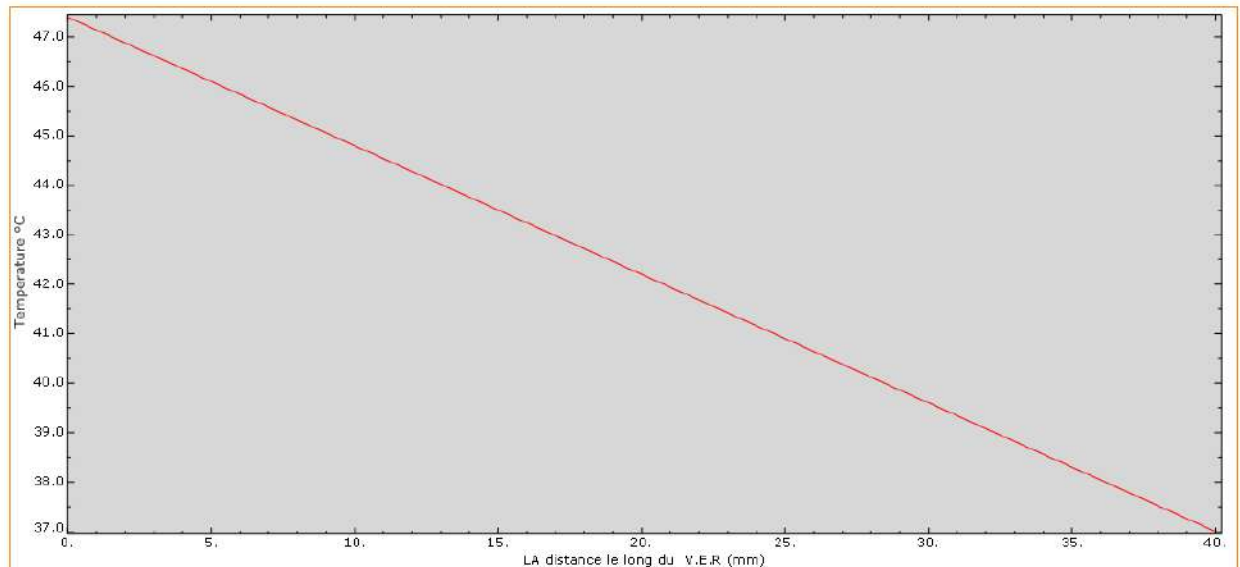


Figure IV.20. Répartition de la température sur le long de VER.

IV.9.2. Les interprétations

- Nous constatons que la température diminue progressivement de la plus grande à la plus petite, cela est dû au transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur par conduction, ce qui entraîne une température basse et une stabilité de la température en fonction de la température d'intérieure.
- Les matériaux prouvent leur efficacité par la diminution de la température.

IV.10. Conclusion

Nous avons proposé dans ce chapitre un modèle numérique par éléments finis 3D développé sous Abaqus. Ce modèle va nous permettre de réaliser des simulations d'une part thermomécaniques, d'après les résultats qu'on a obtenus on peut conclure :

D'un point mécanique :

- Les résultats d'après les valeurs de Von Mises sont loin aux limites élastiques des matériaux composites utilisées. Donc, le critère de résistance est largement satisfait.
- Les résultats des déplacements trouvés représentent un très faible déplacement, donc on peut dire que le critère de rigidité est bien vérifié.

D'un point thermique :

- Nous constatons que la température diminue progressivement de la plus grande à la plus petite, cela est dû au transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur par conduction, ce qui entraîne une température basse et une stabilité de la température en fonction de la température d'intérieure.
- Une température élevée nous oblige à choisir des matériaux appropriés aux climats.

Conclusion générale et perspectives

Ce projet était l'occasion idéale d'exploiter nos connaissances acquises et plus particulièrement ces deux dernières années de Master

Dans ce travail de recherche, le but primordial était l'amélioration des performances mécaniques et thermiques des briques confectionnées traditionnellement à base des matériaux locaux de la région d'Ouargla :

- Argile de beldet Amer (Touggourt) ;
- Sable des dunes de sidi-khouiled (Ouargla) ;
- Fibre de palmier dattier ;
- La chaux ;
- Le ciment blanc.

Pour atteindre le but cité auparavant, l'étude s'est étalée sur quatre chapitre dont :

Le premier chapitre comporte deux volets :

Le premier volet était réservé à une recherche bibliographique sur les différents types des briques en terre, les méthodes et les techniques de leur fabrication. A travers cette recherche, nous pouvons conclure que :

- La terre est un matériau de construction ancien, présent dans toutes les architectures vernaculaire du monde ;
- Un habitat en terre est un habitat écologique, esthétique, et surtout assure un confort à ses occupants ;
- Nous pouvons aussi dire que la brique connu plusieurs évolutions d'où les divers types des briques qu'existaient hier jusqu'à aujourd'hui. Et par ces changements qu'a connu la brique de terre, ces techniques de production ont ainsi évoluées du traditionnel au mécanisé voir automatisé.

Le deuxième volet était consacré aux caractéristiques climatiques de la ville d'Ouargla, et après une analyse de ces données climatiques, nous pouvons conclure que c'est une zone aride avec un climat dure, un hiver sec et froid, ou la température moyenne minimale est de 13,1 C° en mois de janvier, et un été sec et très chaud qui connait des périodes de chaleur caniculaire avec une température moyenne maximale de 47,4 C°.

Le deuxième chapitre elle concerne l'identification et la caractérisation des matériaux utilisés qui sont (l'argile, le sable des dunes, la chaux, ciment blanc, l'eau et les fibres).

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

- Module de finesse d'ordre $M_f = 1.23$;
- Granulométrie serré ;

- une masse volumique apparente égale à 1520 kg/m^3 .

L'argile utilisée est une argile extraite de gisement de BeldetÂmer daïra de Touggourt Wilaya de OUARGLA qui se caractérise par :

- Une granulométrie de grande proportion de limon (65%) ;
- La densité sèche = 1.91 g/cm^3 ;
- Indice de plasticité d'ordre 43.96% ;
- Nature d'argile très plastique.

La chaux utilisée est une chaux éteint produite par l'unité de chaux de Ghardaïa (Algérie) de densité volumique 600-900g/l

Le ciment utilisé dans notre travail est celle de la cimenterie de Lafarge Algérie (BISKRA), les éléments dans le ciment est CaCO_3 en pourcentage environ de 82 %, les teneurs en sulfates et en chlorures sont très faible.

L'eau de gâchage est de robinet du laboratoire de génie civil de l'université d'Ouargla.

Les fibres utilisées sont des fibres de surface de palmier dattier d'Ouargla (type Dokar) qui se caractérise par une masse volumique apparente faible, un taux d'absorption d'eau assez élevé qui dépasse les 200 %.

Le troisième chapitre concerne à la partie expérimentale de ce travail, on a étudié l'effet de l'ajout de la chaux comme traitement, et le ciment blanc comme stabilisant sur les caractéristiques mécaniques et sur les propriétés thermiques des briques de terre.

Le Traitement avec la chaux contient huit compositions :

- 67% Argile et 30% Sable et 3% Fibre ;
- 67% Argile, 30% Sable, 3% Fibre et 05% chaux ;
- 67% Argile et 30% Sable et 3% Fibre et 10% chaux ;
- 67% Argile et 30% Sable et 3% Fibre et 15% chaux ;
- 67% Argile et 30% Sable et 3% Fibre et 20% chaux ;
- 67% Argile et 30% Sable et 3% Fibre et 25% chaux ;
- 67% Argile et 30% Sable et 3% Fibre et 50% chaux ;
- 67% Argile et 30% Sable et 3% Fibre et 75% chaux.

La stabilisation avec le ciment blanc contient six compositions :

- 67% Argile, 30% Sable et 3% Fibre ;
- 66% Argile, 30% Sable, 3% Fibre et 1% ciment blanc ;
- 65% Argile, 30% Sable, 3% Fibre et 2% ciment blanc ;
- 64% Argile, 30% Sable, 3% Fibre et 3% ciment blanc ;
- 63% Argile, 30% Sable, 3% Fibre et 4% ciment blanc ;

- 62% Argile, 30% Sable, 3% Fibre, 5% ciment blanc.

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

- ❖ L'augmentation du pourcentage en masse des ajouts améliore notablement la résistance à la flexion, et la résistance à la compression des briques surtout celle traitées par la chaux.
- ❖ L'ajout de la chaux dans les briques diminue la masse volumique et la conductivité thermique qui augmente la résistance thermique. La composition C2 a donné le meilleur résultat thermo-mécanique.
- ❖ L'ajout de ciment blanc dans les briques influe positivement sur leurs résistances à la compression et à la flexion et ça est dû à l'augmentation de la densité, par contre elle diminue la résistance thermique. La composition C5 a donné le meilleur résultat thermo-mécanique.
- ❖ Les résultats de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques confirment nos résultats de résistance mécanique.

Le quatrième chapitre et le dernier a englobé la partie d'analyse et simulation par ABAQUS Simulation et complément EasyPBC. Afin de limiter les besoins en prototypes coûteux, d'éliminer le remaniement et les retards, de gagner du temps et de réduire les coûts de développement, d'après les résultats qu'on a obtenus on peut conclure :

- ❖ Une température élevée nous oblige à choisir des matériaux appropriés aux climats.
- ❖ Les résultats d'après les valeurs de Von Mises sont loin aux limites élastiques des matériaux composites utilisées. Donc, le critère de résistance est largement satisfait.
- ❖ Les résultats des déplacements trouvés représentent un très faible déplacement, donc on peut dire que le critère de rigidité est bien vérifié.
- ❖ Nous constatons que la température diminue progressivement de la plus grande à la plus petite, cela est dû au transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur par conduction

Perspectives :

D'après les résultats obtenus par cette recherche, et en vue d'une future utilisation rationnelle et efficaces de ces matériaux, on va poser quelques perspectives pour compléter cette recherche :

- ❖ Etudier l'humidité et l'absorption.
- ❖ Faire l'essai de résistance de feu.
- ❖ Faire une étude de modélisation à travers plusieurs pourcentages.

En fin, nous souhaitons que ce modeste travail nous suive dans le futur proche de notre vie professionnelle.

Bibliographique

- [1] MEUKAM P., « Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments »
- [2] stabilisé des structures en pisé : durabilité, caractéristique mécanique ; 13 novembre 2008, BUI QUOC-Bao
- [3] Brique d'adobe [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse : <https://www.dreamstime.com/royalty-free-stock-photography-adobe-bricks-sustainable-building-materials-1-image14801957>
- [4] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse : <https://www.thoughtco.com/what-is-adobe-sustainable-energy-efficient-177943>
- [5] DJOUHRI M., « Confection d'une brique à base de sable de dune » mémoire magister, Université de Ouargla, 2007.
- [6] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse : <http://blogs.paysmellois.org/terrecrue/>
- [7] Richard-Philippe wafer « l'adobe, une solution durable pour la construction d'habitations écologiques dans une zone à forte activité sismique comme le Chili » Octobre 2010 université de Sherbrooke.
- [8] COINTERAUX, F. « les cahiers de l'école d'architecture Rura le 1790.
- [9] PIGNAL, B. Terre crue-technique de construction et de restauration. Eyrolles, 2005.
- [10] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse : <http://hommelibre.blog.tdg.ch/archive/2010/02/03/la-terre-crue-materiaux-de-construction-bioclimatique.html>
- [11] Ministère de la culture et de la communication. Manuel de la sensibilisation à la restauration de la maçonnerie. <http://www.culture.gouv.fr/culture/min/index-min.htm>, 2006.
- [12] Gui Baud, L'architecture en pisé dans le canton de Boën (Loire). In situ6, Septembre 2005, p19.
- [13] CHAIB Hachem, « contribution à l'étude des propriétés thermomécaniques des briques en terre confectionnée par des fibres végétales locales (cas de ville de Ouargla) », Mémoire doctorat 2017.
- [14] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse : <http://www.cite-sciences.fr/au-programme/expos-temporaires/ma-terre-premiere/decouvrir/construire/torchis.php>
- [15] REHOUDJA, Leila Sabrina., « Etude de l'effet de l'ajout de gypse sur les caractéristiques thermomécaniques des briques en terre crue » mémoire master, 2017.
- [16] www.wikipedea.org

- [17] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse :<https://docplayer.fr/56368415-Etude-de-l-influence-de-l-introduction-des-fibres-graines-de-coton-et-residus-dans-la-stabilisation-des-sols.html>
- [18] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse :<https://docplayer.fr/56368415-Etude-de-l-influence-de-l-introduction-des-fibres-graines-de-coton-et-residus-dans-la-stabilisation-des-sols.html>
- [19] LIVERT,S., « Bâtir un mur en briques de terre compressée », Février2011.
- [20] CRATerre-EAG. Guillaud &Houben 1995.Rigassi
- [21] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse :
- [22] « fabrication et commercialisation de brique en terre cuite »projet business.2013-2014
- [23] KOMAR.A « Matériaux et élément de construction, Edition MIR1978.
- [24] ROYAUME de maroc « Utilisation des différents matériaux de construction » Guide des travaux pratiques.
- [25] ABC consulting Aly.Sow / Sénégal production de brique d'argile.
- [26] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse :<http://www.firedbrickmachine.com/wp-content/uploads/2013/12/box-feeder.jpg>
- [27] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse :<http://www.firedbrickmachine.com/wp-content/uploads/2013/12/box-feeder.jpg>
- [28] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse :<http://www.firedbrickmachine.com/wp-content/uploads/2013/12/Cutter.jpg>
- [29] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse :<http://www.firedbrickmachine.com/wp-content/uploads/2013/12/Dryer.jpg>
- [30] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse :<http://www.firedbrickmachine.com/wp-content/uploads/2013/12/Kiln.jpg>
- [31] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse :<https://www.bouyer-leroux.com/notre-savoir-faire>
- [32] VENUAT, M ; « Produits silico-calcaire » technique de l'ingénieur ; 1978.
- [33] OLIVER, E. « technologie des matériaux de construction » Edition MIR Moscow ; 1978.
- [34] LEMOUGNA NINLA,P., « contribution à la diminution des casses dans la production des briques de terre cuite à la PROMOBAT », mémoire DESS Licencié en chimie l'école Nationale supérieure polytechnique ; université de Yaoundé ; 2002-2003.
- [35] ARABI N., "Etude des Brique Silico-calcaire à Base de Laitier Granule", Mémoire de Magister Université De Annaba ; 1988

- [36] KHELAFI H., "Contribution à l'étude expérimentale de la brique silico-calcaire", séminaire Université BISKRA ; 2000.
- [37] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse :<https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/8745/1/masteriales-achbi-chafou.pdf>
- [38] L'office National De Météorologie. Les données climatiques de Ouargla de l'année de 2004 jusqu'à l'année 2014 ».
- [39] AZZOUZ. Houcine, « étude des bétons à base de sable de dune » Mémoire de magister, Université Mohammed kheiderBiskra,2009.
- [40] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse :https://www.vitamedz.com/ouargla-la-rose-des-sables-une/Photos_157_219234_30_1.html
- [41] HAKKOUM Soumia . « Etude des caractéristiques thermiques et mécaniques des briques en terre cuite traditionnelles dans les régions de la wilaya de ouargla » mémoire de magister 2015.
- [42] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse :
<http://www.geniecivilfrance.com/2017/03/compte-rendu-equivalent-de-sable-tp-mdc.html>
- [43] [en ligne][consulté le 11.5.2019] Disponible à l'adresse :https://bu.univ-ouargla.dz/MEKHERMECHE_Abdessalam.pdf?idthese=777https://www.researchgate.net/figure/Dfinition-des-limites-dAtterberg-et-lindice-de-plasticite-5441-La-limite-de_fig15_309872829
- [44] MEKHERMECHE A. « Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksours sahariennes » mémoire de magister Université de Ouargla 2012
- [45] BOUDCHICHA M^{ed} kéda, « etude de la cristallisation et des propriété mécaniques et diélectriques de céramiques préparés à partir de kaolin dolomite » université el-hadjlakhder-BATNA.p 3-4-5-8-9-10-12-13-14. 2014.
- [46] KRIKER A., «Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud sec », thèse de Doctorat d'Etat, ENP ,2005.
- [47] TAALLAH B., « Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres» thèse de doctorat, université de Biskra, 2014.
- [48] https://www.idrrim.com/ressources/documents/6/3254,Note-d-Info-29-IDRRIM-Norme-Chaux_F.pdf
- [49] BELKHIR Zakaria, DEFAF Nouredine « Micro béton adjuvant au ciment blanc avec polystyrène » mémoire de master université de M'SILA, 2017.
- [50]Sadik L.Omairey , Peter D.Dunning, Srinivas Sriramula. "Development of an ABAQUS plugin tool for periodic RVE homogenization", 8 Mai 2018.

- [51] Vincent Manet « Méthode des éléments finis » Vulgarisation des aspects mathématiques et illustration de la méthode, Lyon, France.2016, pp.425.
- [52] MECHRI Oussama.« Modélisation par éléments finis de l'usinage des pièces en alliages d'aluminium »mémoire de masteruniversité LAVAL Québec, Canada, 2016.
- [53] TLILI Fouad, BENZAID Khaled « Conception et étude d'un système mécanique sous Solidworks »mémoire master université KasdiMerbah-Ouargla, 2015.
- [54] GOUDJIL, S. « Modélisation numérique de fissuration en flexion de béton renforcé par des fibres de palmier dattier » mémoire de master université KasdiMerbah-Ouargla, 2017.
- [55] KHALDOUNE, Hadjer. « Modélisation numérique de comportement thermophysique de composite de mortier à base des fibres de palmier dattier » mémoire de master 2017.

Annexe



Annexe A1 : La masse volumique absolue



Annexe A2 : La masse volumique apparente **Annexe A3 : Equivalent de sable**



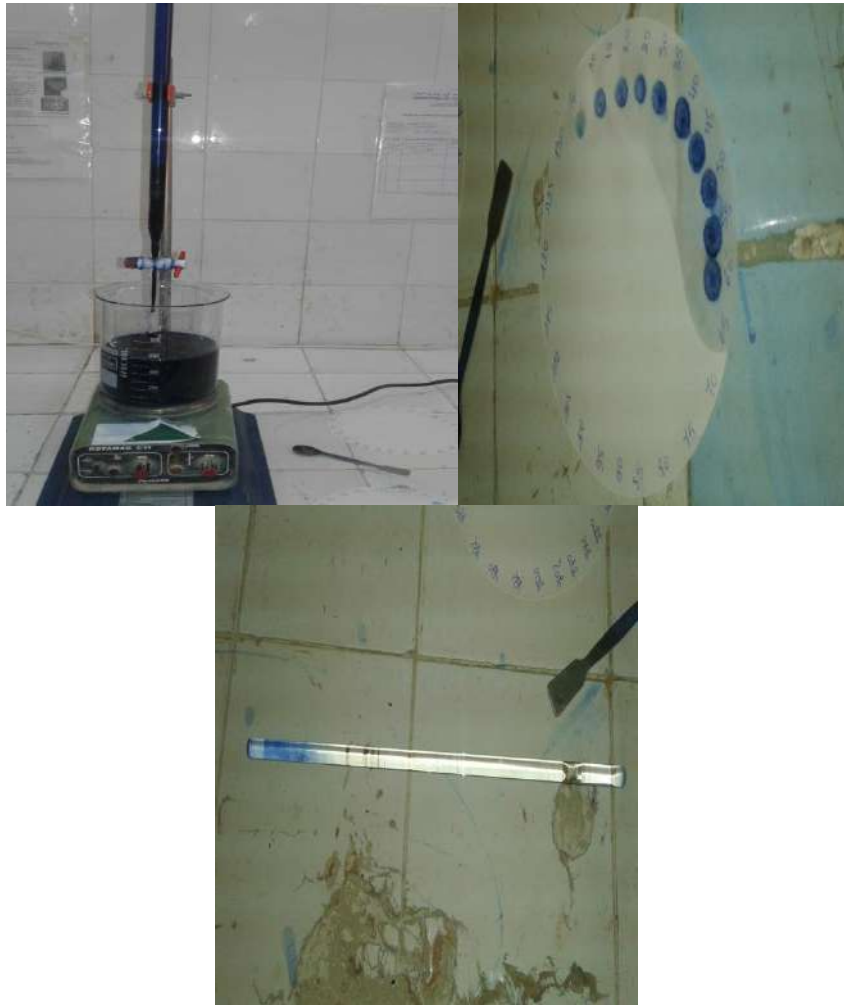
Annexe A4 : Analyse chimique



Annexe A5 : La machine de DRX



Annexe A6 : la densité sèche



Annexe A7 : Bleu de méthylène



Annexe A8 : CAZAGRANDE



Annexe A9 : Palmier dattier
tronc

Annexe A10 : l'emplacement du lif

Annexe A11 : Section du
tronc



Photo A12 : l'argile

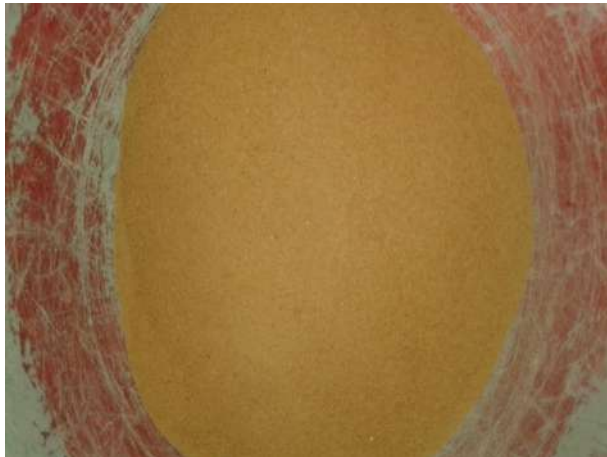


Photo A13 : sable de dune



Photo A14 : Fibre de palmier coupé



Photo A15 : imbiber l'argile



Photo A16 : Solution (eau+ chaux)



Annexe A17 : Mélange des ingrédients



Annexe A18 : Met le gras dans le moule



Photo A19 : rempli le moule



Photo A20 : compactage des éprouvettes



Photo A21 : Finition des éprouvettes



Photo A22 : séchage à l'air



Photo A23

Photo A 24

Photos (N°23, N°24) : Essai de flexion

Démarche de la machine :

- 1- Faire fonctionner la machine
- 2- Cliquer sur démarrage de l'essai
- 3- Cliquer sur F1 puis OK



Photo A 25

Photo A 26

Photos (N°25, N°26) : Essai de compression



Photo A27 : Appareil ultrasonique



Photo A 27 : CT mètre