

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEUOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de L'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed
Khider- Biskra
Faculté des Sciences et de la
technologie
Département d'architecture
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المعمارية
المرجع:

Thèse présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en science : Architecture

**OPTIMISATION DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES
ENVELOPPES DE CONSTRUCTIONS EN TERRE, ETUDE
HYGROTHERMIQUE DES HABITATIONS AURASIENNES**

Présenté par :
Tahar BERREHAIL

SOUTENU LE : 16 septembre 2021
Devant le jury compose de :

BENABBAS. Moussadek	Professeur	Président	Université Biskra
ZEMMOURI. Noureddine	Professeur	Rapporteur	Université Biskra
ALKAMA. Djamel	professeur	Examineur	Université. Guelma
DIB. Belkacem	professeur	Examineur	Université Batna1
HAMOUDA. Abida	Maitre de conférences A	Examineur	Université Batna1
SRITI. Leila	Maitre de conférences A	Examineur	Université Biskra

Année Universitaire: 2020- 2021

REMERCIEMENTS

Bien qu'il s'agisse d'une des premières pages de ce manuscrit de thèse, c'est aussi la dernière page que j'ai rédigé. Et c'est là que je me suis rendue compte que cette aventure ardue est terminée. J'ai compris qu'il n'y a pas mieux que la recherche scientifique. En fin, j'ai simplement souhaité remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, à la concrétisation de ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, professeur Nouredine ZEMMOURI, pour avoir conduit l'encadrement des travaux jusqu'à leurs terme et aussi pour tous ses conseils, sa disponibilité, sa patience et son intérêt porté au sujet étudié.

Je remercie Pr. AGOUDJIL. Boudjemaa, de l'université Batna1, pour son aide précieuse et pour m'avoir accueilli au sein de son labo « LPEA ».

Comme je tiens tout particulièrement à remercier Pr. BELARBI. Rafik, de l'université La Rochelle(France), pour ces conseils et pour m'avoir accueilli au sein de son labo « Lasie », Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens également à remercier les membres de jury d'avoir accepté d'être examinateurs de ce travail, en espérant je serais tiré profit de leur remarques, conseils et orientations pour la continuité de ma recherche.

J'adresse mes remerciements à tout le personnel du laboratoire LACOMOFA de l'université Biskra qui a mis à ma disposition le logiciel TRNsys V.17 et tout le matériel nécessaire, comme je tiens à remercier spécialement le docteur : AFREN Roumaïssa pour son assistance et l'aide précieuse qu'elle a apportée afin de finaliser la simulation.

Mes remerciements s'adressent également à tout le personnel du laboratoire de la cimenterie Ain Touta et aussi aux membres du laboratoire de LNHC Batna, pour avoir mis à ma disposition le matériel nécessaire.

Enfin, et surtout, je tiens à remercier ma famille et mes amis, pour m'avoir soutenu tout au long de mon travail.

Et à tous ceux qui m'ont aidé à élaborer ce travail, pour leurs soutiens et leurs encouragements.

OPTIMISATION DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES ENVELOPPES DE CONSTRUCTIONS EN TERRE, ETUDE HYGROTHERMIQUE DES HABITATIONS AURASIENNES

Tahar BERREHAIL

RÉSUMÉ

Le secteur de bâtiment représente une source, inquiétante, d'émission de gaz CO₂, en raison de sa consommation et sa production de matériaux. De plus, l'épuisement des ressources naturelles tend à devenir un problème critique. Par ailleurs, l'usage des ressources durables et recyclables, est une des réponses pertinentes. À cet effet, l'utilisation de matériaux bio-sourcés à des fins de construction durable est une solution méritant d'être étudiée. La terre est une matière première prometteuse, générant très peu d'énergie grise. L'usage de la terre, en tant que matériau de construction, améliore sensiblement la qualité environnementale.

Notre recherche a pour objet de revaloriser l'usage de la terre en tant que matériau de construction, en raison de l'abstention de son utilisation massive, et mesurer ces performances énergétiques dans le but de développer des biocomposites produits localement ayant pour vocation d'être utilisés en tant que matériaux isolants intérieurs. L'intérêt majeur de cette étude est de démontrer que le matériau terre peut être utilisé au même titre que d'autres matériaux.

Dans cette étude, des échantillons ont été préparés en utilisant différents constituants, Terre crue et fibre de palmier dattier et en raison de la sensibilité de la terre crue à l'eau, nous avons ajouté une faible quantité ciment (5%) pour une série d'échantillon. Les échantillons sont repartis suivant leur compacité (degré de compactage) et le taux de fibre de palmier dattier contenu.

En premier lieu, nous avons analysé les matières premières afin d'obtenir les propriétés thermiques, hydriques et les caractéristiques minéralogiques et granulométriques de la terre crue sélectionnée. La conductivité thermique des différents échantillons préparés a été étudiée. Du point de vue hydrique, les capacités de sorption/désorption de ces matériaux ont été mesurées en régime statique, en plus de de la perméabilité à la vapeur d'eau. L'étude a montré qua l'ajout de

la FPD améliore la conductivité thermique et augmente la résistance à la compression des échantillons étudiés comme il améliore, aussi, leurs performances hygrothermiques.

Le logiciel TRNsys nous a permis de simuler le comportement des enveloppes de différentes compositions et épaisseurs, et aussi, optimiser leurs performances énergétiques, sous différentes conditions climatiques, climat semi-aride M'chouneche et climat de montagne Ichemoul. La majorité des enveloppes présentent une stabilité des températures et humidités intérieures malgré les fluctuations extérieures. Cependant, les enveloppes composites à 55cm d'épaisseurs sont plus performantes, notamment en zone de M'chouneche.

En fin, l'utilisation de la terre-crue comme matériau de construction mérite d'être étudiée plus qu'avant aux vues de sa forte disponibilité, de son bilan environnemental positif et de ses propriétés hygrothermiques. L'ajout de FPD à la terre crue améliore ses performances mécaniques, hygrothermiques et son comportement vis à vis des conditions climatiques aurassiennes. De plus, ceci peut développer et revaloriser l'architecture en terre tout en permettant le développement d'une économie local.

OPTIMISATION OF THE ENERGY PERFORMANCE OF EARTHEN BUILDING ENVELOPES, HYGROTHERMAL STUDY OF AURASIAN HOUSING

Tahar BERREHAIL

ABSTRACT

The building sector is a worrying source of greenhouse gas emissions due to its consumption and production of materials, as well as the depletion of natural resources tends to become a critical issue. To this end, the use of sustainable and recyclable resources is one of the relevant responses. To do this, the use of bio-sourced materials for sustainable construction is a solution worth studying. The use of soil as a building material is a promising raw material, generating very little grey energy, and significantly improving environmental quality.

The aim of our research is to upgrade the use of soil as a construction material, due to the abstention of its massive use, and to measure its energy performance with the aim of developing locally produced biocomposites to be used as interior insulating materials. The major interest of this study is to demonstrate that the earth material can be used in the same way as other materials. In this study, samples were prepared using raw earth and date palm fibre as the main constituents, and due to the sensitivity of raw earth to water, we added a small amount of cement (5%) for a series of samples. The samples were distributed according to their compactness (degree of compaction) and the amount of date palm fibre contained.

First, we analysed the raw materials in order to obtain the thermal, hydric properties and the mineralogical and granulometric characteristics of the selected raw soil. The thermal conductivity of the various prepared samples was studied. From the hydric point of view, the sorption/desorption capacities of these materials were measured in static state, in addition to the water vapour permeability. The study showed that the addition of FPD improves the thermal conductivity and increases the compressive strength of the samples studied, as well as improving their hygrothermal performance.

The TRNsys software allowed us to simulate the behaviour of envelopes of different compositions and thicknesses, and also to optimise their energy performance, under different climatic conditions: semi-arid, M'chouneche climate and Ichemoul, mountain climate. The majority of the envelopes show a stability of the interior temperatures and humidities in spite of the exterior fluctuations. However, composite envelopes with a thickness of 55cm are more efficient, especially in the M'chouneche area.

Finally, the use of soil as a building material merits more study than before in view of its high availability, positive environmental balance and hygrothermal properties. The addition of FPD to the soil improves its mechanical and hygrothermal performance and its behaviour vis-à-vis the Aurassian climatic conditions. Moreover, this can develop and upgrade the value of earthen architecture while allowing the development of a local economy.

تحسين الأداء الطاقوي لأغلفة البناءات الطينية ، دراسة هدرو حرارية للبناءات الأوراسية

ملخص

يعد قطاع البناء مصدرًا مثيرًا للقلق لانبعاثات غازات الاحتباس الحراري نظرًا لاستهلاكه للطاقة الغير متجددة وإنتاجه للمواد الملوثة. إضافة الى ان نضوب الموارد الطبيعية يميل إلى أن يصبح قضية حرجية. ولهذه الغاية ، فإن استخدام الموارد المستدامة والقابلة لإعادة التدوير هو أحد البدائل الناجعة. لذلك ، يعد استخدام المواد الطبيعية في البناء المستدام حلاً يستحق الدراسة، كما ان استخدام التربة كمادة بناء خام واعدة، حيث تولد القليل جدًا من الطاقة الرمادية، وتحسن بشكل كبير الجودة البيئية.

يهدف بحثنا إلى تعزيز استخدام التربة و إعادة الاعتبار لها كمادة بناء مقبولة، نظرا لامتناع عن استخدامها على نطاق واسع ، وقياس فعالية أدائها من الناحية الطاقية و يكون ذلك بتطوير تركيبات حيوية المنتجة محليًا بهدف استخدامها كمواد عازلة.

اما الاهتمام الرئيسي لهذه الدراسة يتمحور حول إثبات أن مادة التربة يمكن استخدامها بنفس طريقة استخدام المواد الأخرى. في هذه الدراسة، تم تحضير العينات باستخدام مكونات مختلفة ، التربة الخام وألياف نخيل التمر ، وبسبب حساسية التربة الخام للماء ، أضفنا كمية صغيرة من الأسمت (5%) لسلسلة عينات خاصة. علما ان تصنيف العينات يكون حسب الضغط (درجة الانضغاط) ونسبة محتوى ألياف نخيل التمر.

أولاً ، قمنا بتحليل المواد الخام من أجل الحصول على الخصائص الحرارية وكذلك الخصائص المعدنية والحيوية للتربة الخام المختارة. ومن ثم، تم دراسة التوصيل الحراري للعينات المختلفة المحضرة. ومن وجهة نظر مقاومة الرطوبة ، تم قياس قدرات الامتصاص / الامتصاص لهذه المواد في نظام ثابت ، بالإضافة إلى نفاذية بخار الماء. أخيرا، أظهرت الدراسة أن إضافة FPD (ألياف نخيل التمر) يحسن التوصيل الحراري ويزيد من قوة الانضغاط للعينات المدروسة كما أنه يحسن من أدائها الحراري.

سمح لنا برنامج TRNsys بمحاكاة سلوك الأغلفة ذات التركيبات والسماكات المختلفة ، وكذلك لتحسين أداء طاقتها ، في ظل ظروف مناخية مختلفة ، مناخ شبه جاف في مشونش ومناخ اشمول الجبلي. تظهر غالبية الأغلفة استقرارًا في درجات الحرارة والرطوبة الداخلية على الرغم من التقلبات المناخية الخارجية. ومع ذلك ، فإن الأغلفة المركبة بسمك 55 سم تعمل بشكل أفضل ، خاصة في منطقة مشونش.

أخيرًا ، فإن استخدام التربة الخام كمادة بناء يستحق الدراسة أكثر من ذي قبل نظرًا لتوافرها العالي وتوازنها البيئي الإيجابي وخصائصها الحرارية. تعمل إضافة الألياف النباتية (ألياف نخيل التمر) إلى التربة الخام على تحسين أدائها الميكانيكي والحراري وسلوكها فيما يتعلق بالظروف المناخية للأوراس. بالإضافة إلى ذلك ، يمكن أن يؤدي ذلك إلى تطوير العمارة الترابية وإعادة تقييمها مع السماح بتنمية الاقتصاد المحلي.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 Méthodologie Et Contexte de la Recherche	5
I.1 Introduction	5
I.2 Objectifs de la thèse	7
I.3 Méthodologie adoptée.....	9
I.4 Enjeux Environnementaux	10
I.5 Le secteur du bâtiment et son impact environnemental	12
I.6 Pourquoi choisir la terre comme matériau de construction	17
I.7 L'intérêt de l'architecture de Terre	19
I.8 Les enveloppes des constructions	20
CHAPITRE 2 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	25
II.1 Les constituants majeurs de la terre	25
II.1.1 Les Argiles	26
II.1.2 Les graviers	30
II.1.3 Les limons	30
II.2 L'amélioration des caractéristiques des matériaux à base de terre par la stabilisation.....	31
II.2.1 Intérêts de la stabilisation.....	31
II.2.2 Techniques de stabilisation	34
II.2.2.1 Stabilisation par densification.....	34
II.2.2.2 Stabilisation par ajout de minéraux.....	35
II.2.2.3 Stabilisation par ajout de fibres.....	36
II.2.2.4 Stabilisation chimique	37
II.2.3 L'amélioration des caractéristiques des matériaux à base de terre par les fibres végétales	39
II.2.3.1 Influence de l'addition des fibres végétales sur les résistances mécaniques des matériaux en terre	39
II.2.3.2 Influence de l'addition des fibres végétales sur les caractéristiques thermo-physique de la terre	41
II.2.3.3 Influence de l'ajout de fibre végétale sur les caractéristiques hygrothermiques du matériau à base de Terre	42
II.2.4 Influence du compactage sur la résistance mécanique du matériau à base de terre	44
II.2.5 L'effet de l'ajout de ciment sur les performances mécaniques et thermo-physique du matériau à base de terre.....	45
II.2.5.1 La résistance à la compression.....	45
II.2.5.2 Propriétés thermiques	47

II.2.6	L'inertie thermique, une caractéristique de la terre à assurer le confort hygrothermique	50
II.3	Physique des transferts hygrothermiques dans les matériaux hygroscopiques	52
II.3.1	Comportement hygroscopique	52
II.3.1.1	Matériau hygroscopique :	53
II.3.1.2	Sorption et désorption	53
II.3.1.3	Mécanismes de transfert de l'humidité	55
II.3.1.4	Lois de transferts thermique et hydrique	57
II.4	Le Palmier Dattier	59
II.4.1	Ressource En Palmiers Dattier	60
II.4.2	Propriétés mécaniques de la fibre de palmier dattier	61
II.4.3	Propriétés thermo physique de la fibre de palmier dattier	62
II.5	L'inertie thermique	63
II.6	Mesures des propriétés thermophysiques	66
II.6.1	Propriétés thermiques des matériaux	66
II.6.1.1	La conduction thermique	67
II.6.1.2	Convection thermique	68
II.6.1.3	Rayonnement thermique	68
II.6.2	La conductivité thermique	69
II.6.3	Résistance thermique (R)	69
II.6.4	La diffusivité thermique	69
II.6.5	Effusivité thermique	70
II.6.6	La chaleur massique	70
II.6.7	Les principales méthodes de mesure des propriétés thermophysiques	71
II.6.7.1	Régime permanent (stationnaire)	71
II.6.7.2	Régime transitoire (instationnaire)	75
2.	Méthode de la plaque chaude	76
II.6.8	Les principales méthodes de mesure des propriétés hygroscopiques	78
II.6.8.1	Définition de l'isothermes de sorption	78
II.6.8.2	Méthode gravimétrique	79
II.6.8.3	Méthode dynamique	80
II.7	Conclusion	82
CHAPITRE 3 CARACTERISATION THERMO PHYSIQUE ET HYDRIQUE		85
III.1	Introduction	85
III.2	Formulation des éprouvettes	86
III.2.1	Propriétés des matériaux utilisés	86
III.2.1.1	Classification du sol utilisé	87
III.2.1.2	Composition chimique	89
III.2.1.3	Composition minéralogique	89
III.2.1.4	Confection des échantillons	90
III.3	Tests Effectués	92

III.3.1	Résistance à la compression simple.....	92
III.3.2	Conductivité thermique.....	92
III.3.3	Sorption et désorption.....	95
III.3.4	Perméabilité à la vapeur d'eau	96
III.4	Interprétations des Résultats.....	98
III.4.1	Résistance à la compression.....	98
III.4.1.1	Effet du compactage sur la résistance à la compression.....	98
III.4.1.2	Effet de la fibre FPD sur la résistance à la compression	101
III.4.2	Conductivité thermique.....	103
III.4.3	Adsorption et Désorption	108
III.4.3.1	Effet des fibres de palmier dattier. FPD	109
III.4.4	Perméabilité à la vapeur d'eau	116
III.5	Conclusion.....	118
CHAPITRE 4 SIMULATION D'UNE ENVELOPPE DE CONSTRUCTION EN		
MATERIAUX DE TERRE.....121		
IV.1	Introduction	121
IV.1.1	Outil de simulation, (TRaNsient SYstem Simulation program) programme de simulation des systèmes en régimes transitoires.....	122
IV.1.2	Environnement et outils composants TRNsys	122
IV.1.3	Modélisation pour simulation à partir de TRNsys :	125
IV.1.3.1	Détermination de la zone thermique sous Trnys3d.....	125
IV.1.3.2	Introduction des Données météo :.....	126
IV.1.3.3	Détermination des « Outputs », résultats souhaités de TRNsys :	126
IV.1.3.4	Lancement de la simulation :.....	127
IV.2	Présentation des sites choisis	128
IV.2.1	Choix des lieux pour les simulations :.....	130
IV.2.2	Caractéristiques thermo physiques des matériaux sélectionnés pour les simulations	132
IV.2.3	Composition des parois et dalle, adoptées pour la simulation :	132
IV.3	Résultats et interprétations	134
IV.3.1	Site M'chouneche	134
IV.3.1.1	Période d'été	134
IV.3.1.2	Période hivernale :.....	141
IV.3.2	Site Ichemoul,.....	144
IV.3.2.1	Période d'été (la plus chaude de l'année):.....	144
IV.3.2.2	Période d'hiver :.....	149
IV.3.3	Analyse des Performances énergétiques	151
IV.3.3.1	Analyse des besoins énergétiques	151
IV.4	Conclusion.....	155

CONCLUSION GÉNÉRALE	157
BIBLIOGRAPHIE	162
ANNEXE I DONNEES METEOROLOGIQUES DE M'CHOUNECHE	167
ANNEXE II DONNEES METEOROLOGIQUES D'ICHMOUL	171
ANNEXE III DONNES GRAPHIQUES DE LA PIECE A SIMULER.....	173

LISTE DES TABLEAUX

	Page
<i>Tableau 1 Différents mécanismes de transport de l'humidité</i>	56
<i>Tableau 2 Valeur de HR (%) en fonction de la nature du sel et de la température</i>	80
<i>Tableau 3 Propriétés physiques et chimiques du sol utilisé.</i>	87
<i>Tableau 4 Différentes séries d'échantillons avec leur ratios de compositions</i>	91
<i>Tableau 5 Spécification pour l'équipement de conductivité thermique</i>	94
<i>Tableau 6 résultats des écrasements à la compression</i>	100
<i>Tableau 7 Récapitulation des résultats des paramètres thermiques</i>	106
<i>Tableau 8 Perméabilités à la vapeur d'eau et résistances à la diffusion des différents échantillons en terre</i>	118
<i>Tableau 9 Récapitulation des besoins en chauffage et climatisation, cas: M'chounech et Ichmoul</i>	154

LISTE DES FIGURES

Page

<i>Figure 1 Répartition des émissions de CO2 selon leurs sources dans l'industrie cimentière 57% émissions de procédé, 37% émissions énergétique, 6% transport et électricité. (Source ministère de l'énergie)</i>	13
<i>Figure 2 la consommation d'énergie par secteur. (source ministère de 'industrie)</i>	15
<i>Figure 3 structure de la consommation final par secteur</i>	16
<i>Figure 4 Répartition de la consommation par secteur</i>	17
<i>Figure 5, répartition de la construction en terre à travers le monde. source: craterre</i>	20
<i>Figure 6. Effet des températures surfaciques sur le confort intérieur</i>	21
<i>Figure 7 les pertes et gains d'une enveloppe</i>	22
<i>Figure 8 Villa moderne, construit en Terre, répondant aux exigences de durabilité. (source craterre).....</i>	23
<i>Figure 9. particules d'argiles vues au microscope électronique. source (craterre)</i>	27
<i>Figure 10 Ponts capillaires entre feuillets d'argiles, source(craterre)</i>	28
<i>Figure 11 Structure d'un feuillet de Kaolinite.....</i>	28
<i>Figure 12 Fuseau Granulaire empirique</i>	31
<i>Figure 13 Différentes procédures de renforcement de la terre (S.Hejazi, M.Sheikhzadeh et al. 2012)</i>	33
<i>Figure 14 Procédés et principes de stabilisation source: H.Guillaud, T.Joffroy et al. (1995)</i>	34
<i>Figure 15 Schéma de l'effet de la déformation des fibres due aux changements d'humidité..</i>	37
<i>Figure 16 Effets des ajouts sur : a) la compression b) la profondeur de l'empreinte du pulvérisateur</i>	38

Figure 17 Effet de la variation de la teneur en ciment et de la teneur en fibres sur l'absorption totale d'eau après une journée d'immersion source : B.Taalah, G et al. (2014)	38
Figure 18 Courbes de sorption de différentes mixtures source :Liuzzi, Rubino et al. (2018).	43
Figure 19 Influence de la porosité sur la résistance à la compression, source	46
Figure 20 allure générale d'une isotherme de sorption source: Lelièvre (2015)	54
Figure 21 Schéma des modes des diffusions de la vapeur d'eau.	57
Figure 22 Schéma des bilans thermiques et hydrique source :D.MEDJELEKH (2015)	59
Figure 23 Schéma d'une palme de palmier dattier source :N.Benmansour	60
Figure 24 Les variations des propriétés mécaniques de palmier dattier avec différents traitements A.Alawar, A.M.Hamed et al. (2009)	62
Figure 25 réduction des fluctuations des T° extérieurs sous l'effet de l'épaisseur du mur en Terre crue (source :Fgaier (2013))	64
Figure 26 Temps de déphasage de divers matériaux de construction	65
Figure 27 Transfert thermique entre deux surfaces respectivement à la température T_a et T_b ($T_a > T_b$).	67
Figure 28 Schéma de type plaque chaude gardée pour la mesure de la conductivité thermique	72
Figure 29 Schéma de la méthode fluxmétrique, source : https://www.thermoconcept-sarl.com/methodes-de-mesure-de-la-conductivite-thermique/	73
Figure 30. Dispositif expérimental de la méthode des boîtes source :.....	74
Figure 31 Schéma de la méthode Fil chaud	76
Figure 32 Schéma de la méthode Hot Disk — Source Plane Transitoire	77
Figure 33 isothermes d'adsorption et de désorption	78
Figure 34. Schéma d'un montage expérimental type pour la méthode des solutions salines..	79
Figure 35 schéma d'un instrument DVS	81

<i>Figure 36. Échantillon de sol après tamisage source : Auteur.....</i>	86
<i>Figure 37. Situation géographique du lieu de prélèvement de la terre,</i>	87
<i>Figure 38 Analyse de granulométrie du sol utilisé source : Auteur.....</i>	88
<i>Figure 39 Diagramme de plasticité et classement d'échantillon source : auteur.....</i>	88
<i>Figure 40 Diffractogramme des rayons X de l'échantillon objet de l'étude. Source Auteur .</i>	90
<i>Figure 41 Moule en acier utilisé pour la confection des éprouvettes. Source : Auteur</i>	91
<i>Figure 42 presse hydraulique de type; controlab source : Auteur.....</i>	92
<i>Figure 43 C-therm TCi operator source:Auteur</i>	93
<i>Figure.44 enceinte climatique (Binder type KBF 720 source ; Auteur</i>	96
<i>Figure 45 Résultats, à la compression des échantillons sans ciment.....</i>	99
<i>Figure 46 un échantillon avant et après rupture, source : Auteur.....</i>	101
<i>Figure 47 Résultats des tests à la compression des échantillons stabilisés au ciment. Source : Auteur.....</i>	101
<i>Figure 48 Résultats des tests à la compression en fonction des taux de fibres. Source : Auteur.....</i>	103
<i>Figure 49. Conductivité thermique en fonction du compactage,.....</i>	104
<i>Figure 50 Dispositif de mesure de la conductivité thermique. Source :Auteur</i>	105
<i>Figure 51 Conductivité thermique en fonction densité des échantillons stabilisés au ciment. Source : Auteur</i>	107
<i>Figure 52 Variation de la conductivité thermique en fonction du compactage.....</i>	108
<i>Figure 53 Classification des isothermes de sorption selon l'IUPAC.....</i>	109
<i>Figure 54 Isothermes de sorptions des échantillons compactés à 10MPa</i>	110
<i>Figure 55 Isothermes de sorptions des échantillons compactés à 5MPa</i>	112
<i>Figure 56 isotherme de sorption pour échantillons stabilisés (5%) et compacté 5MPa.....</i>	113

<i>Figure 57 isotherme de sorption pour échantillons stabilisés (5%) et compacté 10MPa....</i>	114
<i>Figure 58. schéma de Principe d'une coupelle pour mesure de permeabilité à la vapeur d'eau</i>	116
Figure 59 Schéma de fonctionnement de TRNsys	123
<i>Figure 60 l'interface de l'application TRNBUILD pour décrire le bâtiment.</i>	124
Figure 61 Choix des outputs et zone objet de simulation. Source auteur	127
Figure 62. Schéma de calcul de Températures. Source : auteur	128
Figure 63 carte des bioclimats des Aurès source : (E.B. et J.-L. Ballais, « Aurès », Encyclopédie berbère, 7 1989, 1066-1095.).....	130
Figure 64. Situation géographique des deux lieux choisis. Source: auteur	131
Figure 65. Variations des températures et HR, cas enveloppes non renforcés.	135
Figure 66 Variations des températures et HR, cas enveloppes stabilisés.	136
Figure 67 Variations des températures et HR, cas enveloppes composites.	137
Figure 68 comparaisons des variations des T° et HR relatives aux enveloppes à épaisseurs 55cm,.....	139
Figure 69 comparaisons des variations des T° et HR relatives aux enveloppes à épaisseurs 35cm,.....	140
Figure 70 Variations des températures et HR, cas enveloppes non stabilisées.....	142
Figure 71 Variations des températures et HR, cas enveloppes stabilisé,	143
Figure 72 Variations des températures et HR, cas enveloppes composites,.....	144
<i>Figure 73 variation des T° et HR relatives aux enveloppes à e=55cm. période été, lieux Ichmoul</i>	147
<i>Figure 74 variations des T° et HR relatives aux enveloppes à e=35cm. période été, lieux Ichmoul</i>	148
<i>Figure 75 variations des T° et HR des enveloppes e=35cm, période d'Hiver. Ichmoul</i>	149
<i>Figure 76 variations des T° et HR des enveloppes e=55cm, période d'Hiver. Ichmoul</i>	150

<i>Figure 77 Besoins en chauffage, cas Ichmoul</i>	151
<i>Figure 78 Besoins en chauffage, cas de M'chouneche</i>	153
Figure 79 Températures mensuelles (source: meteonorm)	167
Figure 80 températures journalières maximales et minimales (source : meteonorm)	168
Figure 81 les précipitations annuelles (source : meteonorm).....	168
Figure 82 durées d'ensoleillement (source : meteonorm)	169
Figure 83 Rayonnement diffus et global.....	169
Figure 84 Rayonnement global journalier.....	170
Figure 85 Températures mensuelles (source: meteonorm)	171
Figure 86 températures journalières maximales et minimales (source : meteonorm)	171
Figure 87 les précipitations annuelles (source : meteonorm).....	172
Figure 88 durées d'ensoleillement (source : meteonorm)	172
Figure 89 Rayonnement diffus et global.....	173
Figure 90 Rayonnement global journalier.....	173

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

0F10P	0% de fibres et 10MPa de compactage
0F2P	0% de fibres et 2MPa de compactage
0F5C10P	0% de fibres, 5% de ciment et 10MPa de compactage
0F5C5P	0% de fibres, 5% de ciment et 5MPa de compactage
0F5P	0% de fibres et 5MPa de compactage
10F10P	10% de fibres et 10MPa de compactage
10F2P	10% de fibres et 2MPa de compactage
10F5C10P	10% de fibres, 5% de ciment et 10MPa de compactage
10F5C5P	10% de fibres, 5% de ciment et 5MPa de compactage
10F5P	10% de fibres et 5MPa de compactage
15F10P	15% de fibres et 10MPa de compactage
15F5P	15% de fibres et 5MPa de compactage
5F10P	5% de fibres et 10MPa de compactage
5F2P	5% de fibres et 2MPa de compactage
5F5C10P	5% de fibres, 5% de ciment et 10MPa de compactage
5F5C5P	5% de fibres, 5% de ciment et 5MPa de compactage
5F5P	5% de fibres et 5MPa de compactage
FPD	Fibres de palmier dattier
GES	Gaz à effet de serre
BTP	Bâtiment et travaux publics
BTS	Brique de terre stabilisées
CEB	concret earth brick
GICA	groupe industriel de ciments Agerien
MBV	Moisture buffer vapour
UE	union européen
DVS	Daynamic vapour sorption

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

	grammes par kilo Watt heure électrique	g/kWhel
	mégatonne équivalent pétrole	MTep
	Micromètre	μm
A	surface de l'échantillon exposée	m^2
P _v	Pression de vapeur	Pa
W	Teneur en eau	%
P	Masse volumique	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
W _{hyg}	teneur en eau hygroscopique	g/Kg
W _{sat}	Teneur en eau saturation	g/Kg
W _f	Teneur en eau de saturation libre	g/Kg
D	Coefficient de diffusion	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
<i>Eff</i>	Effusivité thermique	$\text{w} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{k}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$
C _p	chaleur spécifique du matériau	kJ/(kg K)
Q	Quantité de chaleur	J
t	Temps	S
R _T	Résistance thermique	$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
e	Épaisseur	m
S	Surface	m^2
T	Température	°C
HR	Humidité relative	%
WL	Limite de liquidité	%
WP	Limite de plasticité	%
I _p	Index de plasticité	%
R _c	Résistance à la compression	MPa
G	masse volumique	(kg/s)
φ_T	Flux de chaleur	W m^{-2}
α	Diffusivité thermique	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
ρ	Densité	Kg/m^3
φ_M	Flux massique	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
λ	Conductivité thermique	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Δm	Variation massique	Kg
δp	Perméabilité à la vapeur	(kg/ (ms Pa)
ΔP_v	différence de pression de vapeur	Pa

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Optimiser les performances d'une enveloppe de bâtiment dans le but de concrétiser un confort thermique et réaliser une économie d'énergie en respectant les valeurs de l'éthique environnementale; c'est tout d'abord repenser sa conception et revoir les choix de matériaux à mettre en œuvre. Une enveloppe c'est avant tout une barrière physique séparant l'espace intérieur des agressivités climatiques extérieures. L'enveloppe, c'est donc notre troisième peau, comme nos ancêtres qui ont dû porter des vêtements pour se protéger contre le climat, ils ont également dû construire des habitats qui les protégeraient de la chaleur et du froid.

L'urbanisation accélérée des villes des pays en développement et l'Algérie en fait partie, pour répondre aux exigences des populations en matière de logements et améliorer leur niveau de vie, a souvent eu recours à l'utilisation abusive de matériaux de construction non conformes aux règles de l'isolation thermique.

En Algérie, chaque année on connaît de nouveaux records de consommation d'électricité dus à l'expansion urbaine non réfléchie et à la multiplication de moyens énergivores, comme les climatiseurs dans les ménages. L'utilisation intense des moyens technologiques de régulation thermique conduit à une consommation abusive d'énergies fossiles avec une atteinte à l'environnement naturel. La consommation d'énergie augmente chaque année, entre 2013 et 2014 la consommation a augmentée de 7.8%, l'Algérie est l'un des pays au monde où le pic de consommation d'électricité évolue le plus rapidement. Cependant, le secteur du bâtiment reste le plus énergivore, avec 42% de consommation (M. Energie, 2015). De plus, la production de l'énergie électrique dépend en grande majorité du gaz naturel, ce qui entraîne une surconsommation du gaz naturel très élevée

Introduction générale

contribuant à l'émission d'une grande quantité de CO₂ et beaucoup de gaz nocifs. Malgré la diversité climatique avec une, large bande de climats contrastés des hauts plateaux, très chauds en été et froids en hiver, aucune exigence thermique n'est imposée dans les codes règlementaires, même dans ces régions à climat semi-aride.

En réponse aux défis énergétiques et environnementaux mondiaux, l'Algérie s'engage à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 7% - 22% à l'horizon 2020-2030 en vertu de l'Accord de Paris sur le climat adopté en 2015 (M. l'énergie, 2015). Paradoxalement, le développement des systèmes d'isolation, renforcés et étanche à l'air, provoqueraient des qualités d'air nocifs, des moisissures et des condensations dans les parois. Cependant, les performances thermiques des enveloppes sont mises en cause. Les matériaux hygroscopiques sont une nouvelle alternative prometteuse en termes d'amélioration du confort thermique (D.MEDJELEKH, 2015), de qualité de l'air intérieur, de consommation énergétique (Minke, 2006) et surtout de régulation de l'humidité intérieure dans les constructions (H.Cagnon, J.E.Aubert, M.Coutand, & C.Magniont, 2014; L.Zhang et al., 2017).

L'optimisation de la consommation d'énergie primaire des systèmes constructifs peut être réalisée par le recours aux matériaux locaux, facilement accessibles, afin de réduire les coûts énergétiques, tout en limitant l'utilisation de matériaux industrialisés. Les matériaux choisis dans ce cas, doivent avoir une forte masse thermique pour assurer le stockage de la chaleur et l'absorption acoustique (H.Binici, O.Aksogan, & T.Shah, 2005). Une majeure partie des déperditions énergétiques provoquées par les différents composants de l'enveloppe, les matériaux isolants ralentissent le transfert de chaleur à travers l'enveloppe de construction. La qualité de l'isolation à prévoir dépend du climat, de l'exposition des parties de

Introduction générale

l'enveloppe et surtout des caractéristiques thermo hydrique et physique des matériaux employés pour la construction. A cet effet, le choix d'un matériau doit être judicieux et dépend naturellement de sa disponibilité, de ses qualités et de son coût. Contrairement aux matériaux conventionnels, la terre à l'état naturel peut être utilisée comme matériau de construction pratiquement sans dépense d'énergie. Elle présente de nombreux avantages environnementaux, sociaux et culturels (Minke, 2006). La terre utilisée dans la construction des bâtiments est très sensible à l'eau. Cependant, pour contraindre à cet inconvénient, la terre est stabilisée et renforcée par différents procédés, ce qui diminue ainsi sa sensibilité à l'eau et augmente sa résistance à la compression. Dans la littérature en relation, des études de valorisation portent notamment sur des produits à base de terre, indique que les propriétés physico-chimique et minéralogique des différentes terres sont très variable, ce qui porte atteinte aux caractéristiques thermo physique et hydrique (F.El Fgaier, Z.Lafhaj, C.Chapiseau, & Antczak, 2016; H.Cagnon et al., 2014; M.Dondi, F.Mazzanti, P.Principi, M.Raimondo, & G.Zanarini, 2004).

Il s'avère donc utile de rechercher des mixtures à base de matériaux locaux qui améliorent l'isolation thermique des constructions et dont le coût de production est faible. Les Aurès est une région de l'Algérie très connue pour son architecture traditionnelle en terre et pour son caractère socio culturel diversifié. Son climat varie du sud au nord, constitue aussi une variable, fluctuante, créant des micros climats divers à considérer. Le confort thermique à l'intérieur de ces constructions en dépend et serait affecté. En fin, pour optimiser les performances énergétiques dans les constructions en terre, la connaissance des propriétés thermo-hydriques de chaque élément qui compose l'enveloppe du bâtiment est sine qua non.

CHAPITRE 1

Méthodologie Et Contexte de la Recherche

I.1 Introduction

La courbe de consommation d'énergie, dans les pays en développement, est en augmentation constante. L'enveloppe d'une construction est en perpétuelle interaction avec le milieu extérieur et l'ambiance intérieure qu'on souhaite maintenir en confort. Cependant, la performance thermique de l'enveloppe a une contribution directe à la protection de l'environnement et déterminante à cet égard. En effet, pour assurer le confort intérieur et contrôler les besoins énergétiques, il est primordial de mettre en œuvre des enveloppes à différentes fonctions (isolation, accumulation/restitution des apports solaires, etc).

La performance thermique de l'enveloppe à prévoir dépend du climat, de l'exposition des parois et aussi des matériaux employés pour la construction. Le choix du matériau à utiliser comme isolant dépend de sa disponibilité et de son coût.

Le patrimoine architectural nous révèle que la terre peut être utilisée comme matériau de construction durable et présente de nombreux avantages environnementaux; et l'expérience de Hassan Fathy a mis en évidence le matériau terre avec toutes ses qualités techniques et environnementales (Hassan, F, 1970). Ce matériau, si bien connu et utilisé par nos ancêtres, est devenu mal connu et rejeté, H.Fathy dévoile que le matériau terre véhicule tout un patrimoine chargé de valeurs matériels et immatériels et n'a besoin que de le promouvoir sur la scène active du secteur de bâtiment.

Notre problématique s'articule autour de deux cadres principaux. Le premier est d'ordre général, mettant une projection sur l'aspect de durabilité et l'apport positif, socio culturel et patrimoniale. Quant au second, il concerne l'aspect énergétique des enveloppes de construction en terre, et son impact économique et environnemental. La problématique énergétique portera sur le lien étroit des caractéristiques hygrothermiques et thermo physique avec la question d'isolation hygrothermique, en fonction des paramètres climatiques spécifiques a l'Aurès.

Vu sa fragilité et sensibilité à l'eau il s'avère utile de la renforcer et la stabiliser. L'ajout des fibres végétales et du ciment ou chaux comme stabilisant peut améliorer ses caractéristiques et ses performances hygrothermiques.

Dès lors, l'analyse de son comportement hygrothermique face aux variations climatiques est recommandée. Ainsi, dans une démarche d'optimisation des performances énergétiques d'enveloppes de constructions en terre nécessite une caractérisation des propriétés thermophysiques et d'outils numériques destinés à la prédiction en usage du comportement hygrothermique d'enveloppes complexes.

Dans ce travail nous proposons de mettre au point des échantillons de terre crue avec incorporation de fibre de palmier dattier à faible masse volumique et dont la conductivité thermique est suffisamment faible pour que le matériau obtenu soit judicieux pour un usage pour isolation thermique. La valorisation de la PFD est une contribution à la protection de l'environnement (la FPD est le plus souvent jetée ou utilisée comme aliment de bétails, ou autre...) constitue le second objectif de ce travail.

Pour savoir si nous pouvons mettre le matériau terre en valeur, notamment en région des Aurès, dans le contexte du développement local et

d'économie d'énergie, notre travail doit répondre au questionnement majeur suivant :

La terre a-t-elle des performances techniques et hygrothermiques pour devenir un matériau de construction qui répond aux exigences de la durabilité?

I.2 Objectifs de la thèse

L'état de l'art montre que les caractéristiques thermo hydriques de matériaux issus de la terre sont très peu investis.

Pourtant, les caractéristiques thermo hydrique et physiques de matériaux à base de terre, ainsi que leur caractère écologique, font de ces deux des matériaux très intéressants pour le domaine de la construction.

Le secteur du bâtiment, en particulier, a longtemps utilisé la terre comme ressource locale, mais depuis la fin de la seconde guerre mondiale ce matériau a été abandonné au profit des matériaux cimentaires et du plâtre pour leur rapidité de fabrication et de mise en place. Depuis quelques années, le secteur du bâtiment est entré dans une dynamique d'amélioration des performances énergétiques qui tend à choisir des produits de construction multi-performants et respectueux de l'environnement. Dans ce cadre, la terre crue retrouve actuellement un engouement chez les acteurs du bâtiment, en particulier celui de l'éco- construction, de par sa capacité de régulation hygrothermique et sa faible empreinte environnementale.

En effet, la terre crue impose des contraintes physiques et une variabilité de caractéristiques en fonction du secteur géographique. Ainsi, l'utilisation de cette matière en tant que produit non cuit, pour le bâtiment, est souvent liée, aux connaissances locales sur des gisements de terre. De plus la terre brute, non stabilisée est vulnérable aux phénomènes climatiques. La composante

argileuse de la terre est à la fois cohésive et sensible en présence d'eau. L'utilisation de la terre en paroi extérieure demande donc des dispositions constructives exigeantes (protection des parois contre la pluie) pour éviter la dégradation de la paroi.

Nous nous proposons dans ce travail de mettre au point des produits de terre avec incorporation de matériaux à faible masse volumique et dont les conductivités thermiques sont suffisamment faibles pour pouvoir obtenir un matériau judicieux favorable pour une isolation thermique. Nous avons choisi d'ajouter à la terre: de la fibre de palmier dattier, ou du ciment, ou bien les deux en même temps. Le second objectif de ce travail est la valorisation de la fibre de bois de palmier dattier qui contribue aussi à la protection de l'environnement.

La démarche scientifique retenue consiste à passer par une caractérisation d'une série d'échantillons à une échelle de matériau, ce qui permettra de valider les expérimentations et d'en affiner la modélisation. Les propriétés investies sont:

- La conductivité thermique
- La capacité calorifique;
- Le phénomène de sorption
- La perméabilité à la vapeur d'eau et son lien avec l'humidité relative;
- Le coefficient d'absorption d'eau;
- La diffusivité de l'eau à l'état liquide (une propriété qui détermine le taux de diffusion de l'eau à l'état liquide dans les matériaux poreux) et sa relation avec la teneur en eau;
- La résistance à la compression.

Les simulations informatiques permettent d'étudier la performance

hygrothermique des enveloppes de constructions offrant la possibilité d'en améliorer la conception. Ce travail a aussi pour objectif d'utiliser des outils de modélisation pour prédire le comportement hygrothermique des enveloppes de constructions en terre soumises aux conditions climatiques, propre au massif Aurasien, et d'en améliorer l'efficacité énergétique et la durabilité.

I.3 Méthodologie adoptée

Pour concrétiser les objectifs de cette thèse nous avons opté pour des mesures de propriétés physico-chimique et thermo hydrique ainsi que la résistance à la compression. Nous présentons la méthode utilisée pour la mesure de la conductivité thermique. Concernant, la capacité calorifique, l'effusivité et diffusivité seront déduites par calcul à partir de données de la conductivité thermique.

Les échantillons en terre confectionnées, ainsi que celles renforcées par incorporation de fibre de palmier dattier naturelle ou stabilisés par ciment, doivent avoir une résistance mécanique suffisante. Une partie de ce travail est donc consacrée à l'étude des propriétés mécaniques. Nous nous sommes ensuite intéressés à mesurer les paramètres hygrothermiques nécessaires à la modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité entre les environnements extérieurs et l'intérieur d'une enveloppe de construction. Une étude des isothermes de sorption et de la perméabilité à la vapeur d'eau, des matériaux, est donc à réaliser.

Enfin, et grâce à la modélisation par TRnsys nous pourrons valoriser et optimiser les performances thermiques et hygrothermique des enveloppes en terre, en indiquant les profils des températures, d'humidités relatives, ainsi que l'estimation des besoins énergétiques de façon à prévoir la durabilité et l'efficacité des matériaux mis au point dans ce travail.

I.4 Enjeux Environnementaux

Le climat est une ressource naturelle qui affecte une grande partie des activités humaines. Son influence sur notre vie est très grande. La communauté scientifique s'accorde désormais sur le fait que la terre est en train de se réchauffé et que cette tendance va s'accroître du fait de l'effet de serre provoqué par les émissions de certains gaz qui piègent la chaleur dans l'atmosphère terrestre.

Le phénomène des changements climatiques est une des menaces sérieuses posées à l'environnement de la planète, avec des effets néfastes sur la santé des populations, l'activité économique, la sécurité alimentaire et bien d'autres ressources naturelles. Nous assistons depuis quelques décennies à une prise de conscience de la part des pouvoirs publics, des acteurs économiques et de la société civile, des conséquences défavorables des activités de développement sur l'environnement et de l'obligation de réduire ces impacts. C'est pourquoi, aujourd'hui, au niveau mondial, dans les secteurs industriels, de l'énergie, des transports, de la construction... etc les incitations et les contraintes sont de plus en plus importantes pour intégrer les projets à une démarche de développement durable.

En 2013, les émissions mondiales de CO₂ par personne et par an étaient de 5,1 tonnes de CO₂, avec 16,4 tonnes de CO₂ aux États-Unis, 7.2 tonnes de CO₂ en Chine, 6,8 tonnes de CO₂ dans les pays de l'union européenne (UE) et 1,9 tonne de CO₂ en Inde. En Algérie les émissions de CO₂ par personne sont de 3,7 tonnes pour une émission de 143 millions de tonnes, une nette augmentation par rapport à 2010 quand l'Algérie était classée 35^e pour l'émission de 123,475 tonnes de CO₂, soit 0,39% du volume mondial (Ministère .E, 2015). Une émission en hausse de 16% en trois ans due à la

combustion de l'énergie fossile, à la production de ciment, l'exploitation des gisements miniers et l'extraction des hydrocarbures. La production électrique, à elle seule, génère 547.8543 g/kWhel (grammes par kilo Watt heure électrique). Avec 15% de la population mondiale et 20% de la superficie de la terre, l'Afrique n'émet que 4% des émissions de gaz à effet de serre(GES). En Algérie la consommation d'énergie augmente chaque année, entre 2013 et 2014 la consommation a augmentée de 7.8%. Le secteur du bâtiment est responsable, de 42% des consommations énergétiques. Par conséquent, le secteur du bâtiment a un impact capital sur les consommations énergétiques et les émanations de gaz à effet de serre. l'Algérie prévoit de réduire ses émission de gaz à effet de serre (GES) de 7% - 22% à l'horizon 2020-2030 en vertu de l'Accord de Paris sur le climat adopté en 2015. Pour cela l'Algérie compte beaucoup sur le soutien technique de l'UE à l'élaboration et la mise en œuvre de stratégies et d'outils d'atténuation et d'adaptation tels que des stratégies d'adaptation nationales, des stratégies de développement à faibles émissions de carbone, des actions nationales appropriées d'atténuation et des méthodes de mesure, notification et vérification, en particulier en développant des inventaires nationaux des gaz à effet de serre. Dans le secteur du bâtiment, le programme prévoit l'isolation thermique de logements annuellement, avec un engagement financier de l'état qui prendra en charge 80% des surcoûts liés à cette opération.

En effet, pour diminuer la production de gaz néfaste pour l'environnement il est primordial d'augmenter les exigences de conformité thermique des bâtiments neufs et anciens.

Depuis plusieurs années, l'Algérie mène une politique d'amélioration de la gestion des ressources énergétiques. Cette volonté politique s'est

caractérisée à travers la loi n°99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie et de ses textes d'application en l'occurrence le décret exécutif n°2000- 90 du 24 avril 2000 portant réglementation thermique dans les bâtiments neufs. Son application devait aboutir obligatoirement à l'isolation thermique des bâtiments neufs. Malheureusement, cette réglementation n'est toujours pas entrée en vigueur, en raison de l'inexistence d'organisme devant vérifier son application, et aussi de l'absence d'outils opérationnels permettant aux professionnels (bureaux d'études en architectures) d'imposer les exigences de cette réglementation dans la conception des bâtiments.

I.5 Le secteur du bâtiment et son impact environnemental

Le changement climatique est l'un des phénomènes et défis les plus complexes auquel la planète est exposée, et aucun pays n'est à l'abri de ses effets.

Le secteur du bâtiment et de la construction est l'un des secteurs les plus concernés par les enjeux du développement durable. Le domaine de la construction, et en particulier celui basé sur l'utilisation de matériaux est appelé à évoluer constamment : il faudra limiter les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre, économiser les ressources naturelles non renouvelables, penser à la déconstruction, tout en améliorant les propriétés d'usages des matériaux et des ouvrages et en veillant à la santé et au confort des usagers.

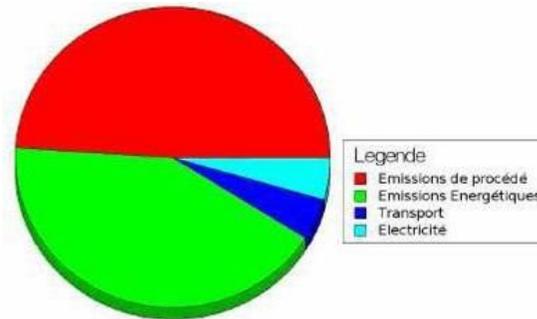


Figure 1 Répartition des émissions de CO2 selon leurs sources dans l'industrie cimentière 57% émissions de procédé, 37% émissions énergétiques, 6% transport et électricité. (Source ministère de l'énergie)

Parce qu'elle a un ambitieux programme dans les travaux publics et le bâtiment, l'Algérie aspire à augmenter ses capacités en matériaux de construction et même arriver à en exporter. Pour réaliser tous les chantiers publics décidés dans les différents programmes quinquennaux ou encore les chantiers privés, les professionnels des filières de l'industrie algérienne du bâtiment et des travaux publics, tous secteurs confondus, veillent à la disponibilité des matériaux de construction.

En Algérie la production du ciment a grimpé à 13.950.660 tonnes en 2017 contre 12.604.045 tonnes en 2016, en hausse de plus de 1,34 million de tonnes. Avec ses douze (12) cimenteries, groupe industriel de ciments Agerien (GICA) a ainsi connu son troisième record consécutif en dépassant même ses prévisions qui tablaient sur une production de 13,17 millions de tonnes de ciment pour l'année 2017 (Aps, 2018). L'industrie du ciment engendre des nuisances sur l'environnement telle que les émissions de poussières, responsables des maladies respiratoires et de dioxyde de carbone (CO2), gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique (Khadidja, 2011). La Fig.1 montre bien la répartition des

émissions selon leurs sources dans l'industrie cimentière.

Aujourd'hui, les besoins énergétiques de l'Algérie sont satisfaits, exclusivement, par les hydrocarbures. L'industrie du bâtiment et travaux public (BTP) est une grande consommatrice de ressources naturelles et d'énergie. Elle est aussi réputée pour être une grande productrice de gaz à effet de serre (type CO₂) et de déchets en tout genre. Par ailleurs, il s'avère souvent que le rendement énergétique des constructions et leur durabilité sont souvent inférieurs aux calculs, ce qui augmente directement ou indirectement leur impact environnemental.

De plus, la consommation du secteur "industries et Bâtiment et travaux publics (BTP)" a connu une croissance de 7,0% par rapport à l'année 2014, passant de 8,2 MTep à 8,8MTep en 2015, due à la hausse de la consommation du sous-secteur matériaux de construction (6,5%) et des industries manufacturières (6,9%) (M. d. d. l'énergie, 2015). La consommation électrique du secteur résidentiel a atteint 8756KTep en produits gazeux soit 60% de la consommation totale des produits gazeux, Il représente, de ce fait, le premier secteur grand consommateur d'énergie au niveau national. Du bilan énergétique de 2015, il en ressort que la consommation des "ménages et autres" représente près de 43% de la consommation finale. Elle a augmenté de 9,4% pour atteindre 18,1 MTep en 2015, tirée par la consommation du sous- secteur résidentiel (10,5%), sous l'effet de la conjonction de plusieurs facteurs notamment, le développement démographique, le nombre important de logements livrés ainsi que l'accroissement du nombre de clients BT qui a avoisiné 350 000 nouveaux clients en 2015 (M. d. d. l'énergie, 2015).

En fin, l'Algérie vient de réactualiser le programme national de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique

adopté en 2011. L'objectif de ce programme d'ici 2030 est de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 7% à 22%, réduire de 10% la consommation nationale d'énergie fossile, et d'avoir 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, d'origine renouvelable (M. d. l'énergie, 2015).

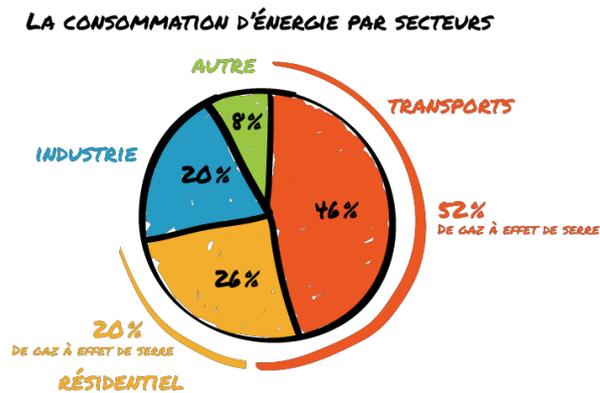


Figure 2 la consommation d'énergie par secteur. (source ministère de l'industrie)

Tous ces accroissements s'inscrivent dans les paradoxes et contradictions de l'idéal du développement durable tels qu'ils ont été énoncés dès 1987 dans le rapport Bruntland (Bruntland, 1987): « le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre les droits des générations futures ». Ils doivent s'envisager dans un contexte d'interactions entre des enjeux sociaux (équité sociale), des enjeux économiques (maintien de la compétitivité) et des enjeux proprement environnementaux (l'action humaine sur l'environnement). Cette perspective doit s'inscrire dans le contexte d'évolution et de transformation des différents secteurs d'activité, à commencer par le secteur du bâtiment lui-même: les actions environnementales ne doivent pas diminuer pour autant la compétitivité.

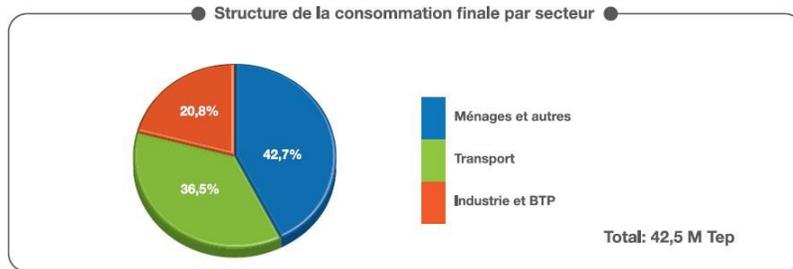


Figure 3 structure de la consommation finale par secteur (Source : ministère de l'énergie)

En conséquence, et pour s'inscrire dans cette perspective de développement durable dans laquelle la plupart des pays industrialisés adhèrent, il est indispensable que l'industrie du BTP recherche des solutions alternatives aux matériaux utilisés (éco-matériaux). Il semble aussi évident que ces solutions alternatives sont à rechercher dans de nouvelles approches conceptuelles des matériaux constitutifs et de leur mise en œuvre.

Face à ces défis environnementaux, les matériaux de constructions s'avèrent un paramètre clé majeur, pour limiter l'impact environnemental et concrétiser un milieu sain et confortable. Le choix de matériau adéquat se base essentiellement sur l'économie (du point de vue énergétique et financier), l'esthétique et l'impact environnemental (Dung, 2010). Il est inconcevable aujourd'hui de se priver des avantages techniques, économiques et sociétaux qu'apporte les matériaux biosourcés. Il existe donc de véritables défis, économiques et scientifiques, pour proposer demain aux usagers de nouveaux produits avec un coût environnemental plus faible.

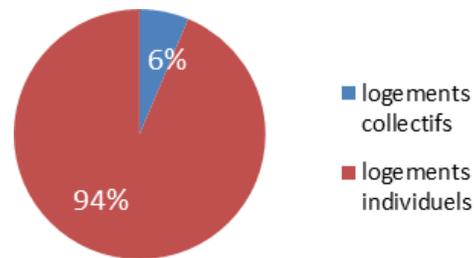


Figure 4 Répartition de la consommation par secteur Source (ministère de l'énergie)

I.6 Pourquoi choisir la terre comme matériau de construction

L'usage de terre comme matériau de construction principal remonte à l'antiquité; la Muraille de Chine en est un exemple. De nos jours, près des deux tiers de la population mondiale vit dans des habitats construits en totalité ou en partie en terre crue. Le matériau, terre crue, est devenu méconnu et très peu utilisé pour beaucoup d'obstacles, en Algérie il est menacé d'extinction et est synonyme de pauvreté et de précarité (T.Berrehail, 2009). En plus, les matériaux en terre sont très peu explorés par les équipes de recherches afin de connaître leurs caractéristiques, mécaniques et hygrothermiques. Le matériau terre se présente comme une alternative et une réponse favorable aux exigences du développement durable. Ces derniers temps, avec la mise en avant des problèmes liés à l'augmentation de la pollution, la diminution des ressources en énergie et la nécessité de concevoir et de fabriquer des éléments constructifs sains; un regain particulier permet à la construction terre crue de revenir. Ses propriétés sur le plan comportement physique et confort biologique ont été redécouvertes et remise en valeur. L'utilisation des matériaux à base de terre ont, comme tous matériaux bio-sourcés, des avantages:

- Les ressources abondantes et renouvelables la terre est présente partout, et

par conséquent assurent une abondance et son utilisation évite l'épuisement des ressources dans l'avenir. Faible énergie grise: L'énergie grise est la somme de toutes les énergies nécessaires durant tout le cycle de vie, soit de la production, au transport, à la fabrication, à l'utilisation et enfin à la démolition du matériau ou à son élimination.

- Équilibre d'humidité, absorber et adsorber l'humidité plus rapidement que tout autres matériaux de construction, lui permettant d'équilibrer le climat intérieur. En effet, la terre peut absorber jusqu'à 3% de son poids en vapeur d'eau et peut la restituer en cas d'assèchement de l'air environnant intérieur (Minke, 2006).
- Stock la chaleur: Comme tous les matériaux lourds, la terre stock la chaleur. Par conséquent, dans les zones climatiques où les écarts de température diurnes sont élevés ou lorsqu'il devient nécessaire de stocker le gain de chaleur solaire par des moyens passifs, la terre peut équilibrer le climat intérieur.
- Économise l'énergie et réduit la pollution de l'environnement: La préparation, le transport et la manutention de la terre sur place ne nécessitent que 1% de l'énergie nécessaire à la production, au transport et à la manipulation de briques cuites ou du béton armé (Minke, 2006). La terre, donc, ne produit pratiquement aucune pollution de l'environnement.
- La terre absorbe les polluants: Il est souvent considéré que les murs de terre aident à nettoyer l'air intérieur pollué, mais cela n'a pas été encore prouvé scientifiquement (Minke, 2006).
- la terre peut être associée à d'autres ajouts naturels ou industriels à savoir, les fibres végétales synthétiques, chaux et ciment, et cela afin d'améliorer ses caractéristiques mécaniques et thermo physique ou hygrothermiques. ceci peut offrir une gamme très variée de matériaux à base de terre.

I.7 L'intérêt de l'architecture de Terre

Le patrimoine architectural est chargé de beaucoup de potentiel qui peut apporter des solutions valables aux crises et problèmes de notre époque. Une époque sinistrée qui; épuisée de ses ressources, menace la vie sur terre. L'architecture de terre est rejetée pour être synonyme de précarité de pauvreté et de sous-développement (T.Berrethail, 2009). Elle a représenté souvent la maison du pauvre ou l'habitat de la pénurie.

Les expériences de pays de haute technicité, (France U S A, Australie, et organisme des Nations Unies), montrent que l'architecture de terre donne un champ plus vaste au marché immobilier. De plus, la variété des procédés de constructions en terre permet d'absorber le chômage, et ouvre ainsi un grand marché pour l'emploi qui assimile aussi bien une main d'œuvre peu qualifiée que des cadres de haut niveau.

La terre est une matière qu'on retrouve partout, son utilisation jusqu'à nos jours est acceptée, essentiellement dans les régions rurales. Le maintien des populations rurales, dans leurs environnement, est un autre avantage de la revalorisation de l'architecture de terre, ainsi le matériau terre, localement produit, favorise le développement économique local et devient un moyen de fixation des populations rurales tentées par la migration vers les grandes villes.

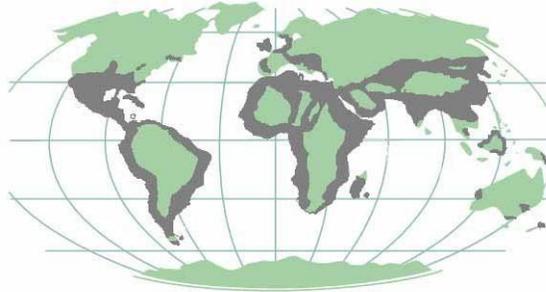


Figure 5, répartition de la construction en terre à travers le monde. (source: craterre)

La terre en tant que matériau de construction est disponible et existe sous de nombreuses compositions. Elle est le plus efficacement utilisée dans les pays en voie de développement pour abriter le plus grand nombre de personnes. La carte du monde ci-dessus montre les distributions des utilisations des matériaux autour du monde. Néanmoins, il faut noter que les bâtiments en terre ne sont pas un phénomène existant dans les pays du tiers monde, mais aussi dans les pays développés.

En fin l'architecture de terre relance la relation entre l'homme et son environnement architectural représenté par les volumes, les formes, les arts et le patrimoine issue de son échelle humaine.

I.8 Les enveloppes des constructions

L'enveloppe est une transition entre l'espace intérieur et l'extérieur. Elle est très importante tant d'un point de vue social et humain, mais aussi d'un point de vue architectural et énergétique. L'enveloppe extérieure de la construction, incarne essentiellement l'identité de ses usagers, et décrit une fonctionnalité et un mode de vie pour ses occupants.

Assurant en premier lieu la protection, l'enveloppe est le théâtre des transferts thermique, d'humidité, et d'air, qui déterminent la nature du climat intérieur. Le mode constructif a certainement un effet sur le degré du confort des occupants et sur le niveau de performance énergétique de la construction. En effet, l'isolation thermique, l'inertie thermique ainsi que le choix judicieux des matériaux à mettre en œuvre, sont tous des paramètres déterminants.

L'enveloppe d'une construction doit assurer les objectifs suivants:

1. Le confort thermique des occupants ;
2. L'économie d'énergie
3. La durabilité.

L'enveloppe du bâtiment est donc :

Mieux les murs extérieurs seront isolés thermiquement, plus leurs températures seront élevées en hiver et basses en été.

Plus les températures des parois seront homogènes, il y aura moins de risque de condensation.

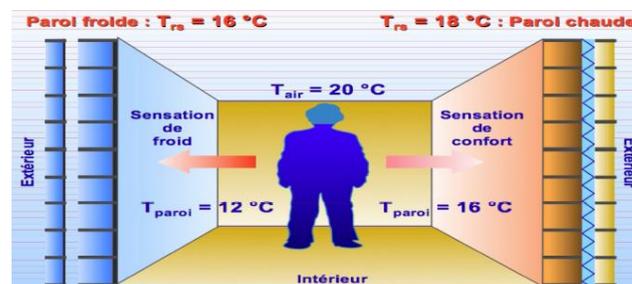


Figure 6. Effet des températures surfaciques sur le confort intérieur (source web :(Enveloppe, 2021)

Plus étanches seront les parois, moins il y aura d'infiltration d'air.

Plus les parois sont chaudes, moins on aura recours à élever la température ambiante de l'air du local et les déperditions thermiques seront donc minimales.

L'enveloppe doit, donc, essentiellement réduire au minimum les besoins net en énergie. Ses qualités ont un impact sur les pertes par transmission, les pertes par infiltration et les gains solaires. Le choix des matériaux de construction est, donc, une étape importante. Il est fondé sur un ensemble de critères d'usages techniques, économiques et esthétiques, auxquels s'ajoute les paramètres environnementaux (Faycal El Fgaier, 2013).

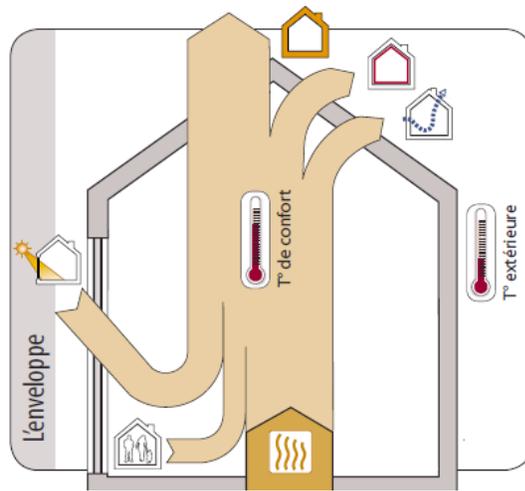


Figure 7 les pertes et gains d'une enveloppe (source web :(Enveloppe, 2021)

De plus, l'enveloppe d'une construction doit remplir aussi, suivant le concept de l'architecture bioclimatique, les fonctionnalités suivantes :

- | | |
|----------|---|
| En Hiver | <ul style="list-style-type: none"> • Capter l'énergie solaire • Stocker l'énergie solaire • Conserver l'énergie interne • Diffuser l'énergie interne |
| En Été | <ul style="list-style-type: none"> • Protéger de l'énergie solaire • Évacuer l'énergie interne • Minimiser les apports • déphaser les pics de chaleur |

De nos jours les problématiques énergétiques, par leurs exigences

réglementaires, influent considérablement le choix des dispositifs constructifs et des matériaux à mettre en œuvre pour constituer une enveloppe qui répond favorablement aux conditions réglementaires. Par ailleurs la notion de performance énergétique, de l'enveloppe de bâtiment, est d'actualité et représente un enjeu de taille important à relever.

En effet, beaucoup de pays développés ne cessent d'instaurer des réglementations thermiques qui imposent des niveaux minimums de confort à respecter. Face aux enjeux d'efficacité énergétique des bâtiments et des exigences réglementaires et autres ; les enveloppes en terre crue peuvent donner beaucoup de satisfactions aux attentes et aspirations de notre époque.



Figure 8 Villa moderne, construit en Terre, répondant aux exigences de durabilité. (source craterre)

Synthèse Bibliographique

CHAPITRE 2

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1 Introduction

En se consacrant à l'étude des caractéristiques du matériau Terre nous mène systématiquement à élaborer une synthèse de l'état de l'art. Ceci nous permettra de nous situer par rapport aux avancées scientifiques.

Dans ce chapitre notre intérêt se portera en premier lieu aux constituants majeurs de la matière terre, aux caractéristiques physiques et mécaniques et aussi aux grandeurs thermo-physiques, notamment, la conductivité thermique, la diffusivité etc....En plus, nous mettrons en évidence l'effet de la stabilisation ainsi que le renforcement en fibres naturelles sur les performances mécaniques et thermo-physiques du matériau Terre. La rareté et la pauvreté des données hygrothermiques et thermo-physiques est à signaler.

En fin, les résultats collectés seront considérés comme un ensemble de références à nos travaux ultérieurs.

II.2 Les constituants majeurs de la terre

De quoi est composée le matériau « terre », énigmatique soit -il et si utilisé depuis des millénaires ?

La terre, un matériau sédimentaire et naturel, utilisé pour la construction. Elle résulte de l'altération d'une roche, ou peut être résiduelle ou transportée par l'eau ou le vent. La terre est un mélange de grains de différentes tailles (cailloux, graviers, sables, silts et argiles) en proportions variées. Les particules les plus fines, qui constituent le liant du matériau, se

différencient des autres grains par leurs petites tailles.

Les cailloux, graviers, sables et silts sont essentiellement composés de fragments de roches, plus ou moins sphériques, plus ou moins anguleux selon leur origine « genèse ». Ils constituent le squelette granulaire de la matière (Terre) : Ils apportent leur rigidité au matériau.(R.ANGER, 2011)

Cette diversité des constituants permet d'obtenir une compacité plus importante, elle-même directement liée à la résistance. Les empilements des différents constituants permettent d'obtenir le matériau le plus dense possible. L'importance des empilements des grains, réside dans leur capacité à épouser parfaitement la forme du coffrage ou du moule dans lequel ils sont mis en œuvre avant de devenir solide et résistant, c'est le cas du procédé **Pisé**, qui prend la forme du coffrage et devient solide par simple compression.

Cependant, la classification courante des différents grains est comme suit:

Cailloux entre 20 cm et 2 cm, Graviers entre 2 cm et 2 mm, Sables entre 2 mm et 60 μm (microns) Silts entre 60 μm et 2 μm (microns), et les Argiles au-dessous de 2 μm (microns) (Anger, Fontaine, Houben, Doat, & Van Damme, 2009).

II.2.1 Les Argiles

Les argiles sont totalement différentes : durant leur transformation, elles ont incorporé des fragments de molécules d'eau (des groupes hydroxyles OH-) à leur structure cristalline en couches. Les argiles sont des silicates, c'est-à-dire des SiO_2 , invisibles à l'œil nu. Elles sont des microparticules à faciès lamellaire, elles ont une structure en couches formées de feuillets superposés et sont de ce fait classées dans la famille des phyllosilicates hydratés. voir Figure 9

Leurs spécificités de taille et de forme les différencient des autres grains leur conférant en particulier des propriétés de cohésion et de plasticité très importantes (R.ANGER, 2011). Il est courant de considérer la terre comme un béton dont l'argile serait le liant. En effet, en présence d'eau les feuillets d'argiles se transforment en une pâte collante, voir Figure 10. Elle joue ,donc, le rôle de Liant, collant entre eux les différents constituants, « Sans les argiles, la terre ne serait pas adaptée à la construction »(Anger et al., 2009; R.ANGER, 2011)



Figure 9. particules d'argiles vues au microscope électronique. source (craterre)

La structure de base des argiles est composée de couches minérales et d'un espace inter foliaire. Le réseau de l'argile est basé sur un ensemble de Tétraèdres de silice SiO_4 . Ces tétraèdres partagent trois sommets entre eux suivant un plan dit hexagonal. Le sommet restant est partagé avec un octaèdre AlO_6 . Il existe différentes combinaisons de tétraèdre et octaèdre suivant le type d'argile.

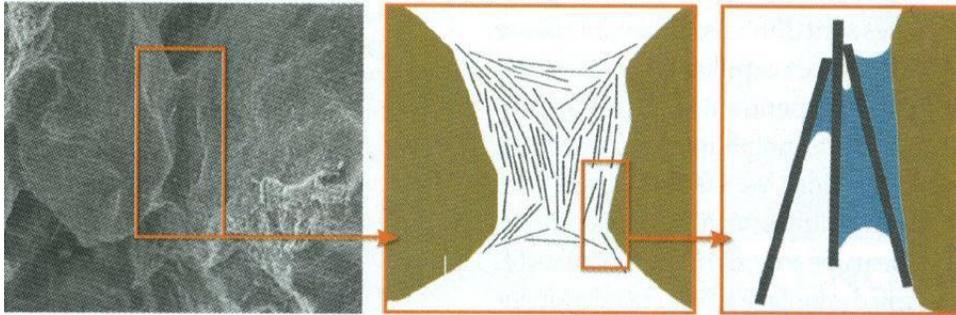


Figure 10 Ponts capillaires entre feuillets d'argiles, source(craterre)

En fin, On dénombre un très grand nombre d'espèces d'argile mais les types les plus couramment rencontrés sont la kaolinite, l'illite, la smectite et la montmorillonite. La kaolinite est une argile constituée d'une couche de tétraèdre et d'une couche d'octaèdre. La kaolinite ne dispose que de charges négatives à l'extérieur de ses feuillets. Chaque feuillet est relié par une liaison constituée d'hydrogène et sa distance interfoliaire est de l'ordre de 7 Å. La composition chimique de la kaolinite est $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$.

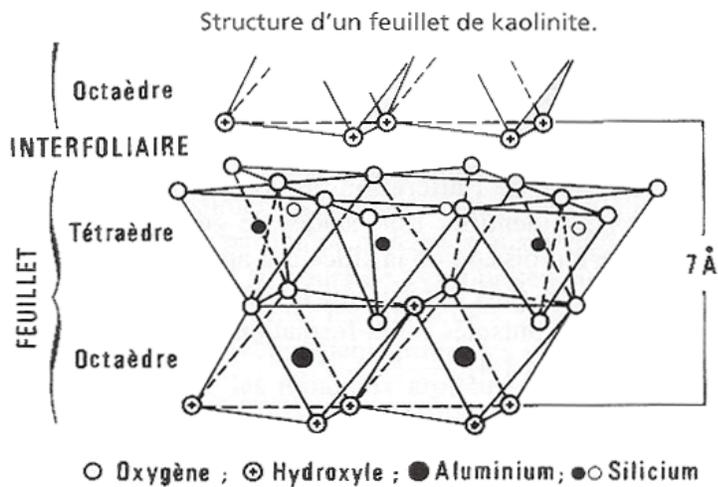


Figure 11 Structure d'un feuillet de Kaolinite, source :(Amina et al, 2019)

L'illite est la substitution d'une partie des ions de silice par des ions d'alumine procure une différence de charge ionique qui est compensée dans

le cas de l'illite par un ion K^+ . Cette liaison forte empêche l'introduction de molécules d'eau entre les différents feuillets ce qui rend l'illite peu sensible à l'eau. La smectite, tout comme l'illite, une partie des ions de la structure de base est remplacée. Les atomes d'aluminium sont remplacés par du magnésium voir même du fer. Les cations compensateurs sont soit le sodium ou soit le calcium. Les liaisons inter foliaires ainsi formées sont beaucoup plus faibles ce qui permet à l'eau de s'introduire entre les différents feuillets et de réagir avec ces ions compensateurs (gonflement du sol) (Flament, 2013).

La plasticité des argiles est également élevée, elles se déformeront souplement aux contraintes. Ainsi, les argiles peuvent également être largement compressées. En effet, elles rejettent une importante quantité d'eau lors des compactages, par conséquent, la taille des pores diminue et le matériau devient imperméable. Enfin, les argiles se dispersent dans l'eau et sont soumises à floculation : les particules fines restent en suspension dans l'eau en mouvement et lorsque l'eau est stable, leur vitesse de décantation est très faible.

En plus de leur pouvoir d'absorption, l'adsorption est une autre qualité supplémentaire. Les argiles peuvent, donc, gonfler au contact de l'eau et ensuite fissurer au séchage. Cependant, les argiles ne gonflent pas de la même manière, Ceci est due, essentiellement, aux dispositions divergentes des plaquettes d'argile. Dans le cas des kaolinites, les feuillets sont empilés d'une façon rigide qui empêche l'eau de pénétrer à l'intérieur des plaquettes. Au contraire, dans le cas des smectites, les feuillets sont disposés en membranes interconnectées permettant à l'eau de pénétrer et faire gonfler le réseau. Lors du séchage de ces deux argiles, à même contenance d'eau, on observe une fissuration beaucoup plus importante

dans le cas des smectites.

II.2.2 Les graviers

De dimension ($2 \text{ mm} \leq D < 64 \text{ mm}$) et les sables ($0,063 \text{ mm} \leq D < 2 \text{ mm}$) constituent les éléments grossiers de la terre à bâtir. Ils forment la structure majeure du squelette et favorisent la perméabilité à l'eau. En outre, la fraction sableuse limite le gonflement et le retrait de la terre (Houben & Guillaud, 1989).

II.2.3 Les limons

D'une granulométrie comprise entre 0,063 et 0,002 mm, les Limons possèdent une grande friction interne, une faible cohésion en présence d'eau et une grande perméabilité.

Des études sur l'usage de la terre, notamment le BTC (brique de terre comprimée), ont permis de définir des fuseaux granulaires de références qui assurent de meilleures proportions des différents constituants. Mais, certaines terres peuvent convenir malgré leur non adéquation au fuseau granulaire Figure 12. Une proportion trop importante en silt provoque après séchage de la brique un retrait trop important et qu'une proportion trop importante en grains de taille conséquente diminue les performances du BTC en raison du manque d'argile et de cohésion.

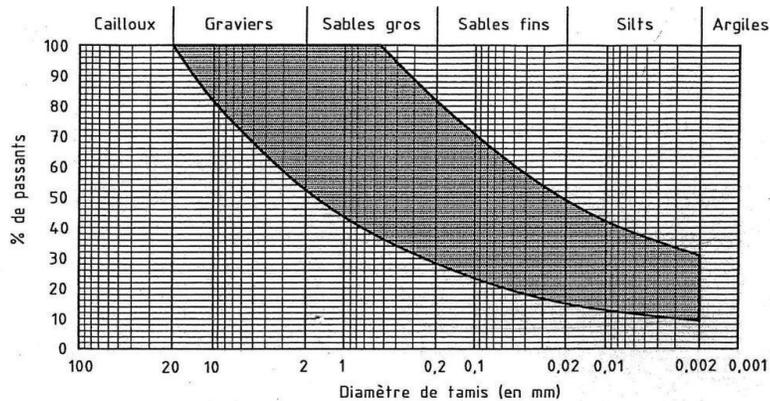


Figure 12 Fuseau Granulaire empirique (source craterre)

Ainsi, une terre contenant entre 0 et 40% de graviers, 25 et 80% de sables, 10 et 25% de silts et entre 8 et 30% d'argiles serait convenable pour la fabrication du BTC. Ces terres convenables à la réalisation de BTC sont les argiles graveleuses, les argiles sableuses et les argiles limoneuses. Ces 3 types de terre nécessitent de préférence une stabilisation, afin d'améliorer ses performances mécaniques et thermiques.

II.3 L'amélioration des caractéristiques des matériaux à base de terre par la stabilisation

II.3.1 Intérêts de la stabilisation

La stabilisation ou le renforcement de la terre en tant que matériau de construction a été pratiquée depuis l'antiquité. Par exemple, les Mésopotamiens et les Romains ont découvert séparément qu'il était possible d'améliorer la capacité des voies à transporter la circulation en mélangeant les sols faibles avec un agent stabilisant comme le calcaire pulvérisé ou le calcium.

Le matériau terre est considéré comme une combinaison de trois composants de base: gravier, sable et argiles. Il a, généralement, une faible

résistance à la traction et au cisaillement et ses caractéristiques peuvent dépendre fortement des conditions environnementales. D'autre part, le renforcement consiste à incorporer certains matériaux avec certaines propriétés souhaitées dans d'autres matériaux qui n'ont pas ces propriétés (S.Hejazi, M.Sheikhzadeh, S.Abtahi, & A.Zadhoush, 2012). En effet, le renforcement de la terre est défini comme une technique visant à améliorer les caractéristiques techniques afin de développer les paramètres tels que la résistance au cisaillement, la compressibilité, la densité; et la conductivité thermique. Enfin, l'objectif principal du renforcement est d'améliorer la stabilité, de réduire les déformations latérales, d'augmenter la capacité portante et d'améliorer les caractéristiques thermiques (H.Binici et al., 2005). La stabilisation se fait en fonction de la conception du bâtiment, de l'économie du projet, de la durabilité et de la qualité du matériau. Il existe plus d'une centaine de produits stabilisants de la terre à bâtir (Rigassi, 1995). La résistance et la durabilité des briques en terre compressées sont considérablement améliorées par l'ajout de stabilisants, à savoir: ciment, chaux, ciment plus chaux et ciment plus résine (Guettala, Abibsi, & Houari, 2006).

Les techniques de renforcement peuvent être classées en un certain nombre de catégories, voir Figure13.

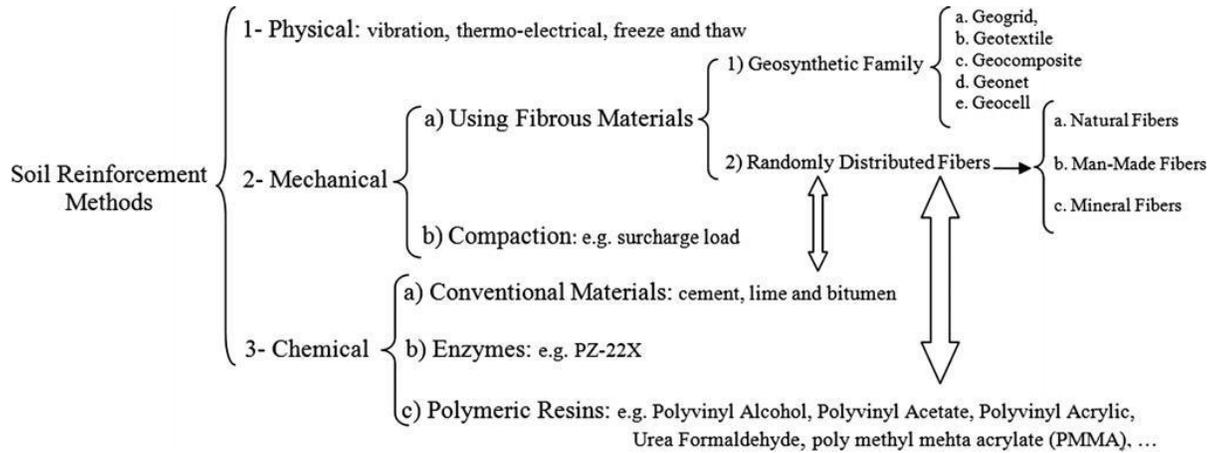


Figure 13 Différentes procédures de renforcement de la terre (S.Hejazi et al., 2012)

Les méthodes les plus pratiquées sont celles de : la densification par compression, l'ajout de fibres au mélange, l'addition de ciment ou, de chaux à la terre ou encore le mélange de la terre avec du bitume. En effet, les stabilisants ne sont donc pas toujours utiles et nécessaires ; leurs utilisations doit répondre à des besoins problématiques(H.Guillaud, T.Joffroy, & P.Odul, 1995).

MOYENS DE STABILISATION DES TERRES REMANIÉES						
STABILISANT	NATURE	PROCÉDÉ	MOYENS	PRINCIPE	SYMBOLE	
SANS APPORT DE STABILISANT		MÉCANIQUE	DENSIFIER	CRÉER UN MILIEU DENSE QUI BLOQUE LES PORES ET LES CANAUX CAPILLAIRES		
AVEC APPORT DE STABILISANT	STABILISANTS INERTES	MINÉRAUX	PHYSIQUE	ARMER	CRÉER UNE ARMATURE OMNI-DIRECTIONNELLE QUI RÉDUIT LE MOUVEMENT	
		FIBRES				
	STABILISANTS PHYSICO-CHIMIQUE	LIANTS	CHIMIQUE	ENCHAINER	CRÉER UN SQUELETTE INERTE QUI S'OPPOSE À TOUT MOUVEMENT	
				LIAISONNER	FORMER DES LIAISONS CHIMIQUES STABLES ENTRE LES CRISTAUX D'ARGILE	
		HYDRO-PHOBANTS		IMPERMÉABILISER	ENTOURER LES GRAINS DE TERRE D'UN FILM IMPERMÉABLE ET BOUCHER LES PORES ET CANAUX	
				HYDRO-FUGER	ÉLIMINER AU MAXIMUM L'ABSORPTION ET L'ADSORPTION D'EAU	

Figure 14 Procédés et principes de stabilisation source: H.Guillaud, T.Joffroy, et al. (1995)

II.3.2 Techniques de stabilisation

II.3.2.1 Stabilisation par densification

Le compactage au court de la fabrication de la brique de terre consiste à resserrer les particules composantes en réduisant le volume d'air et par conséquent augmenter la densité. Les effets du compactage effectués dans de bonne conditions, se traduit par une diminution de la perméabilité, de la compressibilité, de l'absorption d'eau et du gonflement (P.MEUKAM, 2004). Les caractéristiques mécaniques très élevées du compactage n'empêchent pas la brique de terre comprimée de rester très sensible à l'eau. L'addition du ciment au mélange permet de lier les grains en eux tout en stabilisant l'argile. On obtient une amélioration des caractéristiques

mécaniques et la sensibilité à l'eau.

La densification par compression répartie de façon homogène les pores dans la terre en modifiant leurs tailles afin de rendre le matériau plus compact et ainsi plus résistant à la compression. Souvent la terre prélevée du site ne répond pas aux conditions techniques, et présente une plasticité élevée. Une correction granulométrique est donc nécessaire par l'ajout de grains de sable. Taallah et al (B.Taalah, G, G, & K, 2014) a étudié des briques de terre stabilisés dont la granulométrie est corrigé par 30% de sable, les résultats à la compression et à la traction sont très satisfaisants.

Il est nécessaire d'adopter une énergie de compactage convenant au type de terre. Plus l'énergie de compactage est élevée, plus la teneur en eau baisse, entraînant une élévation de la masse volumique sèche, cependant une énergie trop importante provoquera le laminage des blocs en terre (H.Guillaud, T.Joffray, & P.Odul, 1995).

II.3.2.2 Stabilisation par ajout de minéraux

En cas de terre trop argileuse, l'addition de minéraux tel que : cendres volcaniques, pouzzolane ou des cendres contenant du carbone, permet de mieux contrôler les retraites et le gonflement, et d'obtenir une meilleure répartition de la porosité et de la résistance à la compression. Les proportions à ajouter sont en moyenne comprise entre 5% à 10% (Ruskulis, 1991) , il est aussi recommander d'ajouter du sable et du gravier en cas d'une terre trop plastique et argileuse, ceci réduit, en plus du retrait et du gonflement, les proportions d'autres additifs, plus coûteux, nécessaires pour une stabilisation efficace. (Ruskulis, 1991)

II.3.2.3 Stabilisation par ajout de fibres

L'ajout de fibres à la terre est une technique courante utilisée dans le monde depuis des millénaires. Les fibres permettent de :

- « empêcher la fissuration au séchage en répartissant les tensions dues au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau ;
- accélérer le séchage grâce à une évacuation de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres. Inversement, la présence de fibres végétales augmente l'absorption.
- alléger le matériau : le volume de paille est souvent très important, allégeant la masse volumique du matériau et améliorant ses propriétés d'isolation ;
- augmenter la résistance à la traction »(H.Guillaud, T.Joffroy, et al., 1995; S.Hejazi et al., 2012)

Les fibres peuvent être d'origine végétale, animale ou synthétique(S.Hejazi et al., 2012). On utilise les pailles de toutes espèces, des balles de céréales, du chanvre, des fibres de noix de coco, des fibres de palmier...etc.

Grace à l'armature des fibres ajoutées, on pourra bien avoir une augmentation de la résistance à la compression(C.Galán-Marín, C.Rivera-Gómez, & J.Petric, 2010; H.Binici et al., 2005).

L'adhérence à l'interface fibre-matrice est principalement régie par les trois facteurs suivants:

- la résistance au cisaillement du sol due à la forme de surface et à la rugosité de la fibre;
- les forces de friction de compression sur la surface de la fibre dues au retrait du sol;
- les propriétés cohésives du sol.

En effet, chacun de ces trois facteurs est affecté par des changements dimensionnels de la fibre naturelle qui peuvent survenir en raison de changements d'humidité et de température (S.Hejazi et al., 2012).

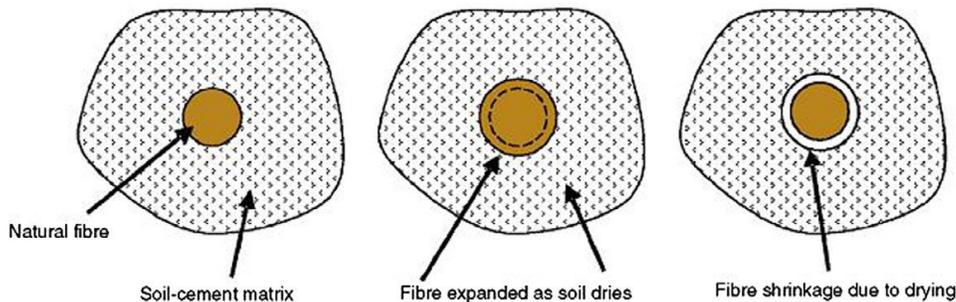


Figure 15 Schéma de l'effet de la déformation des fibres due aux changements d'humidité.

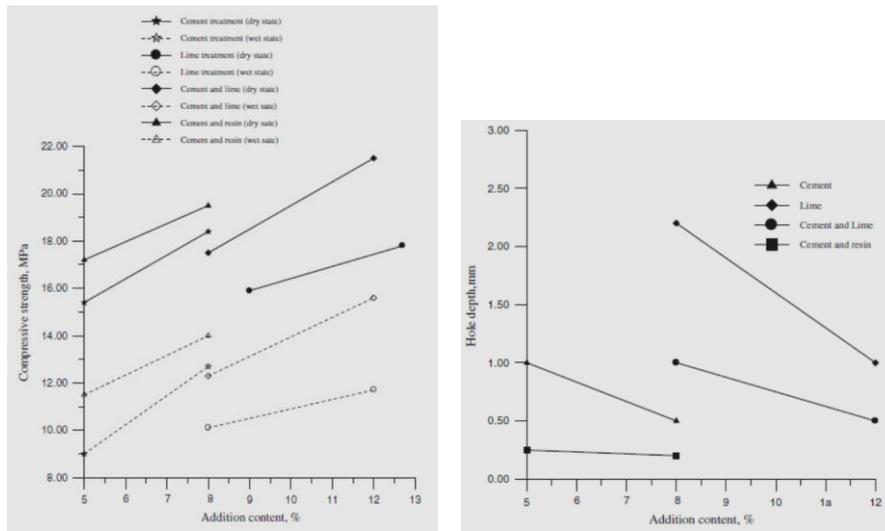
Source: S.Hejazi et al. (2012)

De plus, (Abdi, A.Parsapajouh, and Arjomand (2008) ont mentionné que l'addition de fibre de polypropylène augmente la résistance au retrait et réduit la fissuration par dessiccation des argiles. Il démontre que l'augmentation de la longueur de fibres permet de réduire le retrait d'une argile expansive.

II.3.2.4 Stabilisation chimique

La stabilisation chimique modifie les propriétés de la terre par l'addition d'adjuvant, (ex: ciment, chaux, ciment + chaux, bitume etc.). Il est reconnu que la terre est très sensible à l'eau, et afin de diminuer la sensibilité à l'eau on a souvent recours à additionner du ciment comme liant hydraulique pour rendre le matériau moins hydrophile. L'ajout du ciment permet aussi d'améliorer les caractéristiques mécaniques. (Guettala et al. (2006) ont testé la durabilité de la terre par l'addition de: ciment, chaux, (ciment+chaux) et (ciment + résine), les résultats ont montré un très bon comportement, sous compression et sous teste de jet d'eau, en conditions climatique naturelles, ou bien sous conditions de laboratoire, voir Figure16. En effet, il a été noté

que tous les murs traités n'ont montré aucun signe de détérioration sérieuse après 4 ans d'exposition dans des conditions climatiques réelles.



a)

b)

Figure 16 Effets des ajouts sur : a) la compression b) la profondeur de l'empreinte du pulvérisateur
 source : Guettala et al. (2006)

Aussi, les travaux de B.Taalah et al. (2014) montrent une diminution d'absorption d'eau en fonction du taux de stabilisation en ciment, voir Figure 17.

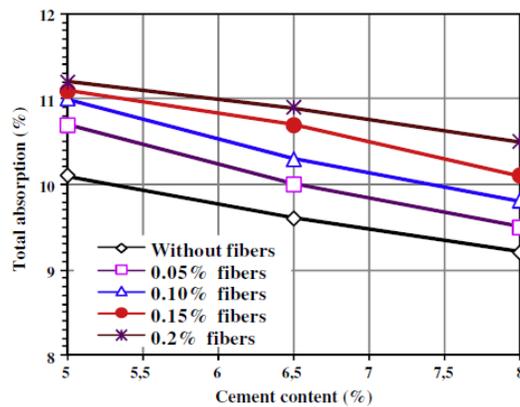


Figure 17 Effet de la variation de la teneur en ciment et de la teneur en fibres sur l'absorption totale d'eau après une journée d'immersion source : B.Taalah et al. (2014)

II.3.3 L'amélioration des caractéristiques des matériaux à base de terre par les fibres végétales

A l'heure où l'on prend conscience de l'épuisement des ressources renouvelables, du ressort de la planète, le recours aux matériaux biosourcés s'avère inéluctable. C'est la raison pour laquelle de nombreuses recherches expérimentales ont été menées, et que les applications potentielles des fibres naturelles pour le renforcement de matériaux à base de terres ont suscité beaucoup d'intérêt au cours des dernières années.

Il est nécessaire de mentionner que les fibres naturelles sont utilisées depuis longtemps dans de nombreux pays en voie de développement dans les composites de ciment et les blocs de terre en raison de leur disponibilité et de leur faible coût.

II.3.3.1 Influence de l'addition des fibres végétales sur les résistances mécaniques des matériaux en terre

Sayyed Mahdi Hejazi et al (S.Hejazi et al., 2012) a rapporté que la résistance et la rigidité de la terre sont améliorés par l'addition de fibres. La distribution aléatoire des fibres offre une isotropie de la force et limite les plans de faiblesse potentiels qui peuvent se développer parallèlement au renforcement orienté.

De plus, l'addition de fibres naturelles à la terre améliore ses caractéristiques thermo physique. L'étude menée par H.Binici et al (H.Binici, O.Aksogan, M.Bodur, E.Akca, & S.Kapur, 2006) montre que les briques de terre renforcées en fibres gardent les températures intérieures stationnaires en été comme en l'hiver, contrairement aux briques standards (parpaings).

La résistance peut être élevée en ajoutant des fibres naturelles, là où elle

peut améliorer la ductilité en tension. Cependant, l'amélioration consiste à retarder la propagation de la fissure de traction après la formation initiale ainsi que la fissuration par rétraction (A.Mesbah, J.C.Morel, P.Walker, & Kh.Ghavami, 2004).

A. Laborel-Préneron et al (Laborel-Preneron, Aubert, Magniont, Tribout, & Bertron, 2016) a rapporté que plusieurs études révèlent la fragilité des blocs de terre, renforcé par fibres végétales, à la traction. L'ajout de 0.2% d'huile de fibre de palmier entraîne une diminution de la résistance à la traction de 20% ; Cela pourrait être attribué à l'hétérogénéité du matériau, la fragilité et la faible résistance à la traction de la fibre, comme elle pourrait aussi s'expliquer par la diminution de la matrice minérale lorsqu'elle a été remplacée par de la sciure de bois ou par la faiblesse de l'adhésion entre les fibres et la matrice. En revanche, certaines études montrent que l'addition des fibres végétales améliore la résistance à la traction et à la flexion. La résistance à la traction est améliorée de 30% à l'ajout de 1% de fibre de paille de blé (Mohamed, 2013). Aussi, la résistance à la compression est améliorée de 37% en ajoutant 25% de laine de moutons (C.Galán-Marín et al., 2010). De plus, la ductilité a également été amélioré avec l'ajout de fibres, capables de s'auto-déformer, particulièrement lorsque leur longueur est élevée (Y.Millogo, J.C.Morel, Aubert, & K.Ghavami, 2013). En fin, les blocs renforcés par des fibres végétales pouvaient stocker de l'énergie élastique et pouvaient être plus résistants à la propagation des fissures, une propriété intéressante en cas de séismes.

En outre, P.Meukam et al (P.MEUKAM, 2004) démontre bien que la présence des fibres de bois dans la terre renforce les propriétés mécaniques des briques, notamment la résistance à la compression.

Les résultats d'une étude menée par Taallah et al (B.Taalal et al., 2014)

pour explorer les propriétés mécaniques et physiques des briques de terre stabilisées à la chaux vive et renforcées de fibres de palmier dattier. Les fibres ont subi un traitement chimique par une solution alcaline afin d'améliorer la liaison fibre/ matrice. L'étude indique que les valeurs de résistance des briques de terre stabilisées renforcées de fibres traitées par alcalines, soient légèrement supérieures à celles des fibres non traitées. Le traitement de surface des fibres n'a pas entraîné d'amélioration de l'adhésion fibre-matrice, entraînant un effet contraire sur les blocs.

Quagliarini (E.Quagliarini & S.Lenci, 2010), dans son étude sur l'influence des fibres et des stabilisateurs naturels sur les caractéristiques physiques de l'ancienne brique romaine démontre que l'addition de fibres paille dans une brique d'adobe romaine permet de prévenir les fissures lors du séchage et diminue le retrait après séchage.

II.3.3.2 Influence de l'addition des fibres végétales sur les caractéristiques thermo-physique de la terre

Dans une étude de caractérisation du BTS (brique de terre stabilisées), P.Meukam et al (P.MEUKAM, 2004) a déduit que l'incorporation de la sciure de bois permet nettement de valoriser l'utilisation du BTS et présente de meilleures performances en matière d'isolation, par contre elles sont plus hygroscopiques et leur utilisation en zone tropicale et sec est conseillée.

Aussi, une nette amélioration de la conductivité thermique, en fonction des taux de fibres de palmier dattier additionnées aux briques de terre, est rapportée dans les travaux de Taallah et al et H.Chaib et al (B.Taallah & A.Guettala, 2016; H.CHAIB, A.KRIKER, & A.MEKHERMECHE, 2015) par rapport au briques non renforcées. Par ailleurs, Taallah et al (B.Taallah & A.Guettala, 2016) a expliqué que l'utilisation de fibres de palmier dattier conduit non seulement à une réduction de la conductivité thermique mais

aussi à la diminution de la densité apparente et l'augmentation de l'absorption capillaire des blocs. En revanche, le traitement des fibres de palmier dattier par l'alcaline à un effet contraire sur la conductivité thermique du matériau expérimenté.

Même en climat tempéré, cas de l'Angleterre, l'addition de fibres de paille à la terre a donné des résultats thermo physiques (conductivité thermique et diffusivité thermique) en conformité à la Norme Anglaise (S.Goodhewa & R.Griffithsb, 2005).

De plus, des mixtures, terre-paille, ayant des densités inférieures à 450kg/m³ présentaient une capacité de sorption et une perméabilité à la vapeur d'eau très élevées. Ces mêmes mixtures ont un effet, moisture buffer vapour (MBV), équivalent à celui du béton chanvre très élevé par rapport aux matériaux conventionnels.

T.Ashour et al (T.Ashour, A.Korjenic, & S.Korjenic, 2015), dans une étude visant à déterminer la teneur en humidité des blocs de terre, renforcés par des fibres végétales (pailles d'orge et de blé), traitées simultanément à deux variables, températures (10- 40°C) et humidités (33%, 95%), l'effet de l'humidité relative est très prononcé par rapport à celui de la température et de l'humidité interne du matériau terre quel que soit la nature des fibres de renforcement inférieurs à 7% pour tous les matériaux, ce qui montre l'importance et l'utilité de revêtir les bâtiments de bottes de pailles afin de les protéger contre les conditions climatiques humides et très critiques.

II.3.3.3 Influence de l'ajout de fibre végétale sur les caractéristiques hygrothermiques du matériau à base de Terre

On note bien que les propriétés hygrothermiques, de matériaux à base de terre sont très peu étudiés.

On retrouve sur le travail mené par (Liuzzi et al. (2018) que l'ajout de fibres

d'olives dans la matrice de terre a entraîné une réduction linéaire de la densité et une augmentation de la porosité. Par conséquent, une réduction de la conductivité thermique est donc un comportement plus isolant du matériau. Les résultats ont montrés aussi, en termes de (MBV), que toutes les mixtures testées permettent d'obtenir une bonne capacité d'échanger de l'humidité avec l'environnement avoisinant voir figure18. Cette performance a des conséquences positives sur la qualité de l'air intérieur et le confort des occupants. En fin, Les propriétés hygrothermiques sont concordantes avec celles d'autres enduits biosourcés de densité similaire.

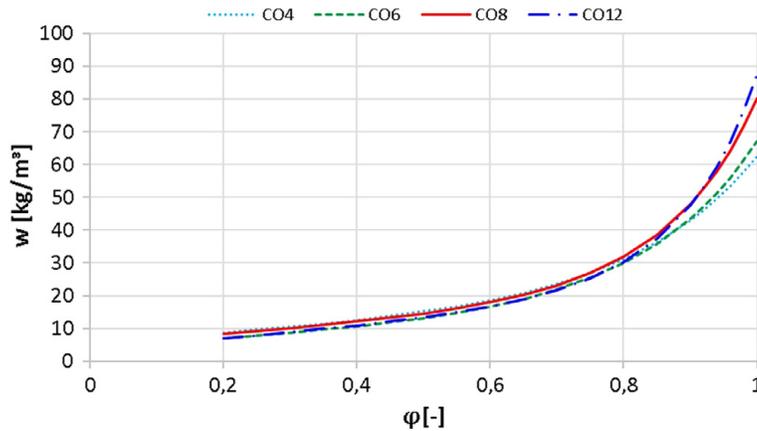


Figure 18 Courbes de sorption de différentes mixtures source :Liuzzi et al. (2018)

Dans le cas du mélange de paille et de terre, qui contenait beaucoup plus de granulats végétaux et était plus léger (350 kg/m^3), Oudhof, Labat, Magniont, and Nicot (2015) a trouvé le facteur de résistance à la vapeur d'eau plus faible: environ 3 avec méthode humide et environ 5 avec la méthode sèche. Ceci explique que sa faible conductivité thermique, sa capacité élevée de sorption de la vapeur d'eau et sa perméabilité élevée à la vapeur d'eau rendent le matériau terre-paille idéale aussi bien pour la construction neuve que pour la rénovation fins (Oudhof et al., 2015).

Selon F.Aymerich, L.Fenu, and P.Meloni (2012), en ajoutant des fibres végétales aux matériaux, à base de terre, peut offrir des niveaux de confort thermique très élevés en raison de leurs taux élevés d'absorption/ désorption d'humidité, de leurs capacités de stockage de chaleur, et de leurs propriétés de transmission du son. Comme il est important à souligner que les fibres sont renouvelables et qu'elles ont un cycle de vie durable.

II.3.4 Influence du compactage sur la résistance mécanique du matériau à base de terre

Trois types de compaction sont étudiés :

- La compaction dynamique : elle peut être comparée dans le domaine du génie civil au pilonnage d'un sol par une importante masse afin d'obtenir de meilleures performances.
- La compression statique : compaction du sol progressive et sans coup comme les rouleaux utilisés dans la construction routière,
- La vibro-compaction : insertion de matière par vibration et compression de celle-ci dans un moule.
- La compression dynamique d'un sol permet d'augmenter ses résistances à la compression. R.Bahar, M.Benazzoug, and S.Kenai (2004) ont conclu que la compression dynamique des terres permet d'avoir une résistance plus importante de 50% par rapport à la vibro-compression et de 20% par rapport à la compression statique. L'augmentation de l'énergie de compaction, quel que soit le mode de compaction permet d'augmenter la résistance en compression du sol.

De plus, plus l'énergie de compaction n'est importante, moins le besoin en

eau est important pour permettre à la matière de se mettre correctement en place car le besoin en eau est liée à la lubrification des grains. De ce fait, les résistances à la compression des éprouvettes de terre sont plus importantes (H.Guillaud, T.Joffray, et al., 1995).

La mode de compactage affecte considérablement la résistance à la compression du matériau. (Guettala et al. (2006) ont conclu qu'en augmentant la contrainte de compactage de 5 à 20 MPa, cela améliorerait la résistance à la compression jusqu'à 70%.

II.3.5 L'effet de l'ajout de ciment sur les performances mécaniques et thermo-physique du matériau à base de terre

II.3.5.1 La résistance à la compression

Apparemment, la résistance à la compression est le paramètre, universellement reconnu pour déterminer la qualité des briques. Néanmoins, il est étroitement lié aux types de terre utilisé et à la teneur en stabilisants. Les facteurs influant sur la résistance des briques de terre stabilisées sont la teneur en ciment, les types de terre (indice de plasticité), la pression de compactage et les types de compactage. Aussi, la teneur optimale en ciment pour la stabilisation est de l'ordre de 5% à 10% où une addition supérieure à 10% affectera la résistance des briques de manière négative (F.V.Riza, I.A.Rahman, & Zaidi, 2011), et l'indice de plasticité de la terre argileuse est généralement compris entre 15 et 25.

Une terre stabilisée chimiquement à 8% de ciment peut avoir de meilleures résistances à la compression même après 48 h d'immersion dans l'eau (R.Bahar et al., 2004).

B.Taalah et al. (2014) ont montré que la résistance à la compression est en fonction du taux de ciment contenu dans la mixture. Cependant les briques

de 8% de ciment sont plus performantes que celles à 5% et 6.5%.

Par ailleurs, le mode de compactage affecte, considérablement, la résistance à la compression de la brique de terre. Les résultats des travaux de R.Bahar et al. (2004) ont conclu qu'en utilisant l'énergie de compactage dynamique, la résistance à la compression sèche augmente de plus de 50% mais pour le compactage vibro-statique augmente légèrement d'environ 5%. De plus, R.Bahar et al. (2004), ont ajouté que l'effet de l'âge de durcissement sur la résistance à la compression est important. En effet, la résistance à la compression relative obtenue, après 7 jours de durcissement, était d'environ 70% moins que celle obtenue après 21 ou 28 jours de durcissement, et ce avec de 10% de teneur en ciment. En revanche, la résistance à la compression, avec 12%, 15% et 20% de teneur en ciment, après 21 jours et 28 jours ne sont que 50% plus élevées que ceux à 7 jours.

Ceci explique, qu'une teneur en ciment supérieure à 10% nécessite une période de durcissement de 21 à 28 jours pour que la résistance complète puisse être développée.

De plus, la densité apparente et la porosité sont des paramètres très influents sur la résistance à la compression. M.Ben Mansour, A.Jelidi, Cherif, and Jabrallah (2016) montrent que pour la brique de terre comprimée (CEB) à haute densité apparente, la résistance à la compression

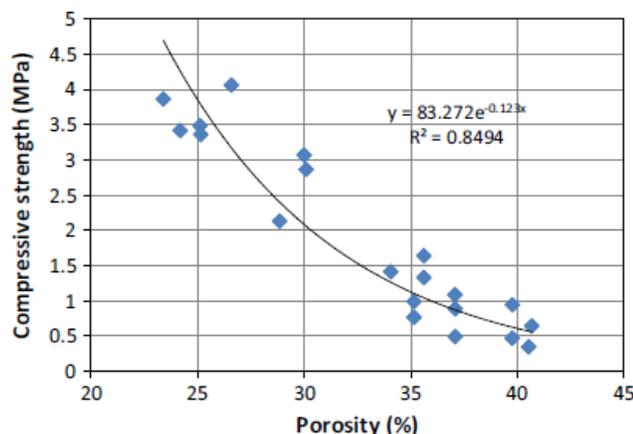


Figure 19 Influence de la porosité sur la résistance à la compression, source M.Ben Mansour, A.Jelidi, Cherif, and Jabrallah (2016)

est supérieur à 3 MPa, et elle peut atteindre une valeur de 4 MPa, pour une densité plus élevée. Par ailleurs, la Figure 19 montre aussi une nette influence de la porosité sur la résistance à la compression. Même si la brique de terre est sensible à l'humidité, (A.Heath, M.Lawrence, P.Walker, and C.Fourie (2009) ont conduits des tests sur des échantillons en murs, de brique de terre cuite extrudées, les changements d'humidité relative ne produisent pas de réduction significative de la résistance à la compression. Plutôt, c'est la teneur en argile qui joue un grand rôle dans la définition de la résistance à la compression des matériaux. La baisse de la résistance à la compression, enregistrée, avec l'augmentation de la teneur en humidité est similaire aux différents matériaux. Ces baisses de valeurs des résistances ne sont pas susceptibles de causer des problèmes dans des conditions normales d'utilisation, même à humidité relative élevée.

Bien que le matériau en terre soit sensible à l'humidité, (A.Heath et al. (2009) ont montré que les changements d'humidité relative n'affectent pas la résistance à la compression. Dans des conditions normales, la résistance à la compression de la maçonnerie en terre peut même être supérieure au minimum spécifié pour les éléments de maçonnerie en béton porteurs de 100 mm d'épaisseur dans la construction de maisons individuelles au Royaume-Uni.

II.3.5.2 Propriétés thermiques

Les blocs de terre comprimée (CEB) ont, généralement, une conductivité thermique relativement élevée d'environ $1,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. avec une densité apparente d'environ 1800 et 2100 kg. m^{-3} . Toutefois, pour améliorer ses caractéristiques thermiques, une étude expérimentale menée par (Mohamed Ben Mansour, Jelidi, Cherif, Jabrallah, and Materials

(2016), ont opté d'agir sur la pression de compactage, donc sur la masse volumique apparente et de ses effets sur leurs performances thermiques (conductivité thermique et effusivité thermique) et mécaniques (résistance à la compression et module d'élasticité). Les résultats montrent que la densité apparente a une forte influence sur le comportement thermique et mécanique du CEB. La diminution de la densité apparente des CEB s'est accompagnée d'une réduction significative de leur conductivité thermique et de leur effusivité thermique. Par ailleurs, l'optimisation de la densité apparente du CEB permet d'atteindre un double objectif de réduction de la conductivité thermique et de fournir une résistance mécanique à la compression suffisante.

En effet, les valeurs de la conductivité thermique sont comprises entre $0.618 \text{ W.m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et $1.1 \text{ W.m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ pour des densités respectives: 1610 kg/m^3 et 2194 kg/m^3 . On en déduit aussi, que malgré une diminution de l'effusivité thermique et de l'inertie thermique du matériau, les briques (CEB) légères ont une capacité globale d'isolation thermique supérieure à celles des CEB classiques. Les excellentes propriétés isolantes de ces matériaux sont dues au déphasage thermique causé par une faible diffusivité thermique et une faible conductivité thermique.

Pour comprendre le rôle des paramètres: minéralogie, tailles des pores et la densité apparente, sur la conductivité thermique. (M.Dondi et al. (2004) a mené une importante investigation dont les résultats sont :

- La dépendance de la conductivité thermique à la masse volumique apparente n'est pas toujours très évidente et que ce dernier paramètre seul n'est pas capable de décrire et de comprendre avec précision le comportement thermique des briques d'argile.

- Le rôle joué par certains composants minéralogiques, en particulier les silicates riches en Ca, le quartz et l'amorphe, dans la dépréciation des propriétés isolantes des briques de terre.
- Le rôle de la porosité ouverte dans l'amélioration des performances thermiques des briques est prédominant.

Dans une étude de caractérisation des propriétés hygrothermiques des briques de terre, (H.Cagnon et al. (2014), ont montré que les valeurs de la conductivité thermique peuvent être en rapport avec la direction des plaquettes argiles, perpendiculaire et parallèle au sens de l'extrusion. Ce qui est à retenir dans cette étude de caractérisation, l'effusivité élevée est un paramètre déterminant qui résulte de sa densité combinée à la capacité thermique élevée et à une conductivité thermique limitée. En fin, une forte inertie thermique améliorera le comportement thermique des enveloppes en terre (confort et économies d'énergie).

La conductivité thermique et la chaleur spécifique du matériau sont très sensibles à l'humidité relative ambiante, (F.El Fgaier et al. (2016) ont confirmé qu'une augmentation de l'humidité relative conduit à une conductivité thermique accrue et à une capacité thermique spécifique. Cette augmentation s'explique par le fait que l'air dans les pores des matériaux en terre est remplacé par de la vapeur d'eau, qui a une conductivité et capacité calorifique spécifique supérieure à celle de l'air.

Le comportement hygroscopique de la terre a le potentiel d'amortissement passif des fluctuations d'humidité relative dans les applications bâtiment. En effet, (H.Cagnon et al. (2014) et (Faycal El Fgaier (2013) ont conclu que les briques de terre compressées présentent une plus grande capacité d'adsorption à stabiliser l'humidité relative intérieure. Toutes fois , les propriétés minéralogiques de la terre ont aussi

un impact sur la capacité hygroscopique des matériaux en terre(H.Cagnon et al., 2014).

II.3.6 L'inertie thermique, une caractéristique de la terre à assurer le confort hygrothermique

Le confort thermique dépend des températures d'air et de surface, de l'humidité, des mouvements d'air interne (liés aux systèmes de chauffage ou climatisation) ainsi que du type d'activité dans l'espace intérieur. L'enveloppe agit principalement sur le confort thermique via les températures de surface. Ces dernières doivent être les plus homogènes possibles dans l'espace et dans le temps. De plus, en maîtrisant les échanges thermiques entre les environnements intérieur et extérieur, l'enveloppe agit également sur la température d'air intérieur.

L'inertie thermique d'une enveloppe est la capacité d'un matériau à emmagasiner une certaine quantité de chaleur. Elle est principalement influencée par la densité et la chaleur spécifique du matériau. C'est un critère de choix très important. Une bonne inertie de l'enveloppe permet de limiter l'influence de l'environnement extérieur sur l'intérieur, dans le temps, et permet aussi d'amortir et déphaser les ondes de température.

Toutefois, le stockage / déstockage de l'énergie est en rapport avec la conductivité thermique. Ainsi, un matériau lourd à forte chaleur spécifique ne pourra stocker de chaleur que s'il est en plus bon conducteur (X.Faure, 2007). En effet, l'effusivité thermique représente cette capacité à utiliser la masse thermique. De la même manière, il est intéressant de définir la capacité d'un matériau à se chauffer rapidement : c'est la diffusivité thermique, donnée par ces deux grandeurs permettent de définir la quantité

de chaleur stockée ainsi que la profondeur de pénétration de l'onde de chaleur dans le matériau pour une sollicitation donnée (X.Faure, 2007). Grâce à la faible diffusivité thermique de la terre (vitesse de transmission de la chaleur, exprimant par conséquent le temps de déphasage thermique à travers la paroi : plus elle est faible, plus la chaleur met du temps à traverser l'épaisseur du matériau) qui offre l'avantage d'un amortissement et d'un déphasage important des variations et des apports thermiques externes. Cependant le pouvoir de stockage doit être soigneusement dimensionné pour permettre une restitution des quantités de chaleur dans des temps adéquats.

Du point de vue hygrothermique la terre possède d'autres caractéristiques thermo physiques intéressantes qui lui permettent de contribuer efficacement au confort thermique des occupants d'un bâtiment. Sa capacité d'absorption de la vapeur d'eau, explique d'ailleurs, la variabilité de sa conductivité thermique en fonction de sa teneur en eau. Le coefficient de la conductivité thermique d'un mur en terre non stabilisé peut varier du simple au double en fonction des conditions climatiques pour une variation de la teneur en eau de 1 à 7% (AUBERT, 2013).

La terre crue, grâce aux argiles qu'elle contient, possède en effet un grand pouvoir absorbant qui lui permet de s'imprégner de la vapeur d'eau jusqu'à ce qu'un équilibre hygroscopique s'établisse entre le matériau et l'air ambiant. Une brique de terre crue peut ainsi capter 3 % de son poids en vapeur d'eau, soit jusqu'à 13,2 kg d'eau absorbés par 1 m² de mur de 22 cm d'épaisseur. La vapeur d'eau est ensuite restituée dans la pièce lorsque l'humidité relative diminue (AUBERT, 2013). Cet échange dynamique permet de maintenir une hygrométrie quasi constante autour de la zone de confort optimale de 40-50 % d'humidité relative de l'air (à 20-22 °C).

Evrard et De Herde, rapporté par (Dalel Medjelekh (2015), ont conclu par simulation que l'enveloppe en terre crue a un déphasage atteignant 12h et des amortissement thermique très élevées de l'ordre de 92% .

II.4 Physique des transferts hygrothermiques dans les matériaux hygroscopiques

La plupart des matériaux de construction sont hygroscopique, et la terre en fait partie. Elle est aussi appelée « matériau à changement de phase ». Elle absorbe de l'énergie et la restitue, selon les conditions environnementales. En quelque sorte, elle exploite le changement d'état de l'eau comme mode de transfert d'énergie propre et infiniment renouvelable afin de nous procurer confort et climatisation. Cet échange d'énergie n'est possible que grâce à un réseau de canaux du matériau terre reliant l'extérieur et les petits pores capillaires présents entre les feuillets d'argile.

Une synthèse des mécanismes de stockage et de transfert de la chaleur et de l'humidité dans les matériaux hygroscopiques, ainsi que les lois physiques régissant ces phénomènes sont présentés dans ce qui suit.

II.4.1 Comportement hygroscopique

La température et la teneur en eau sont les paramètres d'où dépend essentiellement l'activité de l'eau dans un matériau. La teneur en eau particulière pour laquelle les parois des structures cellulaires sont saturés sans présence d'eau libre est appelée point de saturation ce point permet de définir deux domaines. Au-dessous de ce point le matériau n'a pas de comportement hygroscopique, alors qu'en deçà il existe une relation entre le quantité d'eau et la pression partielle de vapeur d'eau. Le matériau est dit à comportement hygroscopique.

II.4.1.1 Matériau hygroscopique :

On appelle matériau hygroscopique tout matériau capable de stocker et déstocker de l'eau sous forme liquide dans ses pores. Ainsi, selon le taux d'humidité, une quantité de vapeur d'eau s'y condense ou une quantité d'eau liquide s'y évapore.

Les matériaux de construction biosourcés appelés souvent bétons végétaux sont des milieux hétérogènes de nature poreuse. En effet, la matrice compactée formée des particules de végétaux et des grains minéraux constitue la phase solide du milieu. Les pores constituant la phase fluide du milieu peuvent être remplis d'une ou plusieurs phases fluides (liquide, vapeur, gaz) qui sont susceptibles d'échanger entre elles et avec la matrice solide de la matière et de l'énergie.

II.4.1.2 Sorption et désorption

Dans un milieu poreux, l'eau peut se stocker sous différentes formes pour une condition d'humidité relative donnée. L'eau contenue dans le matériau poreux dépend de la température et de l'humidité relative de l'environnement dans lequel il se situe. Lorsque le matériau est exposé à des humidités relatives croissantes, sa teneur en eau augmente : il s'agit du phénomène d'adsorption. A l'inverse, si les humidités relatives diminuent, sa teneur en eau diminue également : il s'agit du phénomène de désorption. Au chemin inverse de la sorption, en imposant à l'échantillon une série d'équilibres thermodynamiques décroissants en humidité relative, on constate que le matériau s'équilibre à des teneurs en eau plus élevées qu'en adsorption, à humidité relative égale ; c'est le phénomène d'hystérésis. Autrement expliqué, sur tout le domaine d'humidité relative, une hystérésis

entre adsorption et désorption sera présente, traduisant le fait qu'il est plus facile de fixer des molécules d'eau dans le réseau poreux plutôt que de les arracher, et ce, du fait des forces capillaires.

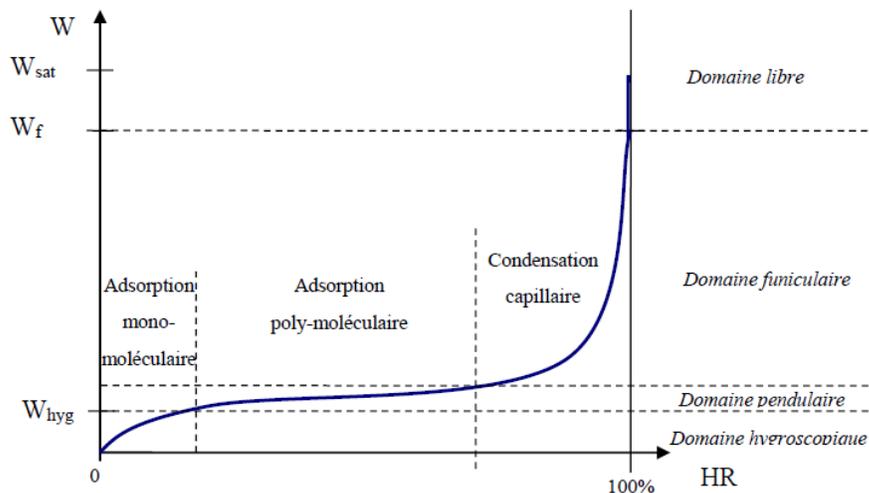


Figure 20 allure générale d'une isotherme de sorption source: Lelièvre (2015)

En effet, l'isotherme de sorption caractérise la capacité du matériau à stocker de l'eau sous l'effet d'une variation d'humidité relative.

Une isotherme de sorption est délimitée en quatre zones, voir Figure 20 :

- Le domaine hygroscopique, où l'eau est liée aux parois par les forces d'adsorption mono-moléculaire. La teneur en eau hygroscopique W_{hyg} correspond à la teneur en eau où toute la surface des pores est recouverte d'une couche mono-moléculaire d'eau.
- Le domaine pendulaire, où l'eau est liée aux parois par les forces d'adsorption poly-moléculaire.
- Le domaine funiculaire, où l'eau forme des capillaires entre les parois des pores. La teneur en eau de saturation libre W_f correspond à la teneur en eau pour laquelle l'humidité relative vaut 100%, soit

une pression de vapeur du matériau égale à la pression de vapeur saturante.

- Le domaine libre, où l'humidité relative est considérée comme constante égale à 100%, et la teneur en eau augmente jusqu'à atteindre sa valeur de saturation W_{sat}

II.4.1.3 Mécanismes de transfert de l'humidité

Dans un matériau poreux, l'humidité transite sous différentes manières et de diverses modes selon la force motrice qui commande le mode de transfert. En effet, l'humidité peut exister au sein des pores sous forme de: liquide ou vapeur d'eau. Ainsi on distingue deux types de diffusions de cette quantité de matière: diffusion de vapeur d'eau et diffusion d'eau liquide.

Le Tableau1 résume les principaux mécanismes du transfert d'humidité (vapeur et liquide) pouvant-être engendrés dans les composants du bâtiment [Künzel, 1995]. Le rôle de chacun de ces modes de transfert dépend particulièrement des propriétés du matériau (porosité, morphologies des pores, nature chimique des composés,..), des conditions climatiques dans lequel il est placé (pression et température) et enfin de la nature de la phase liquide ou vapeur.

Tableau 1 Différents mécanismes de transport de l'humidité

Mécanisme de transport d'humidité		Forces motrices
Transport de vapeur	Diffusion de vapeur	Pression de vapeur
	Transport moléculaire	Pression de vapeur
	Advection	Pression totale
Transport de liquide	Migration capillaire	Succion capillaire
	Migration d'eau liée	Teneur en eau
	Flux gravitationnel	Gravité
	Flux hydraulique	Différence de pression
	Electro kinésie	totale. Champs électriques
	osmose	Concentration ioniques

1. Transport de vapeur d'eau

Il est évident que le mécanisme de transport de fluide dans les matériaux poreux n'est pas simplement défini par sa classification de domaine. Une fois que le fluide est entré dans le milieu poreux, les conditions intrinsèques du réseau de pores détermineront :

- la phase fluide,
- son ou ses mécanismes de transport associés.

Ainsi, l'humidité hygroscopique absorbée (en vapeur) sera adsorbée par les surfaces internes, se condensera ou se diffusera. L'humidité capillaire absorbée (en liquide) s'écoulera ou se vaporisera. Les propriétés intrinsèques qui déterminent ces conditions comprennent le rayon des pores, la géométrie des pores, la charge de surface et la température de surface (M.Hall & D.Allinson, 2009).

La vapeur d'eau peut pénétrer dans les matériaux poreux par les ouvertures de pores à la surface et l'eau liquide à l'intérieur du matériau

peut s'évaporer. Le squelette granulaire du matériau réduit la section transversale disponible d'air pour la diffusion de la vapeur et la connectivité spatiale complexe des espaces poreux augmente les longueurs de trajet, offrant une résistance supplémentaire. Pour les pores de plus petit diamètre, le libre parcours moléculaire moyen des molécules de vapeur d'eau s'approche ou dépasse le diamètre des pores. Dans ce cas, les collisions de la paroi des pores et les forces de van der Waals entre la vapeur d'eau et la surface des pores dominent le mouvement moléculaire, c'est-à-dire diffusion Knudsen. En outre, les molécules de vapeur d'eau qui sont adsorbées sur les parois des pores à l'intérieur du matériau, soit en une seule couche, soit en plusieurs couches, peuvent se déplacer le long de la surface par diffusion de surface. Ces phénomènes sont illustrés sur la figure 21.

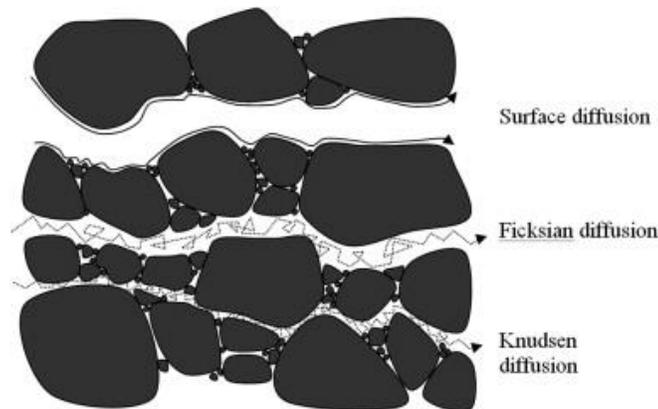


Figure 21 Schéma des modes des diffusions de la vapeur d'eau.

Source :M.Hall and D.Allinson (2009)

II.4.1.4 Lois de transferts thermique et hydrique

Le transit de l'humidité dans les milieux poreux et sa dépendance avec ses caractéristiques doivent prendre en considération les phénomènes dus à

l'humidité, à la distribution de la pression et la température et leur couplage. L'expérience montre que la diffusion, la capillarité et l'évaporation/ la condensation sont l'ensemble des mécanismes dans le processus du transfert de masse.

Le transfert thermique (chaleur) dans les matériaux de construction s'effectue sous quatre formes : conduction, convection, rayonnement et changement de phase.

$$\varphi_M = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

$$\varphi_T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

Les lois fondamentales qui régissent le transfert par diffusion (Fourier pour la chaleur, ou Fick et Darcy pour la masse) traduit le fait que le flux est proportionnel au gradient d'un potentiel moteur qui peut être choisi parmi différentes grandeurs physiques en fonction du modèle adopté. Le modèle de diffusion qui a attiré l'attention des chercheurs est celui utilisé dans WUFI (Künzel, 1995)(D.MEDJELEKH, 2015). Les équations couplées utilisées ont comme potentiels de diffusion :

- Thermique : température
- Hydrique : la pression de vapeur, par le biais de l'humidité relative

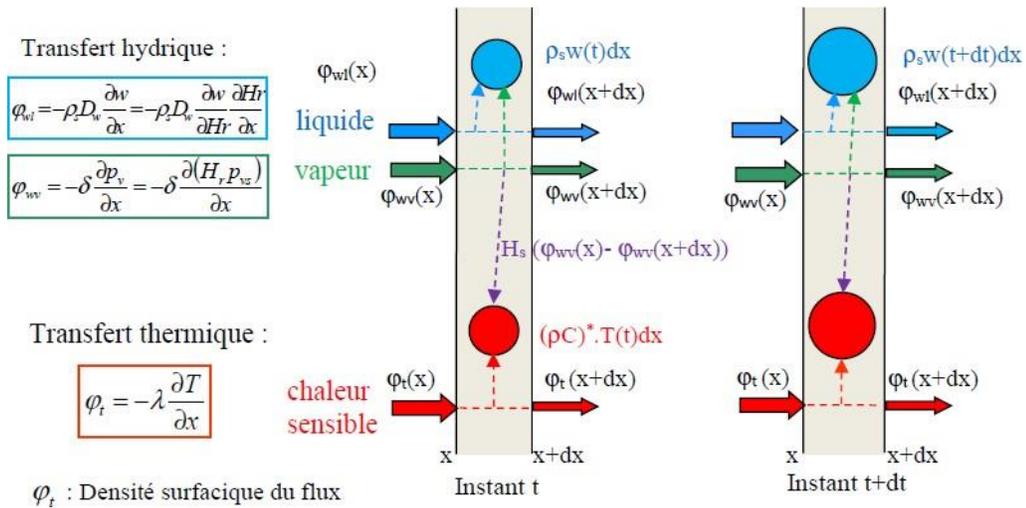


Figure 22 Schéma des bilans thermique et hydrique source :D.MEDJELEKH (2015)

La figure.22 schématise les différents modes de transferts et de stockage : thermique et massique sous forme liquide et vapeur, ainsi que les interactions entre elles.

En fin, nous déduisons que les diverses propriétés, telles que le coefficient de diffusion liquide, la perméabilité à la vapeur, la capacité hydrique et le coefficient d'échange hydrique superficiel sont des paramètres qui agissent directement sur les modes d'échange hydrique dans un matériau en conditions isothermes.

II.5 Le Palmier Dattier

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) est l'un des arbres fruitiers le plus anciennement cultivé au le monde. Il est rustique s'adaptant aux régions les plus arides du monde et constitue la principale source de vie de la population saharienne. Cette espèce qui se trouve principalement dans la région afro-asiatique est une composante essentielle de l'écosystème oasien

grâce à son adaptation aux conditions climatiques, la haute valeur nutritive de ses fruits et les multiples utilisations de ses produits. Le Phoenix est une plante dioïque, on en trouve donc deux organismes avec des palmiers mâles et femelles. Beaucoup d'auteurs considèrent le palmier dattier comme source de matières premières pour des applications industrielles (B.Agoudjile, A.Benchabane, A.Boudenne, L.Ibos, & M.Fois, 2011).

On distingue dans la littérature cinq parties du bois de palmier, il s'agit des folioles, du rachis, du bois de tronc, de pétioles et de la grappe

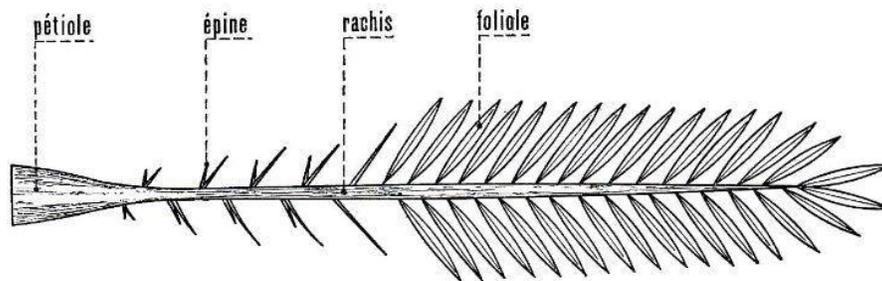


Figure 23 Schéma d'une palme de palmier dattier source : (N.BENMANSOUR, 2011).

II.5.1 Ressource En Palmiers Dattier

Il existe environ 100 millions de palmier dattier dans le monde (Mehdi Jonoobi, 2019). Les palmes sèches et fraîches sont découpées chaque année. Une estimation annuelle des palmes découpées est évaluée à 1.130.000 tonnes (B.Agoudjile et al., 2011; Chehma & Longo, 2001). En Algérie, le nombre de palmier dattier est estimé à plus de 13 millions arbres avec plus de 800 variétés. Le tonnage de la partie consommable des palmes sèches est environ de 1.35.103 tonnes de palmes sèches/an, les pédicelles de dattes est environ de 5103 tonnes de pédicelles par an, avec 67500 tonnes de rebuts de dattes (Chehma & Longo, 2001).

Le palmier dattier a une structure fibreuse, possédant cinq types de fibre:

- Fibres de bois de tronc
- Fibres de feuilles au niveau des pédoncules.
- Fibres de tige au niveau des tiges des pédoncules et du support dattier (grappe).
- Fibres de surface autour de son tronc ou de bases de palmes (pétiole).
- Fibres de liffe (entre les kornaf, le tronc est recouvert d'une bourre fibreuse que l'on appelle le liffe).

II.5.2 Propriétés mécaniques de la fibre de palmier dattier

Le bois de palmier dattier a fait l'objet de nombreuses études permettant de caractériser ses propriétés mécaniques, thermiques et de chercher la possibilité de l'incorporation dans les matrices cimentaires ou argileuses afin d'obtenir des composites adaptés aux applications de construction et de l'isolation. La majorité de ces travaux sont porté sur la caractérisation mécanique.

Dans une étude des caractéristiques mécaniques des fibres de palmier dattier (FPD) mené par (H.H.Abdel-Rahman, R.Al-Juruf, F.Ahmad, and I.Alam (1988), les résultats des tests montrent que la résistance à la traction des parois de la tige est comprise entre 116 et 208N/mm² tandis que celle du noyau est presque la moitié de ces valeurs. Le module d'élasticité des tiges se situe entre 10 et 30 kN/mm². De plus, des tests chimiques ont été réalisé pour examiner la durabilité des FPD dans du béton frais, ainsi que d'autres tests de la durabilité à long terme des FPD enrobées de béton durci. Les résultats montrent que le milieu alcalin du béton frais n'a aucun effet sur la résistance à la traction des FPD. Ils montrent également que le revêtement des FPD avec du vernis améliore nettement leur durabilité à

long terme dans le béton.

Dans le but de chercher des renforts alternatifs et des systèmes de résine écologique et respectueuse de l'environnement tout en offrant les mêmes performances que leurs homologues synthétiques, (A.Alawar, A.M.Hamed, and K.Al-Kaabi (2009) ont étudié l'effet des différents traitement alcalin avec des concentrations de 0,5%, 1%, 1,5%, 2,5% et 5%, et un traitement acide avec 0,3, 0,9 et 1,6N sur la FPD. Les résultats montrent que l'échantillon traité avec 1% de NaOH a présenté des propriétés mécaniques optimales, voir Figure24, tandis que le traitement à l'acide chlorhydrique a entraîné une détérioration des propriétés mécaniques.

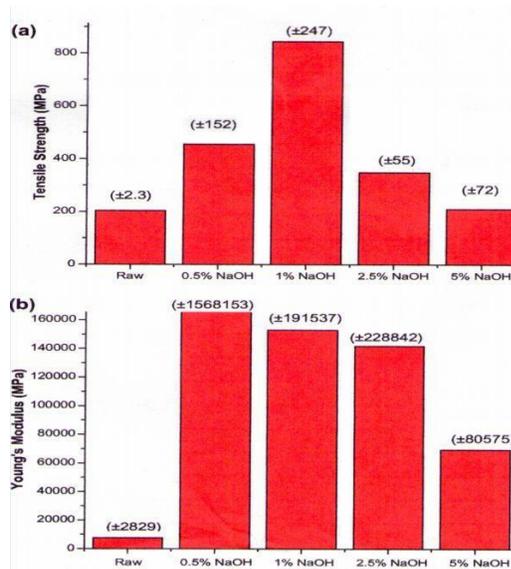


Figure 24 Les variations des propriétés mécaniques de palmier dattier avec différents traitement A.Alawar et al. (2009)

II.5.3 Propriétés thermo physique de la fibre de palmier dattier

La caractérisation des propriétés thermo physiques du PDF menée par B.Agoudjile et al. (2011), dont le but est d'évaluer la possibilité de l'utiliser

comme composant d'un matériau isolant afin d'améliorer les performances thermiques des bâtiments. Les résultats montrent une conductivité thermique de $\lambda = 0.083 \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ très comparable aux valeurs de beaucoup de matériaux isolants tel que: le chanvre, le bois, le sisal et le liège...etc. Par ailleurs, l'orientation des PDF n'a pas d'influence considérable sur la conductivité thermique contrairement à la permittivité relative. En revanche, (B.Haba, B.Agoudjil, A.Bouenne, and K.Benzarti (2017) et M.Chikhi, B.Agoudjil, A.Bouenne, and A.Gherabli (2013) ont testé l'incorporation des PDF comme matériau de renfort dans les matrices inorganiques comme le plâtre et le ciment afin d'améliorer les propriétés mécaniques et thermiques des matériaux étudiés. Les résultats ont montré que la concentration de PDF fait baisser la conductivité thermique des matériaux à base de gypse, et que le taux de PDF a un effet important sur les propriétés mécaniques et thermiques des composites par rapport à l'effet de la taille des fibres.

De plus, l'étude menée révèle aussi que la présence de fibres de palmier dattier dans une mixture à base de ciment renforcée à 15% de PDF (B.Haba et al., 2017) améliore les performances, l'efficacité du matériau composite et induit une baisse de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau, une amélioration du transfert d'humidité et une conductivité thermique comparable à d'autres matériaux bio composite.

II.6 L'inertie thermique

L'inertie est définie comme étant la capacité d'une enveloppe à atténuer les pics et à déphaser les fluctuations des températures extérieure.

Intégré dans l'enveloppe porteuse elle permet de stocker les flux énergétiques de chaleur pour les diffuser, plus tard, de façon déphasée dans le temps opportun.

La densité et la chaleur spécifique du matériau sont des facteurs très influents pour l'inertie.

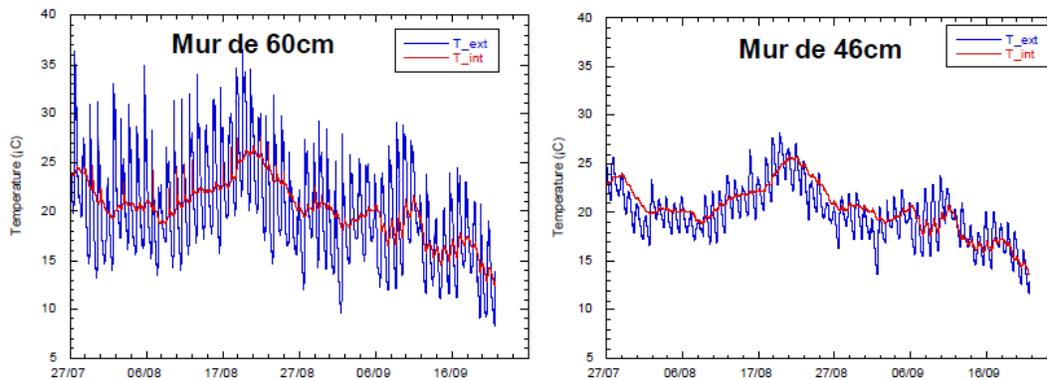


Figure 25 réduction des fluctuations des T° extérieures sous l'effet de l'épaisseur du mur en Terre crue (source :Faycal El Fgaier (2013))

Cependant, une utilisation efficace de l'inertie doit être associée à la conductivité thermique. Ainsi, un matériau lourd à forte chaleur spécifique ne pourra stocker de chaleur que s'il est en plus bon conducteur. Les caractéristiques de l'inertie thermique peuvent être regroupées pour chaque matériau en deux grandeurs intermédiaires :

- La diffusivité thermique
- L'effusivité thermique.

Ces deux grandeurs permettent de définir la quantité de chaleur stockée ainsi que la profondeur de pénétration de l'onde de chaleur dans le matériau pour une sollicitation donnée.

Effusivité

$$Eff = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C_p} \quad (\text{w.m}^2.\text{k}^{-1}.\text{s}^{-1/2}) \quad (3)$$

Diffusivité

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (\text{m}^2.\text{s}^{-1}) \quad (4)$$

λ : conductivité thermique, ρ : densité C_p : chaleur spécifique du

matériau.

A partir des effusivités et diffusivités thermiques il est possible de définir les paramètres suivants :

Quantité de chaleur stockée pendant un temps t :

$$Q = E f \sqrt{t} \quad (5)$$

Profondeur de pénétration de l'onde de chaleur après un temps t :

$$p = \sqrt{\alpha t} \quad (6)$$

Cette capacité de stockage l'énergie doit être correctement dimensionnée afin de pouvoir la restitution au temps opportun. La figure 26, illustre le temps de déphasage de divers matériaux de construction où il est constaté que la terre crue est l'un des principaux matériaux qui permet de stocker la chaleur et d'atténuer les fluctuations de température dans le bâtiment (Faycal El Fgaier, 2013b).

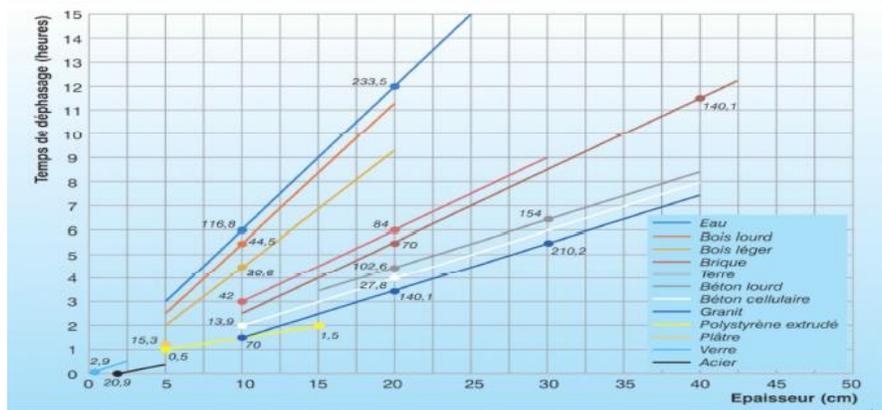


Figure 26 Temps de déphasage de divers matériaux de construction (Faycal El Fgaier, 2013b)

II.7 Mesures des propriétés thermophysiques

II.7.1 Propriétés thermiques des matériaux

Les performances du matériau terre en terme de thermique du bâtiment restent très peu connues. Nous entendons par matériau isolant thermique, tout matériau qui par sa nature ralentit le transfert de chaleur (énergie) et dont la conductivité thermique est au plus égale à $0,065 \text{ w.m}^{-1}\text{k}^{-1}$. La détermination des caractéristiques thermophysiques du matériau terre est d'une grande utilité pour l'évaluation de son efficacité thermique et énergétique dans le domaine du bâtiment. Les propriétés thermiques des matériaux représente la capacité de l'énergie à se propagée ou d'y être stockée dans un corps. En réalité, l'énergie n'entre pas simplement par une face pour atteindre l'autre face en suivant une ligne droite, mais l'énergie diffuse dans le matériau en se transmettant par des collisions successives, liées à l'agitation des atomes et des molécules du milieu qui « transportent » la chaleur. Les propriétés thermiques se rapportent aussi à la capacité du matériau à absorber de l'énergie thermique. Cette énergie thermique peut être absorbée pour élever la température du matériau ou pour le transformer (changement des propriétés physiques ou d'état du matériau) : capacité thermique, enthalpie de fusion (ou autre transformation), coefficient de dilatation thermique...

Toutes les propriétés thermiques des matériaux sont dépendantes de la nature du corps et de sa température. La mesure de ces propriétés est donc indissociable de la mesure de la température et de la connaissance de la nature du matériau.

Nous allons rappeler quelques notions de propagations de l'énergie à travers un matériau et nous exposerons les méthodes de mesures des

propriétés intrinsèques.

II.7.1.1 La conduction thermique

En présence d'un gradient de température, la conduction thermique se produit par contact et se traduit par une élévation de la température jusqu'à l'uniformisation de la température dans le système, sans déplacement de matière. Elle a lieu principalement dans les solides mais existe aussi dans les fluides à une moindre échelle.

Joseph Fourier a développé une théorie analytique pour décrire la conduction de la chaleur dans les matériaux. On retient surtout la loi de Fourier :

$$\varphi = -\lambda \cdot \text{grad}T$$

où T est la température locale et λ est la conductivité thermique du matériau.

Elle exprime le flux de chaleur transféré, au travers d'une surface S , est proportionnel au gradient de température ($T_a > T_b$) sur l'épaisseur e considérée, à la surface et au temps, et que le transfert de chaleur s'effectue de la zone chaude vers la zone froide.



Figure 27 Transfert thermique entre deux surfaces respectivement à la température T_a et T_b ($T_a > T_b$).

Le premier principe de la thermodynamique sur la conservation de l'énergie conduit à l'équation de la chaleur sous sa forme générale :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) + q$$

où C_p est la capacité thermique massique à pression constante,

ρ est la masse volumique du matériau considéré,

λ est la conductivité thermique du matériau,

q est l'apport de chaleur interne

et sous sa forme simplifiée (en l'absence d'apport de chaleur interne $q = 0$), pour un corps homogène et isotrope et pour un domaine de variation de température où la conductivité thermique reste constante)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \nabla^2 T$$

II.7.1.2 Convection thermique

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. La variation locale de la température modifie localement la masse volumique du matériau entraînant ainsi des mouvements du fluide. Cette convection est qualifiée de naturelle. On retiendra donc que dans la convection, la chaleur se sert du fluide comme véhicule pour se déplacer.

Contrairement à la conduction, il y a ici déplacement de matière. Dans les fluides, la conduction et la convection se conjuguent. La convection contribue à augmenter la vitesse de transfert de la chaleur par rapport à la conduction seule.

II.7.1.3 Rayonnement thermique

Le rayonnement thermique est émis par tout corps dans tout milieu

transparent au rayonnement émis. Ce type de transfert ne nécessite pas de matière comme support de propagation (il peut avoir lieu dans le vide). Il s'agit en effet d'un rayonnement électromagnétique. Ses caractéristiques dépendent de la température du corps émetteur et des caractéristiques physiques de la surface émettrice du corps. Elle dépend de la nature du matériau, de l'état de la surface et des couches moléculaires proches de la surface. En pratique, elle dépend des traitements chimique et mécanique de la surface et aussi du traitement thermique que peut subir le matériau.

II.7.2 La conductivité thermique

La conductivité thermique est l'une des propriétés thermophysiques la plus recherchée pour les matériaux de construction. Elle est définie comme étant le flux de chaleur traversant un matériau d'épaisseur un mètre, pour une différence de température de un kelvin entre les deux faces entrante et sortante. Elle s'exprime en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Sa valeur permet de quantifier le pouvoir du matériau à conduire la chaleur. Plus elle est faible, plus le matériau est isolant (conduction faible). Elle dépend de la nature du corps et de sa température.

II.7.3 Résistance thermique (R)

La résistance thermique est utilisée pour quantifier le pouvoir isolant des matériaux pour une épaisseur donnée. Elle s'exprime en : $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$.

Une paroi est d'autant plus isolante que sa résistance thermique est élevée.

II.7.4 La diffusivité thermique

La diffusivité thermique, est liée à la conductivité thermique, à la chaleur

massique et à la masse volumique. Elle caractérise l'aptitude d'un matériau à transmettre la chaleur (en termes de vitesse), dans un corps et correspond à tous les problèmes d'inertie thermique des matériaux. Elle intervient dans les transferts en régime transitoire de température. Elle caractérise. Elle s'exprime en $m^2 \cdot s^{-1}$.

II.7.5 Effusivité thermique

Elle permet de quantifier l'aptitude d'un matériau à changer de température (plus ou moins rapidement) lorsqu'il reçoit un apport d'énergie thermique distribué de manière non uniforme (par exemple pour un cube, contact par une seule de ses faces à un autre corps à une température plus élevée). Deux phénomènes se conjuguent alors simultanément : l'énergie est absorbée localement en fonction de la capacité thermique du matériau et cette énergie est transférée aux régions voisines en fonction de la conductivité thermique du matériau.

II.7.6 La chaleur massique

La capacité massique traduit l'aptitude du matériau à absorber une quantité de chaleur (Q) et à s'échauffer. Cette grandeur était anciennement appelée chaleur spécifique ou capacité calorifique. L'équation calorimétrique classique :

$$Q = mC_p(T_2 - T_1)$$

montre que la quantité de chaleur absorbée par un corps de masse m quand sa température augmente de T_1 à T_2 est proportionnelle à la chaleur massique C_p du solide considéré. Pratiquement, la chaleur massique C_p d'un corps correspond à la quantité de chaleur dont il a

besoin pour que la température d'une unité de sa masse s'élève d'un degré. Ceci met en évidence l'importance de la chaleur massique pour tous les calculs de stockage de chaleur ou de transfert de chaleur.

II.7.7 Les principales méthodes de mesure des propriétés thermophysiques

Les paramètres thermophysiques sont importants pour l'étude des transferts de chaleur dans les matériaux ; c'est ainsi qu'ils sont essentiels au niveau de la thermique du bâtiment.

Ces caractéristiques peuvent être mesurées suivant diverses méthodes, mais la connaissance de deux d'entre eux entraîne la détermination des autres. La mesure de la conductivité thermique est importante pour l'étude des échanges de chaleur dans un système.

Les méthodes de mesure de la conductivité thermique sont classées en deux grandes catégories : les méthodes à état stationnaire et les méthodes à état transitoires.

II.7.7.1 Régime permanent (stationnaire)

La méthode consiste de créer un flux unidirectionnel. Cela est possible en plaçant l'échantillon entre deux plans isothermes de températures différentes. Le problème de la mesure en régime permanent est les pertes thermiques. Cependant, on réduit les pertes soit en utilisant un échantillon fin pour que les pertes soient négligeable, soit en utilisant une garde.

1. méthode de la plaque chaude gardée

La méthode de la plaque chaude gardée est la méthode la plus utilisée pour les faibles conductivités thermiques (inférieures à 1). Les

mesures se font dans des conditions stationnaires de température.

En effet, l'échantillon se présente sous forme de deux plaques identiques d'épaisseur e et de grande surface S . Le principe du protocole expérimental consiste à maintenir une différence de température ΔT entre deux plaques A et B, parallèles et portées respectivement à températures constantes T_A et T_B . Un échantillon à étudier, est placé entre les deux plaques. Un flux de chaleur unidirectionnel est généré dans un conducteur électrique inséré dans la plaque chaude placée entre les deux plaques d'échantillon car les plaques échantillons sont encadrées chacune par une plaque froide, voir figure 28. L'avantage d'avoir deux échantillons identiques est d'éviter une garde thermique à l'arrière du plan chaud.

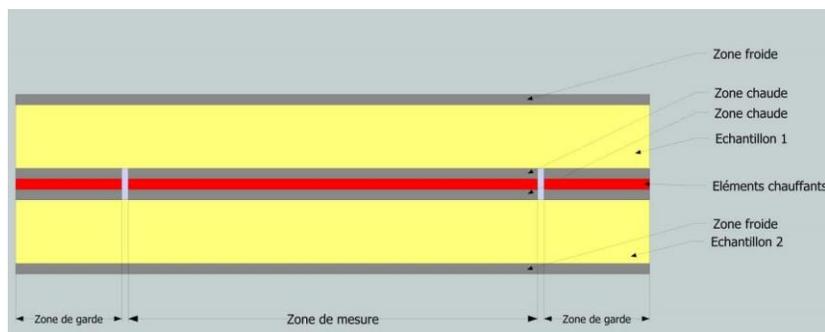


Figure 28 Schéma de type plaque chaude gardée pour la mesure de la conductivité thermique
source : <https://themacs-engineering.com/mesure-de-la-conductivite-thermique>

Si les deux échantillons sont identiques le flux traverse à part égale chaque éprouvette. La mesure des températures sur les deux faces de chaque échantillon, une fois le régime permanent atteint, permet alors de calculer la conductivité thermique (λ). Cette méthode permet une mesure absolue de la conductivité thermique.

$$\lambda = \frac{\phi \cdot e}{\Delta T} \quad \Delta T = T_A - T_B$$

La résistance thermique est d'autant plus élevée que la conductivité λ est petite.

2. Méthode Fluxmétrique

La méthode fluxmétrique est principalement utilisée dans le domaine du bâtiment pour mesurer des matériaux d'isolation ou de construction. Il s'agit d'une mesure relative nécessitant un échantillon de référence. Le principe de cette méthode repose sur la circulation d'un flux thermique au travers de l'échantillon. En effet, l'échantillon à mesurer est inséré entre les deux plaques chaude et froide de l'appareil, au contact. Le gradient de température entre ces deux plaques génère un flux de chaleur qui traverse en régime permanent l'échantillon. Le flux est quantifié de part et d'autre de l'échantillon par des transducteurs de flux. La loi de Fourier sur la conduction de la chaleur nous permet de remonter aux valeurs de conductivité thermique (λ) et résistance thermique de l'échantillon (R), $R=e/\lambda$ avec e l'épaisseur de l'échantillon mesuré.

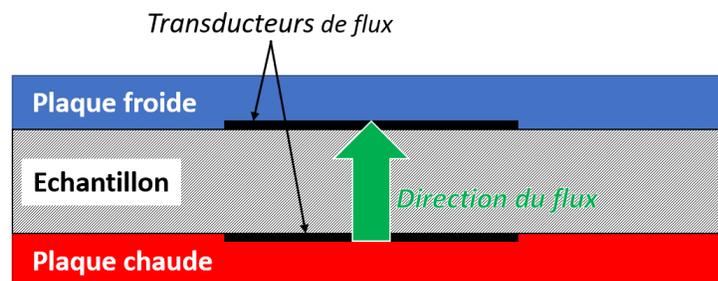


Figure 29 Schéma de la méthode fluxmétrique, source : <https://www.thermoconcept-sarl.com/methodes-de-mesure-de-la-conductivite-thermique/>

3. Méthode des boîtes

Elle permet la mesure des caractéristiques nécessaires pour l'évaluation des bilans thermiques : la conductivité thermique, la diffusivité thermique, la chaleur massique, en un temps court par rapport aux autres méthodes de un ou deux échantillons suivant la configuration de la cellule.

Le volume A est maintenu à une température plus basse que les deux boîtes grâce à un échangeur basse température R relié à un cryostat. Les plaques chauffantes C situées dans les boîtes créent un gradient de température à travers l'échantillon E. (voir figure30)

En régime permanent, les mesures du flux de chaleur émis par C et des températures sur les faces supérieure et inférieure de E permettent de calculer les caractéristiques thermiques de l'échantillon. Lorsque ces températures se stabilisent on considère que l'on a atteint le régime permanent.

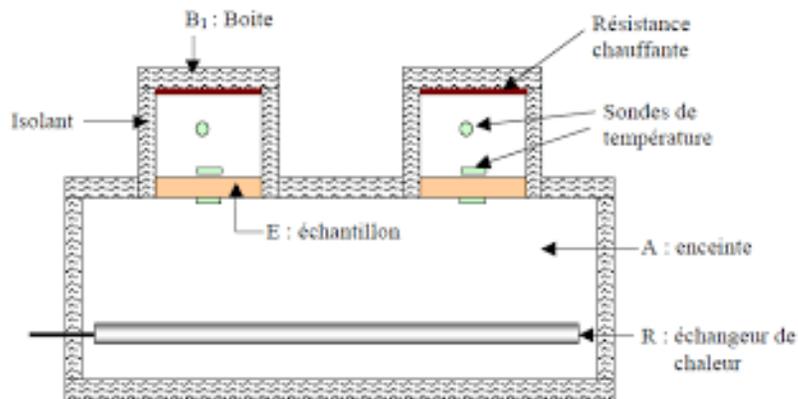


Figure 30. Dispositif expérimental de la méthode des boîtes source : <https://www.thermoconcept-sarl.com/methodes-de-mesure-de-la-conductivite-thermique/>

II.7.7.2 Régime transitoire (instationnaire)

Dans ces méthodes on peut être amené à ne plus mesurer la conductivité seule mais plutôt la diffusivité. Cela oblige à mesurer par ailleurs la chaleur massique par une autre méthode. Ces méthodes sont le plus souvent utilisées pour des matériaux biologiques qui sont généralement hétérogènes et ont un taux d'humidité élevé. Nous allons, présenter les différentes méthodes de mesure des propriétés thermophysiques par le fil chaud et le plan chaud.

1. Mesure de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud

La méthode du fil chaud est une des méthodes transitoires les plus utilisées pour mesurer la conductivité thermique des isolants car elle est simple et rapide à mettre en œuvre. Le principe consiste à placer un élément chauffant qui se présente sous la forme d'un fil entre les surfaces de deux échantillons du matériau à caractériser. Le fil délivre un flux de chaleur sous forme d'échelon afin de produire localement un échauffement de quelques degrés du matériau. Cet échauffement est en règle générale mesuré ponctuellement par thermocouple. C'est l'analyse mathématique de cet échauffement qui permet de déterminer la conductivité thermique. Cette mesure est absolue.

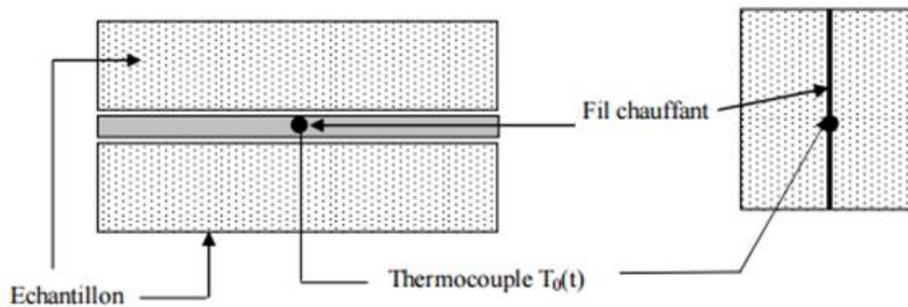


Figure 31 Schéma de la méthode Fil chaud source : <https://www.thermoconcept-sarl.com/methodes-de-mesure-de-la-conductivite-thermique/>

2. Méthode de la plaque chaude.

Le méthode Hot Disk est la méthode la plus robuste pour la mesure directe et absolue de la conductivité thermique. Elle permet de mesurer tous types de matériaux. Le principe repose sur une variation de résistance électrique liée à une variation de température. Une sonde (Hot Disk) est placée entre deux échantillons du même matériau à mesurer. Cette sonde est utilisée à la fois comme source de chaleur et comme capteur de température. En effet, une puissance constante est fournie à la sonde pendant un temps limité, ce qui crée un échauffement de quelques degrés des échantillons sur un certain volume autour de cette sonde (voir figure 32). Cette élévation de température engendre une variation de résistance électrique de la sonde mesurée via un pont de Wheastone très précis. Ces variations (régime transitoire) sont enregistrées précisément puis analysées afin de déterminer la conductivité thermique et la diffusivité thermique du matériau.

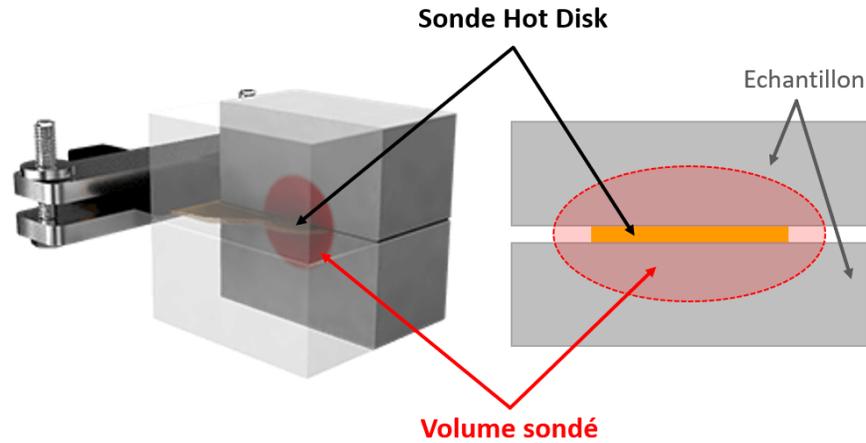


Figure 32 Schéma de la méthode Hot Disk — Source Plane Transitoire source : <https://www.thermoconcept-sarl.com/methodes-de-mesure-de-la-conductivite-thermique/>

3. Méthode flash

Cette méthode est très utile pour mesurer la conductivité thermique sur de petits échantillons. Elle est incontournable pour mesurer la conductivité thermique à haute température où la mesure de température par pyrométrie de contact est inopérante. Cette méthode ne nécessite pas de mesurer précisément la température. Cependant on ne peut mesurer que la diffusivité.

La méthode débute par l'apport d'énergie thermique, par impulsion optique (laser) sur l'une des faces de l'échantillon. Le flux de chaleur généré se propage dans l'échantillon et l'évolution de la température dans le temps (thermogramme) est mesurée, soit sur la face arrière, soit sur la face avant, à l'aide d'un détecteur de rayonnement (photodiode infrarouge). L'échantillon est dans un four à température variable dont la température est maintenue constante pendant toute la durée de la mesure de la diffusivité thermique.

Le principe consiste ensuite à analyser le thermogramme (montée en

température sur la face arrière) pour déterminer la diffusivité.

II.7.8 Les principales méthodes de mesure des propriétés hygroscopiques

II.7.8.1 Définition de l'isothermes de sorption

L'activité de l'eau dans un matériau dépend essentiellement de sa teneur en eau et de sa température T . La courbe représentant pour une température T donnée la teneur en eau X d'un matériau en fonction de la valeur de l'activité de l'eau ou de l'humidité relative de l'air en équilibre HR est appelée :

- Isotherme d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec.
- Isotherme de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

Les deux courbes sont en général différentes car le séchage d'un matériau provoque des changements de structure et de porosité irréversibles.

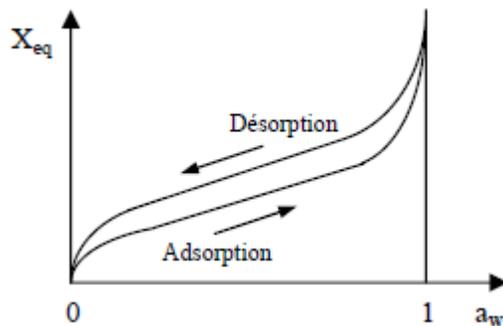


Figure 33 isothermes d'adsorption et de désorption

II.7.8.2 Méthode gravimétrique

Le principe d'obtention d'un point de l'isotherme est le suivant : on place un échantillon du produit dans une enceinte maintenue à température T et à humidité relative HR de l'air constante. L'échantillon est pesé à intervalle régulier jusqu'à ce que sa masse ne varie plus, il est alors en équilibre avec l'air à (T, HR) . Connaissant sa masse humide, il suffit alors de déterminer sa masse sèche pour en déduire sa teneur en eau X , le couple (HR, X) fournit un point de l'isotherme de sorption ou de désorption.

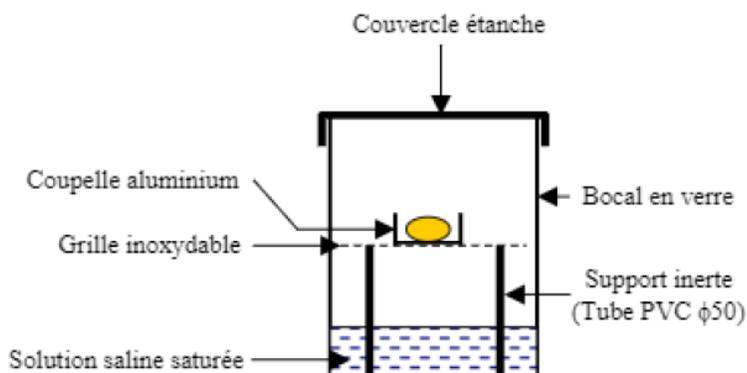


Figure 34. Schéma d'un montage expérimental type pour la méthode des solutions salines

L'échantillon est suspendu dans un récipient étanche à l'intérieur duquel une solution maintient une humidité relative constante. Cette solution peut être une solution saline saturée en sel ou une solution d'acide sulfurique de concentration déterminée (voir figure 33). La température est maintenue constante en plaçant les récipients dans une enceinte thermostatée. On utilise autant de sels ou de concentrations différents (et donc de récipients) que l'on veut obtenir de points sur l'isotherme. Le tableau.2 indique les humidités relatives de l'air au-dessus des solutions salines saturées (à 25°C)

préconisées pour la mise en œuvre de la méthode des sels.

Tableau 2 Valeur de HR (%) en fonction de la nature du sel et de la température

LiBr	LiCl	KCH ₃ O	KF	MgCl ₂	KCO ₃
6,4	11,3	22,5	30,9	32,8	43,2
NaBr	CuCl ₂	CoCl ₂	NaCl	KCl	K ₂ SO ₄
57,6	68,5	64,9	75,3	84,3	97,3

II.7.8.3 Méthode dynamique

L'instrument DVS (sorption dynamique de vapeur)

La mesure DVS consiste à établir :

- Un échantillon maintenu dans une chambre à température régulée.
- Un flux de gaz porteur, avec une teneur en vapeur contrôlée. Souvent, cela est généré par le mélange d'un flux de gaz sec (pur) avec un flux saturé en vapeur.
- Une microbalance, pour mesurer l'absorption et la désorption de la vapeur sur l'échantillon.

Tous les instruments modernes pour le DVS sont pilotés par ordinateur, et permettent de programmer les mesures qui se déroulent sans intervention de la part de l'utilisateur.

Les mesures sont généralement effectuées à pression constante et avec un débit total fixe, afin de minimiser les variations du poids associées à la force d'Archimède et la force de traînée.

L'utilisation d'une température fixe permet d'obtenir la courbe isotherme de sorption par l'équilibration de l'échantillon sous une série de

concentrations de vapeur.

La mesure est souvent très sensible à la température, nécessitant une régulation très stable de la température. La répétition de la mesure à plusieurs températures différentes est utilisée pour sonder la thermodynamique des processus de sorption.

Les instruments gravimétriques, permettent une mesure rapide et économique des courbes isothermes de sorption d'humidité.

Selon l'application, la taille de l'échantillon peut varier jusqu'à plusieurs dizaines ou centaines de grammes pour les matériaux de construction.

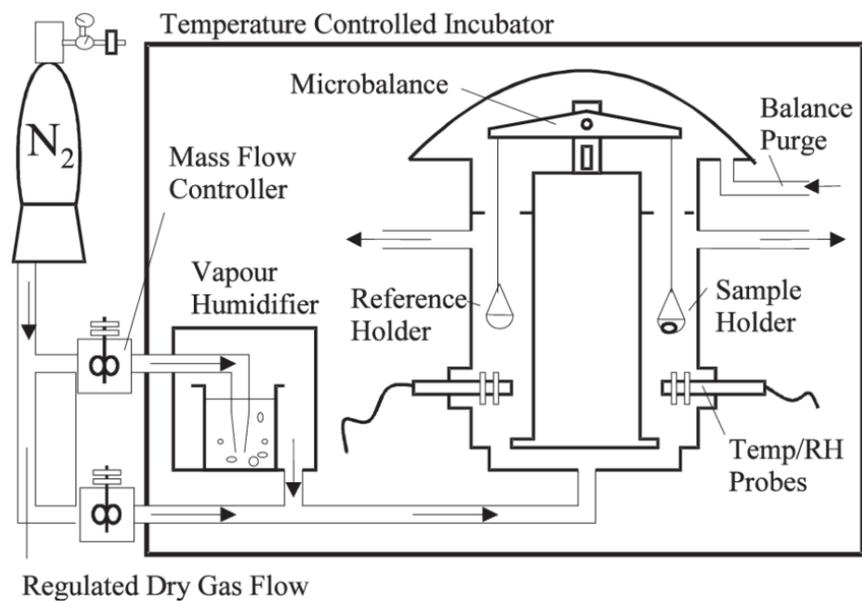


Figure 35 schéma d'un instrument DVS (dynamic vapour sorption)

source (JOHANNESSON, 2001)

II.8 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une vision générale des travaux de recherches menés sur les principaux composants des matériaux utilisés, à savoir; la terre et la fibre de bois de palmier dattier, et sur les caractéristiques thermo physique et hydrique des composites, ainsi que la performance thermique de la terre en tant que matériau de construction pouvant apporter un plus au confort dans les constructions.

D'après ces recherches, la caractérisation de la terre en tant que matériau dépend principalement de sa nature minéralogique et granulométrique. Toutefois, sa stabilisation par compactage améliore nettement ses caractéristiques mécaniques, et l'ajout de ciment joue un rôle primordial dans l'amélioration de sa résistance à l'eau et à la compression.

Nonobstant, très peu de recherches ont abordé la caractérisation thermo hydrique. Si celle du matériau et celle du système sont évoquées, celle du bâtiment est négligée ou présentée d'une manière très sommaire. La relation de l'enveloppe avec le climat extérieur et le comportement des occupants sont souvent oubliés. Le matériau ou la paroi sont surtout examinés dans des enceintes climatiques, et non comme partie intégrante de l'enveloppe hygroscopique habitée.

Ce chapitre a été aussi sujet de l'effet de l'ajout de la fibre végétale sur les différents paramètres de caractérisation. Il ressort des études citées que l'addition des fibres améliore les caractéristiques thermo physique et hydrique et même mécaniques, car il a été rapporté que la mixture fibre-

terre est très ductile et absorbe l'énergie sous effet de compression.

De plus, les matériaux hygroscopiques, ex: (terre + fibre) sont apparus comme des modérateurs des niveaux élevés d'humidité relative, avec des effets bénéfiques sur le confort hygrothermique, la consommation de l'énergie et la qualité de l'air intérieur.

D'autre part, il a été noté que les modèles numériques établis manquent parfois de précision, et jusque-là aucun modèle n'a pu reproduire le comportement exact de l'enveloppe hygroscopique. On a souligné que la prise en compte de l'hystérésis dans les modèles donne des résultats proches des données mesurées et expérimentales.

La présentation des principales méthodes de mesures des caractéristiques thermophysiques et hygroscopique nous a permis de conclure que le choix dépend des facteurs : fiabilité des résultats et la durée des mesures, la disponibilité des instruments ainsi que le cout de l'acquisition du matériel.

CHAPITRE 3

CARACTERISATION THERMO PHYSIQUE ET HYDRIQUE

III.1 Introduction

La détermination des caractéristiques thermo physiques des matériaux de construction joue un rôle prédominant dans le domaine énergétique du bâtiment. La terre en tant que matériau naturel et écologique devient le centre d'intérêt de beaucoup d'intéressés de la problématique environnementale, suite à la politique énergétique visant à rationaliser la consommation énergétique.

La terre est un matériau naturel disponible, économique et recyclable sans effet inverse. La production du matériau terre nécessite que très peu d'énergie, contrairement aux matériaux industriels dont la production exige énormément d'énergie.

Cependant, les performances thermiques et hygrothermique des matériaux à base de terre restent très peu connues. Donc, la détermination des propriétés thermo physiques du matériau terre est d'une grande utilité afin d'évaluer son efficacité des performances énergétiques.

Dans ce contexte, nous allons procéder à une campagne expérimentale afin de déterminer les propriétés thermo physiques de ces matériaux. A cet effet, des séries échantillons ont été préparé suivant deux paramètres distincts, la pression de compression et les taux des FPD contenus dans les matériaux. En même temps, nous exposerons quelques notions méthodologies de mesures.

III.2 Formulation des éprouvettes

III.2.1 Propriétés des matériaux utilisés

Les différents essais d'identification permet de déterminer les propriétés de du sol sélectionné. En effet, la connaissance des caractéristiques de la matière première permet de bien comprendre leur comportement. Notre travail est essentiel pour l'amélioration des performances de matériaux en terre,

Les matériaux choisis à l'occasion de cette campagne expérimentale de caractérisation sont: la terre, la fibre de palmier dattier naturelle et le ciment. La terre utilisée dans cette étude provient de Ghassira, une région située aux Aurès, à l'est de l'Algérie, voir Figure 37.



Figure 36. Échantillon de sol après tamisage source : Auteur

Premièrement, la terre a été tamisée sous tamis 5 mm et parfaitement nettoyée des particules organiques et autres débris. Ensuite, nous avons procédé à deux tests distinctifs (granulométrie et sédimentométrie) pour déterminer la composition granulaire du sol selon la norme NF P94-056. Les propriétés physiques et chimiques du sol sont indiquées dans le tableau.3



Figure 37. Situation géographique du lieu de prélèvement de la terre,
Tabaalit -Ghassira Algérie source : Google Earth

Tableau 3 Propriétés physiques et chimiques du sol utilisé.

Caractéristiques granulométriques	Composition chimique	Minéralogie	limites Atterberg
17.84 % argile 27.16 % silt 55.00 % sable	SiO ₂ 41.8 Al ₂ O ₃ 02.79 Fe ₂ O ₃ 01.34 CaO 22.67 MgO 4.41 K ₂ O 0.50 Na ₂ O 0.18 SO ₃ 0.81 Cl 0.02	Quartz Calcite Dolomite	Limite de liquidité wL=28.46% Limite de plasticité WP = 16.14% index de plasticité Ip : 12.32%

III.2.1.1 Classification du sol utilisé

On va opter pour une des classifications les plus couramment utilisées, suivant leurs deux propriétés fondamentales : la granularité et la plasticité

- La Granulométrie : abaque de granulométrie NF P 94-056
 - les limites d'Atterberg : Diagramme de Casagrande
1. la granulométrie : la figure.38 représente la répartition des différents constituants du sol utilisé, le sol est fin, sablonneux et peu argileux.
 2. Limites d'Atterberg :
C'est un diagramme, voir figure.39, qui permet une classification des types de sols en se basant sur les paramètres de plasticité des

sols : l'indice de plasticité IP et de limite de liquidité WL.

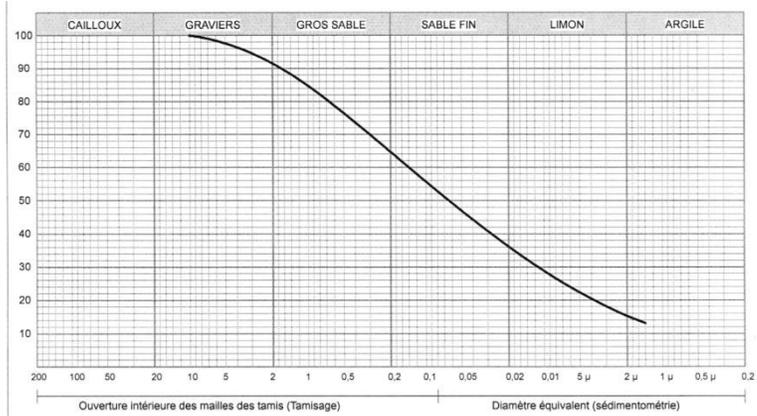


Figure 38 Analyse de granulométrie du sol utilisé source : Auteur

La figure.39 présente le diagramme de plasticité des sols fins. Il est divisé en six sections par la droite A et par une ligne verticale tracée de façon que $wL = 50\%$ chaque partie du diagramme correspond à un groupe de sols aux propriétés mécaniques bien définies.

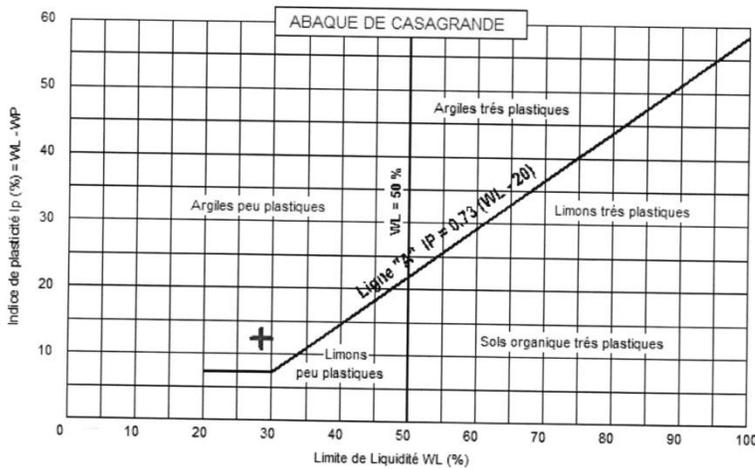


Figure 39 Diagramme de plasticité et classement d'échantillon source : auteur

Ce diagramme montre que l'échantillon de sol Ghassira est considéré comme une argile inorganique peu plastique.

III.2.1.2 Composition chimique

Les pourcentages massiques d'oxydes des échantillons sont présentés dans le tableau 3. L'échantillon contient une quantité relativement importante de silice, provenant essentiellement des silicates d'alumine et du quartz. Il possède une faible concentration en Al_2O_3 , liée généralement aux silicates argileux et contribue à l'obtention d'une bonne plasticité. En revanche, il contient une importante proportion de CaO (22.67%) provenant de la composition calcaire. En fin des traces de (Na, K, SO_3 ...) ont été détectées dans l'analyse chimique de cet échantillon.

III.2.1.3 Composition minéralogique

La composition minéralogique de l'échantillon a été examinée par la technique de la diffraction des rayons X, qui permet d'identifier les différentes phases minérales cristallisées présentes dans la matière.

Le diffractogramme du sol étudié montre qu'il est principalement composé de quartz, de calcite et de dolomite. La présence de dolomite dans l'échantillon contribue à une bonne aptitude catalysante, anti acides neutralisante.

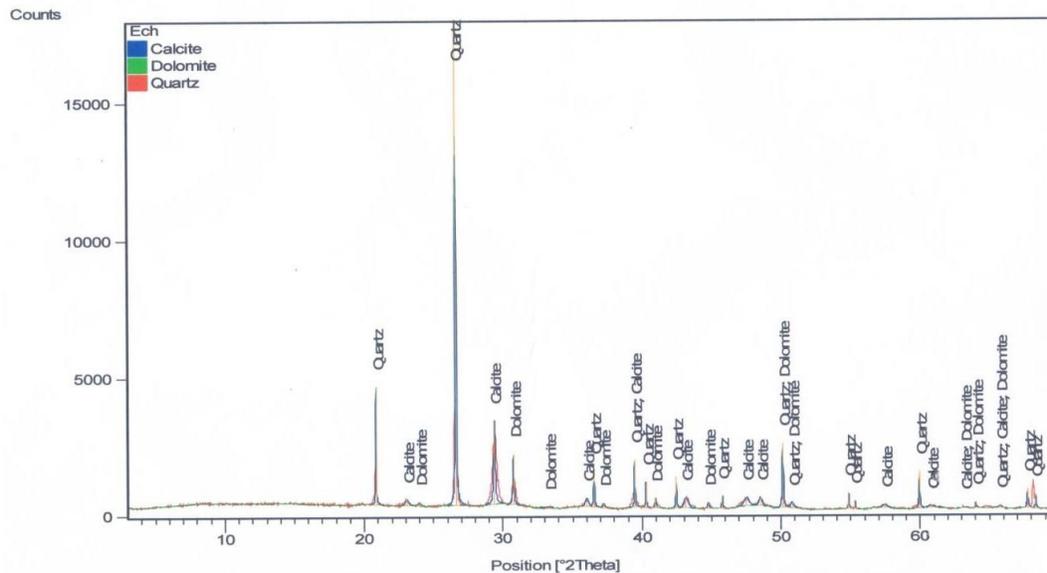


Figure 40 Diffractogramme des rayons X de l'échantillon objet de l'étude. Source Auteur

III.2.1.4 Confection des échantillons

Pour la fabrication des échantillons, nous avons procédé au séchage de la terre et la fibre PFD dans un four à une température 105°C. Plusieurs séries d'échantillons sont préparés, voir tableau3.

Afin d'obtenir une distribution homogène des différents composants, la terre, la FPD et le ciment sont placés dans un récipient et mélangés manuellement sans eau suivant la série d'échantillons à préparer. L'eau est versée selon un contenu bien défini, voir le tableau 4. Après que la mixture soit bien homogène, elle est versée dans le moule en acier et compacté dans une presse hydraulique. Le compactage est de type statique simple. Il est assuré par une presse hydraulique de type Controlab avec une précision de 0.001MPa, et vitesse de chargement de 0.5 MPa/s. Pendant toutes les étapes de préparation, les échantillons sont repartis en trois catégories de pressions de compactage: basse pression 2MPa, moyenne pression 05MPa et haute pression 10MPa (H.Guillaud, T.Joffray, et al., 1995).



Figure 41 Moule en acier utilisé pour la confection des éprouvettes. Source : Auteur

Les dimensions du moule sont: 100mmx100x100mm, il est équipé d'un piston pour assurer la transmission des charges. Le démoulage est réalisé, immédiatement après le compactage. La brique de terre est prélevée manuellement avec soin, et conservée en laboratoire à 20 ± 2 ° C pendant 28 jours avant d'être soumise à différents tests. On notera également que sous la pression de compactage, les mixtures contenant des fibres FPD, présentent une légère élasticité après démoulage du fait des contraintes des fibres, ce phénomène a également été rapporté par (B.Taalah et al. (2014).

Tableau 4 Différentes séries d'échantillons avec leur ratios de compositions

Echantillon	Sol %	FPD %	Pression de compactage MPa	Ciment	Eau %
0F2P	100	0	2		10
0F5P	100	0	5		10
0F10P	100	0	10		10
0F5C5P	95	0	5	5	12
0F5C10P	95	0	10	5	12
5F5C5P	90	5	5	5	12
5F2P	95	5	2		10
5F5P	95	5	5		10
5F10P	95	5	10		10
10F2P	90	10	2		12
10F5P	90	10	5		12
10F10P	90	10	10		12
10F5C10P	85	10	10	5	12
15F2P	85	15	2		16
15F5P	85	15	5		16
15F10P	85	15	10		16

III.3 Tests Effectués

III.3.1 Résistance à la compression simple

Cet essai détermine la résistance nominale en compression simple des blocs de terre brute comprimés selon la norme EN 12390-3 (2012). Ce test consiste à soumettre l'échantillon à une simple compression directe. Le test a démarré 28 jours après le démoulage ; les échantillons ont été chargés



Figure 42 presse hydraulique de type; controlab source : Auteur

dans leur orientation normale sous pression. La charge a été appliquée en continu à un débit constant de 2,5kN/s jusqu'à la rupture. La résistance à la compression de chaque brique a été déterminée à partir de sa charge de rupture et de la surface moyenne du lit.

III.3.2 Conductivité thermique

L'instrument utilisé pour mesurer la conductivité thermique est l'analyseur de conductivité thermique C-Therm TCi, qui utilise la technique MTPS (Modified Transient Plane Source) pour caractériser la conductivité

thermique et l'effusivité des matériaux.

Il utilise un capteur de réflectance thermique inter faciale unilatéral qui applique une source de chaleur constante momentanée à l'échantillon. Typiquement, l'impulsion de mesure est comprise entre 1 et 3 secondes. En général, les tests avec le système C-Therm TCi sont conçus pour être rapides et peut indirectement mesurer la diffusivité, la capacité calorifique, la valeur R et la profondeur de pénétration.



Figure 43 C-therm TCi operator source: Auteur

La valeur d'effusivité est calculée à partir de l'équation suivante :

$$Eff = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot Cp} \quad \text{W}\sqrt{\text{s}} \text{ m}^2/\text{K} \quad (7)$$

λ conductivité thermique (w/m.k) ρ : densité (Kg/m³) Cp : capacité thermique (J/Kg/K).

La diffusivité thermique est donnée à partir de l'équation :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot Cp} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (8)$$

α : diffusivité thermique (m²/s)

La capacité calorifique est déterminée à partir :

$$Cp = \frac{Eff^2}{\lambda \cdot \rho} \quad (9)$$

Eff : effusivité (W√s m²/K), λ conductivité thermique (w/m.k),
 ρ :densité (Kg/m³)

La surface du capteur C-Therm TCi est faite d'un matériau solide qui peut mesurer la conductivité thermique des liquides, des poudres et des pâtes par contact direct avec ces matériaux. Cependant, lorsqu'il entre en contact avec des solides, il y a toujours une résistance de contact. L'utilisation d'un agent de contact minimise la résistance de contact. Pour ce travail, nous avons utilisé l'agent de contact Wakefield 120 comme graisse thermique spécifique aux matériaux absorbants ou poreux. La conductivité thermique et l'effusivité sont mesurées directement, fournissant une vue détaillée des propriétés de transfert de chaleur de l'échantillon. L'équipement est conforme à la norme ASTM D7984.

Tableau 5 Spécification pour l'équipement de conductivité thermique

Intervalle mesurable, conductivité thermique	0 to 500 W/mK
Test Time	0.8 to 3 seconds
Taille minimale des tests d'échantillon	0.67" (17mm) diamètre
Taille minimale des tests d'échantillon	illimité
Épaisseur Minimum	Nominalement 0,02 "(0,5 mm), selon la conductivité thermique du matériau
Épaisseur Maximum	illimité
Intervalle de Température	-58° to 392°F (-50° to 200°C), avec option d'extension à 500°C
Précision	Better than 1%
précision	Better than 5%
Connexions supplémentaires requises	non

III.3.3 Sorption et désorption

La sorption hygroscopique décrit l'échange entre la teneur en vapeur d'eau du matériau et l'humidité relative de l'air ambiant jusqu'à un point d'équilibre. Les isothermes de sorption et de désorption ont été déterminées selon les exigences de la norme NF EN ISO 12571 (NFENISO12571, 2000; NFENISO12572, 2001). La capacité de stockage de l'humidité du matériau est déterminée à plusieurs niveaux d'humidité relative. Avant le test, les échantillons de matériau ont été séchés à 105°C jusqu'à obtention d'un poids constant. Ensuite, les échantillons ont été placés dans une enceinte climatique (Figure 44), où la température a été fixée à 23°C et l'humidité relative (HR) a été variée par paliers de 33, 43, 50, 70, 90 et 97% HR. Cependant, les échantillons ont été pesés régulièrement jusqu'à ce que la différence entre deux mesures consécutives à 24 h d'intervalle soit inférieure à 1%, de sorte que l'humidité relative de la pièce climatique puisse être modifiée. Pour la courbe de désorption, la procédure inverse a été suivie avec des niveaux décroissants d'humidité relative de 97 à 33%HR.



Figure.44 enceinte climatique (Binder type KBF 720
source ; Auteur

III.3.4 Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau est une propriété matérielle importante qui caractérise la capacité du matériau à transporter la vapeur d'eau sous un gradient de pression de vapeur une fois que l'état stationnaire est atteint. L'essai a été effectué conformément à la norme ISO 12572 (NFENISO12572, 2001) ; il a fallu sceller l'échantillon d'épaisseur (e) au-dessus d'une coupelle d'essai contenant une solution saline ou du gel de silice de manière à avoir, respectivement, une atmosphère humide ou sèche. Les coupelles contiennent soit un dessiccant (gel de silice) ou une solution saline (chlorure de baryum) qui maintient l'humidité relative de l'atmosphère dans les coupelles à 0-3% HR et 90% HR (R.Jowitt & P.Wagstaffe, 1989).

Le système entier a été placé dans une enceinte climatique contrôlée à température (20 °C) et humidité (HR 50%), de sorte que le matériau se

trouverait entre deux environnements avec des pressions partielles de vapeur différentes; P_{v1} de l'enceinte climatique et P_{v2} à l'intérieur de la coupelle. En raison du gradient partiel de pression de vapeur entre la partie interne de la coupelle et l'enceinte climatique, un flux de vapeur d'eau a fait varier la masse de la coupelle (absorption de masse pour essai avec «coupelle sèche» et perte de masse pour «coupelle humide»). Le dispositif est pesé périodiquement et lorsque le gain en masse est constant, le taux de masse (G) est calculé par régression linéaire de la cinétique de masse Eq. (10), et la perméabilité à la vapeur d'eau est ensuite déduite selon Eq. (11) (F.Collet, J.Chamoin, S.Pretot, & C.Lanos, 2013). Cette expérience permet de déterminer le flux de vapeur à travers l'échantillon.

$$G = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (10)$$

$$\delta p = \frac{G \cdot e}{A \cdot (\Delta P_v)} \quad (11)$$

Où G : masse volumique (kg/s), Δm : variation massique (kg), Δt : temps (s), δp : perméabilité à la vapeur d'eau (kg/ (ms Pa)), e : épaisseur de l'échantillon (m), A : surface exposée (m²), ΔP_v : différence de pression de vapeur (Pa). La pression de vapeur est calculée à partir de la température et de l'humidité relative mesurée pendant la période d'essai avec la relation habituelle. Eq. (12) (F.Collet et al., 2013):

$$P_v = \varphi \cdot 100 \exp\left(18.986 - \frac{4052}{235.89 + T}\right) \quad (12)$$

Où: φ : humidité relative, T : température (K)

III.4 Interprétations des Résultats

III.4.1 Résistance à la compression

III.4.1.1 Effet du compactage sur la résistance à la compression

Pour analyser les résultats obtenus nous les avons scindés en deux parties distinctes : la première partie est spécifiée aux échantillons sans ciment, la seconde partie représente les résultats des échantillons stabilisés à 5% de ciment.

- **Cas des échantillons sans ciment**

Nous constatons sur la figure 45 que la résistance augmente en fonction de la charge de compactage ; ceci explique que la densification provoqué par le compactage réduit le taux des vides et améliore la durabilité. De plus, la densification de la masse de la terre rend également plus difficile la réorientation des particules et la formation de fissures (R.Bahar et al., 2004). Toutefois, les écarts entre les résultats des séries sont importants, ex ; l'écart entre 5F5P et 5F10P est de 51%.

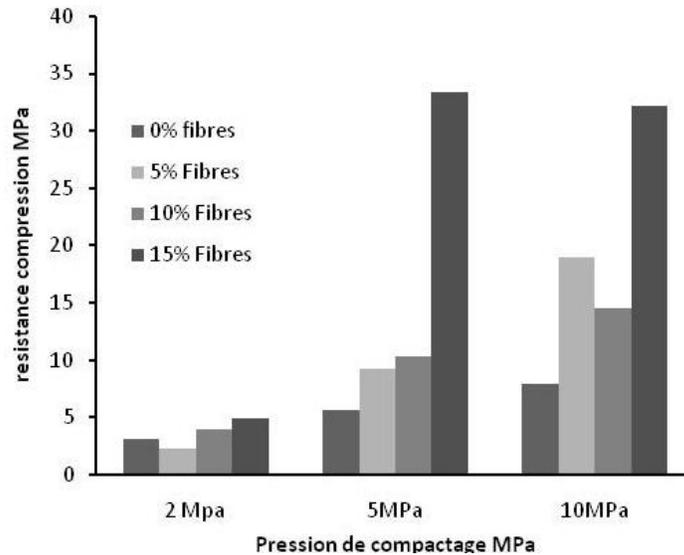


Figure 45 Résultats, à la compression des échantillons sans ciment

En outre, nous constatons aussi que les échantillons renforcés par FPD sont soumis au même effet du compactage. Nous pouvons conclure que la résistance à la compression augmente bien en fonction de la charge de compactage. L'amélioration de la résistance en fonction de la charge de compactage, de 2 à 10MPa est attribuée à une densité élevée variant de 1218 à 2061 kg/m³, à une teneur élevée en argile et en sable, à une grande surface spécifique des argiles et surtout à une bonne homogénéité des petits grains.

Comme il faut noter que ces résultats sont en accord avec les résultats de Taalah et al (B.Taalah et al., 2014), dont les travaux ont mis en évidence l'effet de la charge de compactage sur la résistance à la compression.

Tableau 6 resultats des écrasements à la compression

Echantillons	Densité ρ (kg/m ³)	Resistance à la compression R _c (MPa)
0F2P	1852,63	3,074
0F5P	1945	5,62
0F10P	2061,4	7,951
0F5C5P	1934,62	9,24
0F5C10P	2032	17
5F5C5P	1587,16	
5F2P	1486,15	2,31
5F5P	12050	9,25
5F10P	1639	10,35
10F2P	1240	4,011
10F5P	1377	10,34
10F10P	1376,92	14,58
10F5C10P	1427	11,07
15F2P	1414,29	4,9
15F5P	1297,02	33,56
15F10P	1218,33	32,19

- **Cas des échantillons stabilisés au ciment**

Pour les échantillons stabilisés au ciment, la figure 47 montre que l'effet du compactage n'est nettement remarquable que sur les échantillons sans FPD. Cependant, l'écart entre les résultats à 5MPa et ceux à 10MPa est de 45%. En effet, les fines particules de ciment remplissent les vides et baissent le taux de porosité. Par ailleurs, beaucoup de chercheurs ont rapporté l'effet qu'apporte le ciment sur la résistance à la compression du matériau en terre (B.Taallah & A.Guettala, 2016; Guettala et al., 2006; MEUKAM, 2004). En

revanche, les échantillons renforcés par FPD présentent des résultats relativement faibles par rapport aux échantillons sans FPD.

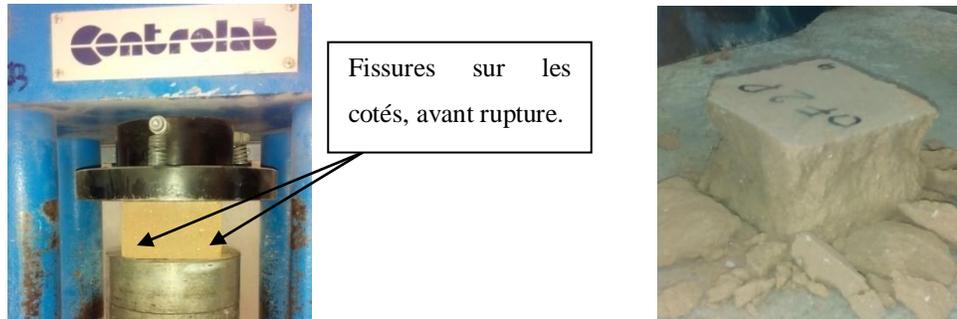


Figure 46 un échantillon avant et après rupture, source : Auteur

Les valeurs obtenues sont très proches les unes aux autres, à 5MPa qu'à 10 MPa, et sont acceptables. En effet, ceci est dû à la mauvaise adhésion des fibres végétales aux particules fines de ciment et aussi au taux, relativement important, de fibre contenue dans les mixtures.

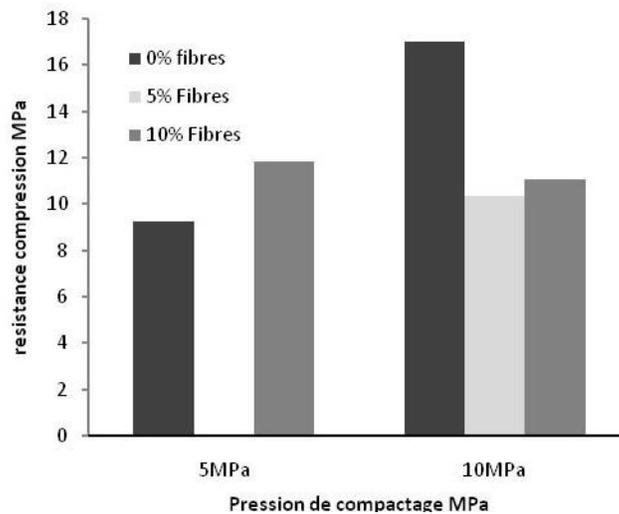


Figure 47 Résultats des tests à la compression des échantillons stabilisés au ciment. Source : Auteur

III.4.1.2 Effet de la fibre FPD sur la résistance à la compression

La figure.48 illustre que les échantillons renforcés par des FPD ont,

clairement, des résultats plus performants par rapport à ceux qui ne le sont pas. La résistance à la compression augmente avec la teneur en FPD. L'augmentation du taux de FPD de 0% à 15% a entraîné une augmentation du pourcentage de résistance à la compression de 30%, 84% et 83% respectivement pour des charges de compactage de 2, 5 et 10MPa. Il faut souligner que les échantillons soumis aux forces de compressions ont subi un amincissement des épaisseurs dû à la présence de fibres. Dans ce cas, une augmentation de la résistance à la compression se produit parce que les fibres peuvent supporter des contraintes de plus en plus importantes(H.Binici et al., 2005), et renforcer la matrice avec succès. Ce comportement peut être attribué à la nature rugueuse de FPD, permettant l'adhésion entre la fibre et la matrice probable (B.Agoudjile et al., 2011). Cependant, les fibres améliorent la structure du matériau en terre et par conséquent les couches d'interface des matériaux fibreux augmentent la résistance à la compression. Comme on note, aussi, que les fibres agissent pour inter verrouiller les particules et les groupes de particules dans une matrice cohérente unitaire, ce qui permet d'augmenter les propriétés de résistance du matériau en terre (Z.Jamellodin, Z.Talib, R.Kolop, & Noor, 2010).

D'après les essais effectués, en particulier, sur les échantillons contenant des taux de fibres FPD 5% et plus, on constate que les échantillons renforcées par FPD sont ductiles et résistantes et peuvent stocker plus d'énergie élastique. Ces résultats sont en accord avec les résultats de H.Binici et al. (2005), qui ont conclu que la présence de fibres végétales augmente la résistance à la compression.

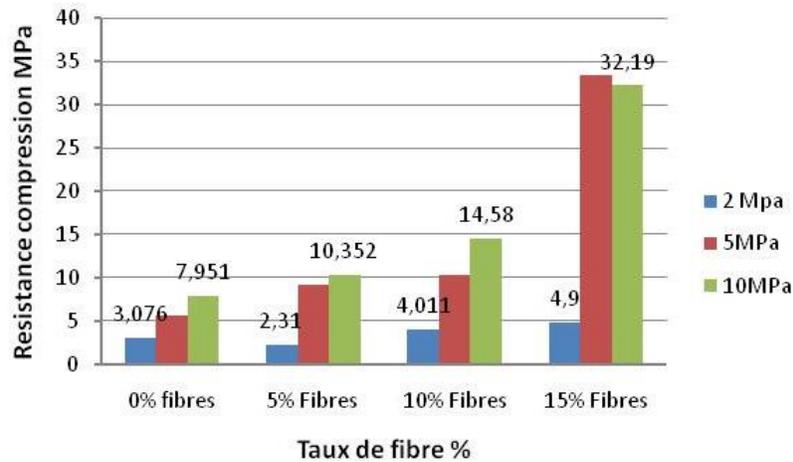


Figure 48 Résultats des tests à la compression en fonction des taux de fibres. Source : Auteur

Par ailleurs, ces résultats sont aussi concordantes aux conclusions des auteurs de (F.Aymerich et al. (2012) qui ont conclu que le renfort fibreux végétal améliorerait grandement la ductilité et l'absorption d'énergie. En revanche, les résultats sont en contradiction avec ceux trouvés par (B.Taallah and A.Guettala (2016), qui ont montré, à l'inverse, que l'augmentation de taux des fibres dans la matrice entraîne une diminution de la résistance à la compression, ce qui est dû probablement à la faible cohésion entre la fibre et la terre.

III.4.2 Conductivité thermique

Le tableau7 donne les résultats des mesures de la conductivité thermique pour 0%, 5%, 10% et 15% de charge de FPD. Nous constatons que la conductivité thermique diminue à mesure que la teneur en FPD augmente. En outre, l'augmentation du taux FPD, de 0% à 15%, a entraîné une diminution de 71,57% de la conductivité thermique par rapport aux échantillons sans FPD. Ceci concorde au travaux de (T.Ashour, H.Georg, and W.Wuc (2011) qui ont affirmé que la conductivité thermique diminue

tout en augmentant le taux de fibres végétales (orge ou blé).

Par ailleurs, (M.Dondi et al. (2004) ont rapporté que la présence de fibre végétale entraîne une forte variation de la conductivité thermique, une augmentation de la porosité ouverte, une baisse de densité apparente et contribue à améliorer les performances thermiques. En effet, la porosité et la densité apparente sont deux facteurs qui semblent affecter la conductivité thermique.

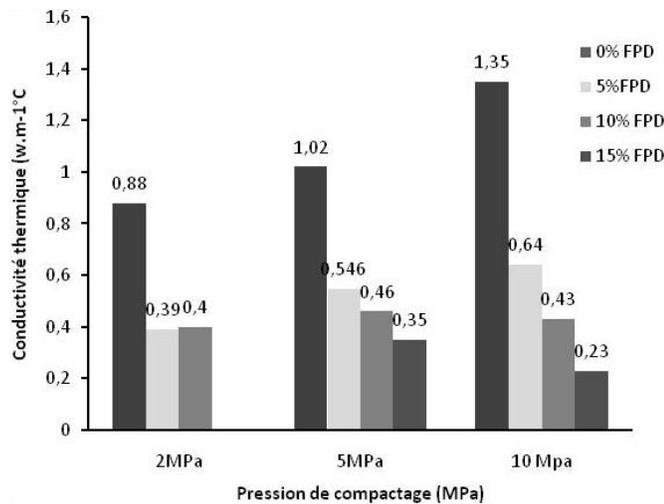


Figure 49. Conductivité thermique en fonction du compactage,
(cas non stabilisés au ciment) source :Auteur

Sachant que les échantillons sont compactés à trois niveaux de paliers : 2MPa, 5MPa et 10 MPa. Les résultats montrent que pour une même pression de compactage la conductivité thermique est inversement proportionnelle à la teneur en FPD. Pour le compactage de 5MPa, les valeurs de la conductivité thermique varient de 0,35, 0,46, 0,5 et 1,02 $W.m^{-1}K^{-1}$ correspondant à la teneur en fibres: 15%, 10%, 5% et 0%, soit une variation très nette, mettant en évidence l'effet de la FPD. Cela peut s'expliquer par la faible conductivité thermique de la fibre de palmier dattier 0,08 $W/(m.K)$ (B.Agoudjile et al., 2011), de plus, l'ajout de fibres qui génère des vides et

par conséquent augmente la porosité.



Figure 50 Dispositif de mesure de la conductivité thermique. Source :Auteur

En outre, la figure 49 illustre que pour les échantillons à 0% de FPD, la conductivité thermique augmente de 35% lorsque la pression de compactage passe de 2 à 10 MPa. Par contre, pour les échantillons à 5% et 10% de FPD, la conductivité thermique augmente respectivement de 39% et 13%. En effet, l'augmentation de la contrainte de compactage induit une augmentation de la surface de contact entre les grains de la matrice. Par conséquent, le transfert de chaleur à travers la phase solide s'améliore et les échantillons compactés à basse pression ont donc des conductivités thermiques plus faibles que celles compactées à haute pression.

Sachant qu'un matériau à base de terre est poreux et bi phasique, qui comprend une phase solide et une phase gazeuse à l'état sec. Sa conductivité thermique dépend de la conductivité thermique des deux phases (M.Dondi et al., 2004).

Tableau 7 Récapitulation des résultats des paramètres thermiques

	Densité kg.m ⁻³	λ (w.m ⁻¹ k ⁻¹) conductivité thermique	Chaleur spécifique	Diffusivité
0F2P	1835 ± 92	0.88 ± 0.04	1109,94	4,29482E-07
0F5P	1929 ± 96	1.02 ± 0.05	1028,22	5,14129E-07
0F10P	2044 ± 102	1.35 ± 0.07	946,60	6,96252E-07
0F5C5P	1917,28	0,99 ± 0,05	1041,04	4,94914E-07
0F5C10P	2018,96	1,27±0,06	961,14	6,56787E-07
5F2P	1496 ± 75	0.39 ± 0.02	1816,26	1,44496E-07
5F5P	1514 ± 75	0.55 ± 0.03	1544,53	2,33537E-07
5F10P	1654 ± 82	0.64 ± 0.03	1341,51	2,86276E-07
5F5C5P	1495,18	0,5± 0,02	1630,36	2,03266E-07
5F5C10P	1621,44	0,43± 0,02	1600,87	1,66364E-07
10F2P	1191 ± 59	0.39 ± 0.02	2274,17	1,46163E-07
10F5P	1275 ± 64	0.42 ± 0.02	1971,70	1,83872E-07
10F10P	1477 ± 74	0.46 ± 0.02	1765,32	1,63973E-07
10F5C10P	1335,68	0,46 ± 0,02	1890,30	1,81597E-07
15F5P	1123 ± 56	0.39 ± 0.02	2578,05	1,20559E-07
1510P	1244 ± 62	0.23 ± 0.01	3050,87	5,98163E-08

Par ailleurs, l'air a une conductivité thermique très faible d'environ 0,026W/(m.K) et la FPD ajouté dans la matrice réduira le transfert de chaleur car la conductivité thermique de l'air est inférieure à celle du matériau solide; ainsi, l'augmentation de l'air à l'intérieur du matériau conduit à une diminution de la conductivité thermique. Néanmoins, certains auteurs rapportent que les valeurs de la conductivité thermique peuvent être affectées par de nombreux facteurs liés de manière plus complexe à la

microstructure et à la composition minéralogique en particulier (H.Binici et al., 2006; M.Dondi et al., 2004).

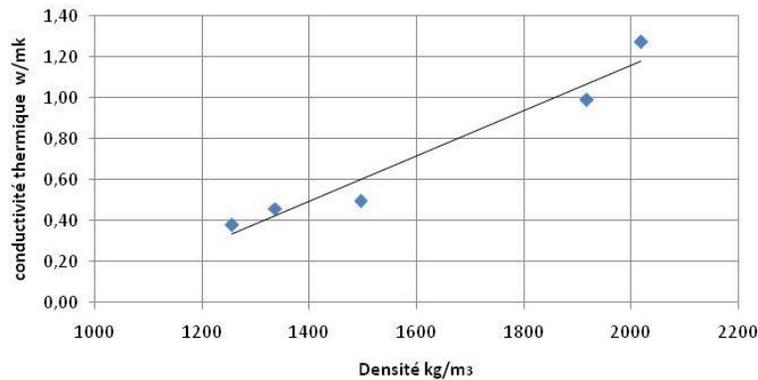


Figure 51 Conductivité thermique en fonction densité des échantillons stabilisés au ciment. Source : Auteur

Alors que, à partir de 10% de FPD, la contrainte de compactage n'influence pas considérablement la croissance de la conductivité thermique. Le tableau.7 montre que la variation de la conductivité thermique des échantillons a une tendance similaire à leurs variations de densité, par conséquent au volume du vide contenu, ceci concorde aux résultats de (H.Binici et al. (2006). De plus, la taille des pores, la teneur en eau permanente et la composition minéralogique de l'argile et d'autres additifs peuvent également jouer un rôle déterminant (M.Dondi et al., 2004; T.Ochsner, R.Horton, & T.Ren, 2001).

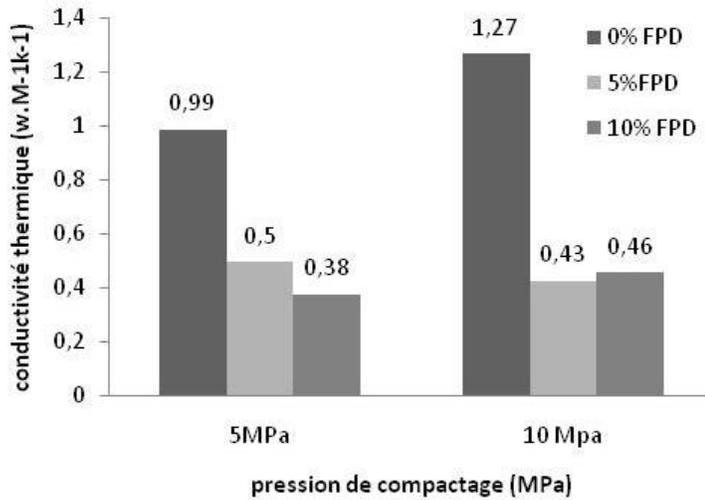


Figure 52 Variation de la conductivité thermique en fonction du compactage
(Cas des échantillons stabilisés au ciment) source : Auteur

En fin, pour les échantillons stabilisés à 5% de ciment, la conductivité thermique est en corrélation avec la densité, voir figure51, et elle est sensiblement dépendante de la FPD et du compactage, voir figure 52. Seulement, c'est à partir de 5% de FPD que la conductivité thermique est très peu dépendante. Pour le cas de 5MPa la conductivité thermique baisse de 61% quand on fait varier le taux de FPD de 0% à 10% en revanche elle baisse de 24%, seulement, quand la FPD passe de 5% à 10% ; ce qui est peu significatif.

III.4.3 Adsorption et Désorption

Le comportement hygroscopique est décrit par le processus d'adsorption des molécules d'eau sur les particules d'argile et dans une seconde phase le remplissage des microspores et des méso poreux (condensation capillaire). Toutes les figures montrent que tous les échantillons ont le même comportement hydrique. Les courbes d'adsorption augmentent avec l'augmentation de l'humidité relative. Ce phénomène indique que les

échantillons adsorbent la vapeur d'eau environnante lorsque l'humidité relative augmente. Pour tous les matériaux, les courbes isothermes obtenues sont en forme de S et peuvent être classées en type II selon la classification IUPAC (IUPAC1985) voir figure 53.

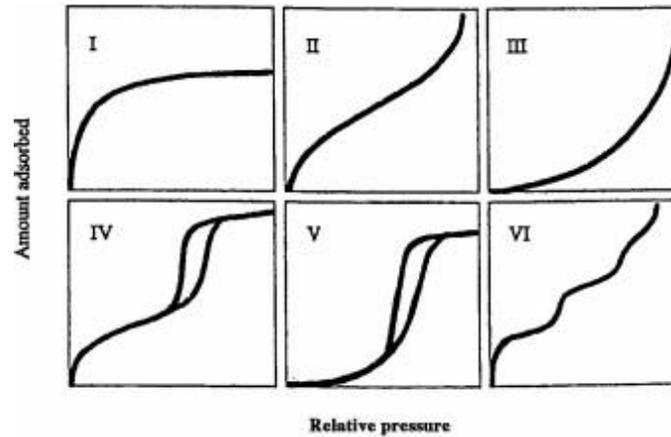


Figure 53 Classification des isothermes de sorption selon l'IUPAC

III.4.3.1 Effet des fibres de palmier dattier. FPD

Les Figures 54 et 56 illustrent que l'augmentation la plus significative de la teneur en humidité se produit pour les mixtures renforcés avec FPD. En fait, tous les échantillons renforcés avec FPD ont montré une augmentation substantielle de la teneur en humidité. Contrairement aux échantillons sans FPD, qui présentent une teneur en humidité légèrement inférieure à celle des autres échantillons. Ces résultats concluent que les fibres peuvent absorber plus d'eau que les particules de sol. Les courbes de sorption montrent que les échantillons ayant un taux élevé de FPD, 15% et 10%, présentent des valeurs plus élevées que les autres échantillons.

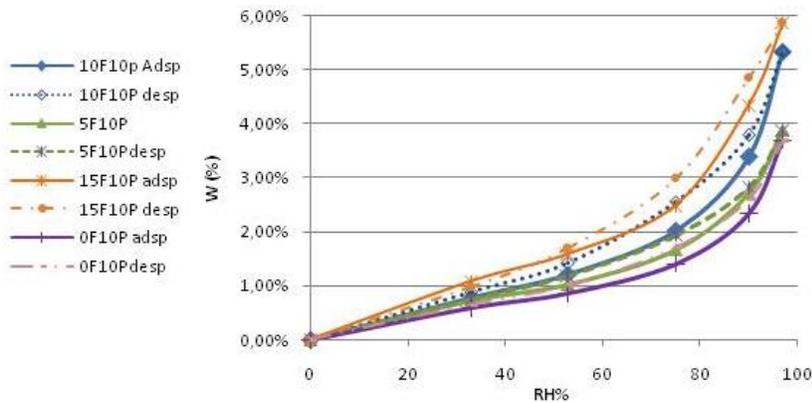


Figure 54 Isothermes de sorptions des échantillons compactés à 10MPa

La Figure 54 illustre les variations des isothermes de sorptions d'échantillons compactés à 10MPa, de différents taux de FPD (0%, 5%, 10% et 15%). En outre, les échantillons ont été soumis à différents paliers de HR (33%, 43%, 53%, 73%, 90% et 97%). Les résultats montrent que la quantité de vapeur d'eau absorbée augmente à mesure que l'humidité relative augmente et que tous les échantillons ont une capacité de sorption élevée. A basse pression (33% - 53%), les échantillons à 15% et 10% de FPD ont une absorption nettement importante et atteignent 1,5%. Contrairement à l'échantillon non renforcé FPD, qui présente une sensibilité plus au moins faible, moins de 1% à 53% HR, par rapport aux cas renforcé par FPD. Ce comportement est dû au processus d'adsorption des molécules d'eau à la surface des composants (argiles, fibres) et lorsque l'humidité relative dépasse 53% RH, l'adsorption de la surface multicouche se produit, cependant la condensation capillaire aura lieu dans les pores étroits. La teneur en eau atteint un maximum, à HR 97%, de 5,87% et 5,33% respectivement aux cas : 15F et 10P, ce qui représente une absorptivité très importante.

De cette façon, l'humidité hygroscopique peut être stockée en phase liquide à l'intérieur du matériau poreux (M.Hall & D.Allinson, 2009). Il est à noter que, les échantillons à fort taux FPD ont une capacité d'adsorption élevée par rapport aux autres. Cependant, les différences des sorptions pour les échantillons à 0%, 5%, 10% et 15% de FPD lorsque l'humidité relative passe de 33 et 97% étaient respectivement: (3%, 3%, 4,5% et 5%), par conséquent l'effet d'une porosité creuse de forme tubulaire avec des capacités d'absorption très élevées des FPD est nettement claire sur la capacité d'absorption (B.Agoudjile et al., 2011).

De plus, les courbes d'adsorption et de désorption montrent un phénomène d'hystérésis peu prononcé. Cela reflète le fait qu'il est plus facile pour la vapeur d'eau de pénétrer dans un réseau poreux que de le quitter. Cela se produit en raison de l'influence du potentiel électrostatique sur le matériau poreux à l'intérieur des surfaces, ce qui entraîne une légère augmentation de la teneur en eau (w) de la courbe de désorption, notamment entre les paliers HR, 50% et 75%. L'hystérésis observée pour l'échantillon sans FPD est moins prononcé que ceux relatives aux échantillons renforcés au FPD, comme le montre la figure.45. Pour tous les échantillons, l'hystérésis la plus élevée est observée autour de 75% HR.

À une humidité relative HR élevée, autour de 75%, l'hystérésis est d'environ 0,55% pour les échantillons contenant 15 et 10% de FPD et légèrement supérieure à 0,2% pour les autres échantillons. Cette hystérésis est expliquée par la condensation capillaire, l'hystérésis de l'angle de contact et l'effet de la bouteille d'encre. Ainsi, il peut être attribué d'une part à la présence de microspores et d'autre part à l'absorption irréversible de molécules dans les pores (ou par les pores) de la même largeur que celle de l'adsorbat (F.Collet et al., 2013).

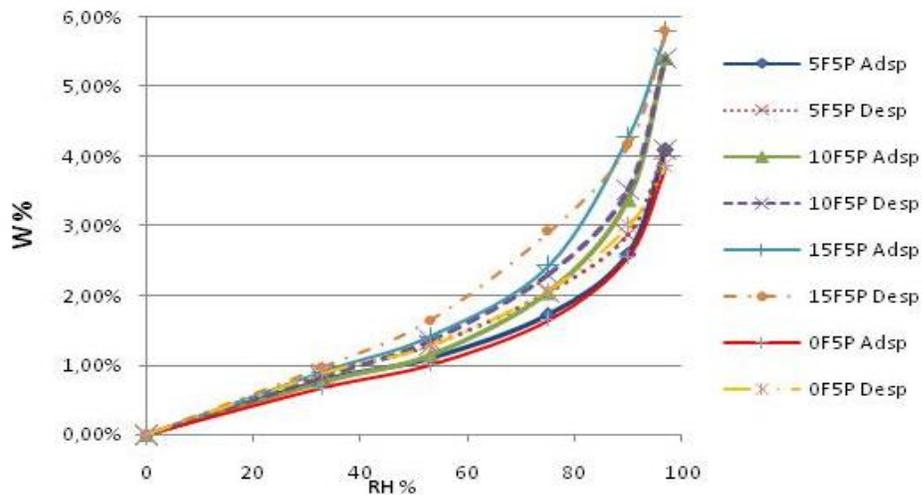


Figure 55 Isothermes de sorptions des échantillons compactés à 5MPa

La figure 55 illustre les isothermes de sorption des échantillons soumis au compactage 5MPa. A première vue, il est remarquable que les courbes des isothermes soient clairement distinctes, à l'exception de deux: 0F5P et 5F5P qui s'adhèrent notamment à la phase de condensation capillaire. Cependant, la teneur en eau atteint, pour les échantillons au taux de fibres de 0%, 5%, 10% et 15%, respectivement, lorsque l'humidité relative passe de 33% à 97%, (3,85%, 4,08%, 5,4% et 5,85%). A cet effet, les échantillons contenant un taux élevé de fibres (10% et 15%) présentent une capacité d'absorption d'humidité très élevée, en particulier aux pressions élevées (75% - 97%) où l'absorption atteint: 5% et 6%. En effet, l'effet des fibres végétales sur la capacité d'absorption des composites a été rapporté par de nombreux chercheurs (B.Haba et al., 2017; M.Hall & D.Allinson, 2009).

La Figure55 montre également une hystérésis maximum de 0,48% autour du HR 75%, et en revanche, on constate de faibles valeurs, d'hystérésis, pour les autres paliers de HR. Ce même comportement est également noté sur la figure54 précédente, ceci est dû au fait que les échantillons sont faits

des mêmes matières, à savoir terre et FPD, et avec une différence de compactage.

Pour les courbes de sorption et de désorption des échantillons comprimés à 2MPa. Il convient de noter qu'ils présentent le même comportement que ceux présentés dans les figures précédentes, plus la teneur en FPD de l'échantillon est élevée, plus sa teneur en eau est élevée. Ainsi, les échantillons renforcés avec FPD sont plus hygroscopiques que les non renforcés.

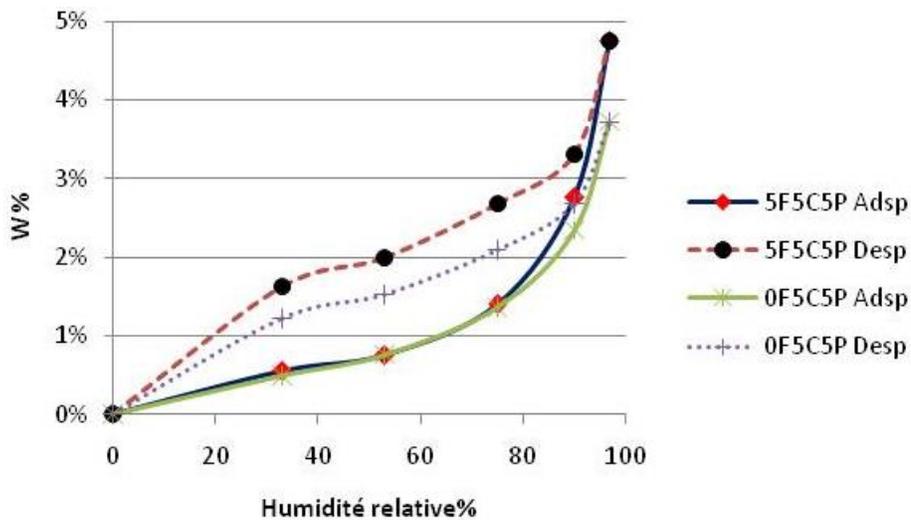


Figure 56 isotherme de sorption pour échantillons stabilisés (5%) et compacté 5MPa

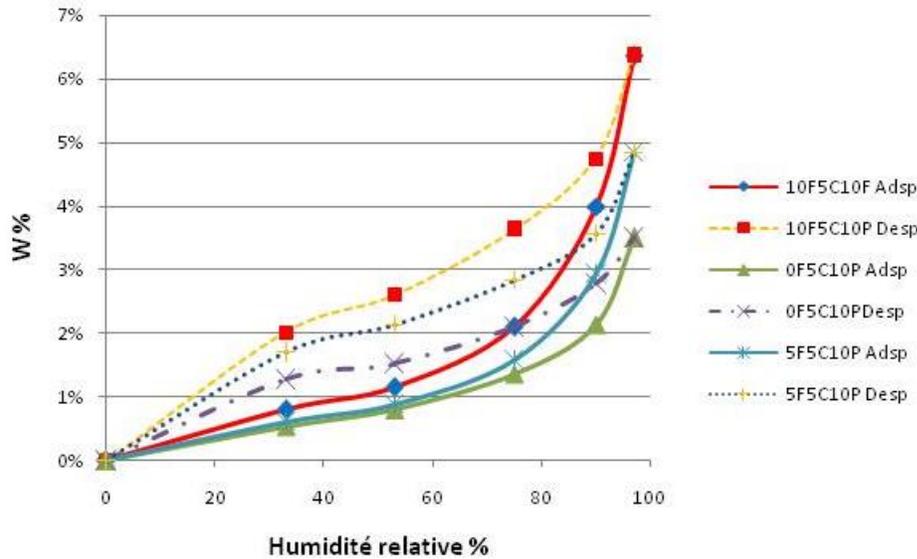


Figure 57 isotherme de sorption pour échantillons stabilisés (5%) et compacté 10MPa

Pour les cas d'échantillons stabilisés à 5% de ciment, les figures 56 et 57 illustrent des comportements similaires aux cas renforcés uniquement par FPD, avec une capacité d'absorption importante, atteignant plus de 6%. Les résultats montrent qu'on se rapprochant de HR 80% les quantités d'eau augmentent fortement, surtout pour les cas contenant 10% de FPD et plus. Par conséquent, l'augmentation de la quantité de FPD induit une augmentation des teneurs en eau. Pour une humidité relative égale à 97%, la teneur en eau maximale des échantillons renforcés (FPD) et stabilisée au ciment atteint 6,45 ; 5,9 et 3,5 % pour un taux en FPD égale respectivement à 10%, 5%, et 0% (figure 57). En effet, pour les échantillons sans FPD, l'addition de ciment favorise l'hydratation qui réduit les espaces entre les particules de terre dans les matériaux, et par conséquent les espaces par lesquels l'eau s'infiltré dans le matériau. Il en résulte une baisse de l'absorption d'eau par les échantillons de terre stabilisée.

Par ailleurs, nous constatons des comportements similaires, des différents échantillons, entre 33 et 75%HR. Cependant, au-delà de 80% d'humidité relative, les différences en termes de porosité et réseaux poreux vont avoir un effet sur l'apparition ou non d'effets bouteille d'encre engendrant des aires d'hystérésis plus importantes (F.El Fgaier et al., 2016). Nous pouvons alors constater que l'aire d'hystérésis entre les courbes de sorption et désorption est plus importante pour les matériaux renforcés par FPD. De plus, l'ajout du ciment induit une hydratation qui contribue à amplifier le phénomène de l'hystérésis, en atteignant 1,5%. A titre de comparaison le béton, matériau cimentaire, a une différence maximale de 7% entre la courbe de sorption et celle de désorption pour le palier à 80% d'humidité relative (AUBERT, 2013). Ceci met en évidence le caractère hydropique des différents matériaux étudiés. La stabilisation en ciment montre un léger freinage hygrothermique, sous effet d'hydratation.

Le phénomène hystérésis peut être associé aux condensations capillaires qui ont lieu dans les structures poreuses (F.El Fgaier et al., 2016). En effet, l'eau est condensée dans les pores et se retrouve ainsi piégée et l'évaporation capillaire se produit pour de plus faibles pressions relatives auxquelles la vapeur d'eau devrait être libérée.

Enfin, à travers les résultats obtenus, il convient bien de noter que l'effet des fibres, FPD, est plus important que le compactage. En effet, les fibres affectent la vitesse d'absorption et la sensibilité à l'humidité, car l'ajout de fibres génère des vides, provoquant ainsi une augmentation de la porosité.

Ceci révèle que les fibres, FPD, peuvent influencer la taille et la structure des pores plus que la compaction. On peut expliquer que les pores présents dans les échantillons peuvent inclure des micropores ou des méso pores qui s'interconnectent pour former un pore semblable à une fente (L.Zhang et al.,

2017). Alors que les courbes d'absorption augmentent rapidement dans la phase d'humidité relative élevée, démontrant que les pores existants dans les échantillons peuvent être composés de pores irréguliers et par conséquent qu'il n'existe pas de structure de pores uniforme dans les différents mélanges d'échantillons.

III.4.4 Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau présente une grande importance pour les matériaux. Il est en effet avantageux, dans certains cas, d'avoir un matériau perméable qui permette une transmission de vapeur d'eau au lieu de favoriser, par son imperméabilité, des phénomènes de condensation.

En revanche, dans certains cas, un matériau imperméable à la vapeur d'eau peut être préférable en raison de l'influence déterminante de l'eau sur son efficacité thermique.

La perméabilité à la vapeur d'eau a été mesurée en utilisant deux méthodes, la coupelle humide et la coupelle sèche. Le tableau... illustre les résultats des tests effectués. Les résultats ont montré que ceux obtenus par la méthode de coupelles humides étaient plus élevés que ceux de coupelles sèches.

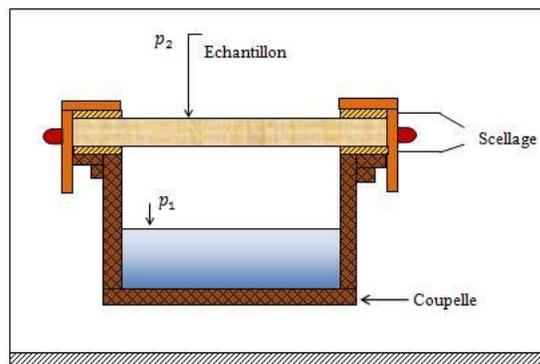


Figure 58. schéma de Principe d'une coupelle pour mesure de perméabilité à la vapeur d'eau

Source :Auteur

Cela peut s'expliquer par les paramètres de transport de vapeur d'eau mesurés dans la configuration de la coupelle humide comprennent partiellement le transport hydrodynamique de l'eau condensée capillaire dans le système de pores en plus de la diffusion de la vapeur d'eau en vrac.

Malgré la densité élevée des échantillons étudiés, les résultats obtenus sont corrélés à leur comportement mécanique et montrent de très faibles valeurs de facteur de résistance à la diffusion.

Comparés à d'autres valeurs relatives à certains matériaux de construction, tel que le béton ; les échantillons restent très perméables et leur perméabilité à la vapeur d'eau est similaire à celle des matériaux poreux, tel que le béton de chanvre-chaux et le béton cellulaire.

Il est possible de comparer ces valeurs aux résultats obtenus par plusieurs chercheurs. Cependant, nos résultats obtenus sont proches de ceux obtenus par (B.Haba et al., 2017; H.Cagnon et al., 2014; Oudhof et al., 2015; Touré et al., 2017). La perméabilité à la vapeur d'eau de la brique de terre renforcée par FPD est égale ou supérieure à celle des autres matériaux de construction dans les coupelles sèches et humides. Cette performance constitue un bon indicateur de leur utilisation en tant que matériau thermiquement performant. Par ailleurs, on constate que la perméabilité à la vapeur d'eau est élevée pour les échantillons renforcés au FPD. Cela signifie que les fibres utilisées ont rendu la structure des pores moins tortueuse (pores plus larges et plus continus). Cependant, les échantillons sans FPD sont devenus moins perméables (μ résistance à la vapeur élevée) où il semble que l'absence de fibres entraîne une diminution de la porosité, ce qui peut entraîner la perte de certaines macropores.

Tableau 8 Perméabilités à la vapeur d'eau et résistances à la diffusion des différents échantillons en terre

Echantillons en terre	Coupelles sèche		Coupelles humides		Littérature	
	δ	μ	δ	μ	δ	μ
	(kg/s.m.Pa) x 10^{-11}		(kg/s.m.Pa) x 10^{-11}		(kg/s.m.Pa) x 10^{-11}	
0F2P	2.45	8	4.59	4	6,81 (Labat, Magniont, Oudhof, Aubert, & Environment, 2016)	2.92
0F5P	1.43	14	3.73	5	1,3(H.Cagnon et al., 2014) coupelle sèche	14
0F10P	1.08	18	2.20	9	2,7 (H.Guillaud, T.Joffray, et al., 1995) coupelle humide 2,7 (Oudhof et al., 2015) Coupelle humide	7 7
5F2P	2,52	8	2.80	7		
5F5P	2.21	9	4.21	4		
5F10P	1.96	10	3.93	5		
10F5P	1.94	10	3.83	5		4.4 (B.Haba et al., 2017) Coupelle sèche
10F10P	2.30	8	/	/		

III.5 Conclusion

Cette étude vise à déterminer les propriétés hygrothermiques et le comportement mécanique des briques de terre compactées renforcées par

des résidus de palmiers dattiers (FPD). Les résultats ont montré que les (FPD) affectent de manière significative les propriétés mécaniques du composite lors du compactage. La conductivité thermique a montré une forte dépendance vis-à-vis de la densité ainsi que de la concentration en fibres de palmier dattier et du niveau de compaction. Les meilleurs résultats peuvent être observés sur les composites avec 10% de teneur en fibres et 10MPa de compactage, en ce qui concerne l'application de l'isolation thermique. Bien que, la conductivité thermique est la qualité principale recherchée, la forte inertie thermique générée par une faible conductivité couplée à, une densité apparente et une chaleur spécifique élevée, reste le paramètre déterminant pour une meilleure performance énergétique.

En ce qui concerne les isothermes de sorption, les composites avec des fibres de palmier dattier montrent une absorption meilleure, atteignant 6%. En effet, les briques en terre dans cette étude ont une plus grande capacité d'adsorption pour stabiliser et réguler l'humidité relative intérieure.

CHAPITRE 4

SIMULATION D'UNE ENVELOPPE DE CONSTRUCTION EN MATÉRIAUX DE TERRE

IV.1 Introduction

Le comportement hygrothermique des enveloppes de construction est l'un des facteurs majeurs déterminant le confort intérieur des occupants. L'enveloppe protège l'occupant des conditions climatiques extérieures. Une enveloppe de construction est exposée à deux conditions climatiques différentes qui peuvent être à l'origine des transferts hygrothermiques à travers ses différents composants : La différence de température et d'humidité entre ses deux faces génère un phénomène de transfert de chaleur et de masse.

Pour les matériaux hygroscopiques tels que la terre, l'eau est contenue sous forme de vapeur où peut être sous forme liquide ; ce changement de phase engendre des transferts d'humidité et de chaleur.

Prédire le comportement des enveloppes nécessite une analyse par simulation. La plupart des modèles élaborés ont presque la même origine : les lois de Fourier, de Fick et de Darcy. La première traite le transfert de chaleur et la seconde traite aussi le déplacement de l'eau sous formes vapeur ou liquide, dans une paroi de construction simple ou composée.

Après avoir déterminé les caractéristiques thermo physique des matériaux constitués essentiellement de terre, de fibre de palmier dattier et de ciment, nous allons constituer des enveloppes en utilisant les matériaux déjà définis, soit en enveloppe simple parois où en enveloppe composée de multicouches, évaluer leurs performances énergétiques et faire une comparaison des résultats relatives aux différentes enveloppes.

Pour ce faire, nous avons adopté de simuler en utilisant l'outil TRNsys.v17, en raison de ses multiples avantages : sa grande flexibilité d'utilisation, son approche très scientifique et sa grande utilisation chez la communauté scientifique et aussi pour sa disponibilité.

Par ailleurs, nous devons souligner qu'en littérature, il a été rapporté des écarts entre les résultats mesurés et simulations numériques des matériaux hygroscopiques dans plusieurs projets de recherches. Ces écarts ont été attribués à la complexité des problématiques.

IV.1.1 Outil de simulation, (TRaNsient SYstem Simulation program) programme de simulation des systèmes en régimes transitoires.

TRNSYS est un logiciel de simulation dynamique développé par l'Université de Madison aux Etats-Unis. Trnsys Simulation Studio est un environnement de simulation complet permettant de simuler le comportement d'un système complexe et extensible dédié à la simulation dynamique des systèmes, y compris les bâtiments multizones. Trnsys est actuellement la référence du point de vue de la simulation dynamique de systèmes et de bâtiments. Il permet aussi la simulation dynamique du comportement énergétique d'une enveloppe de bâtiment et de ses composants et équipements (chauffage, climatisation), en tenant compte de l'architecture, de la nature des matériaux utilisés, et du concept énergétique choisi.

IV.1.2 Environnement et outils composants TRNsys

TRNsys studio fait le lien entre TRNSYS et le schéma de principe du projet à modéliser (voir figure...). Sa fonction fondamentale sera de résoudre l'ensemble des équations dans les conditions de sollicitations. TRnsys contient des composants sous forme de modules permettant de mieux

repartir le travail de la modélisation aux résultats. On peut citer les composants et outils suivant :

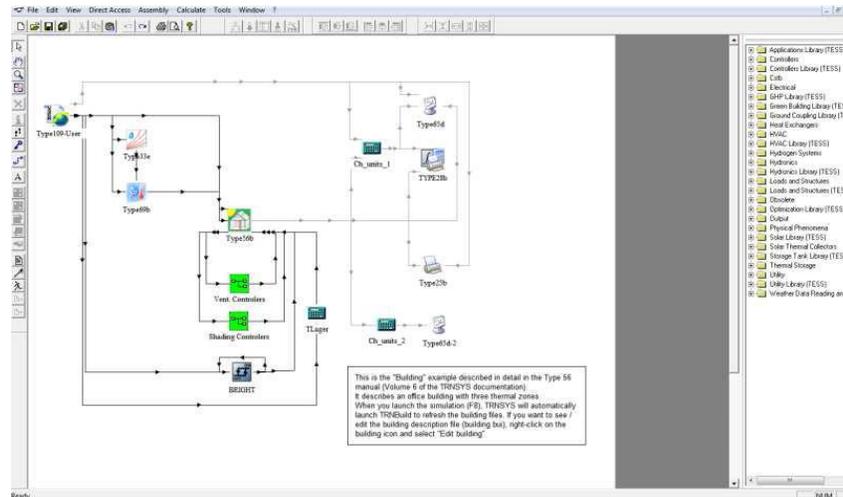


Figure 59 Schéma de fonctionnement de TRNSys, source auteur

TRNBuild : un module de saisi des données de la construction à étudier. Il nous permet de déterminer les scénarios pour notre bâtiment : la composition de l'enveloppe, le système de chauffage et de climatisation, le système de ventilation, les infiltrations...etc. D'autre part, Il nous permet de sélectionner les sorties « outputs » et définir de nouvelles entrées « inputs ».

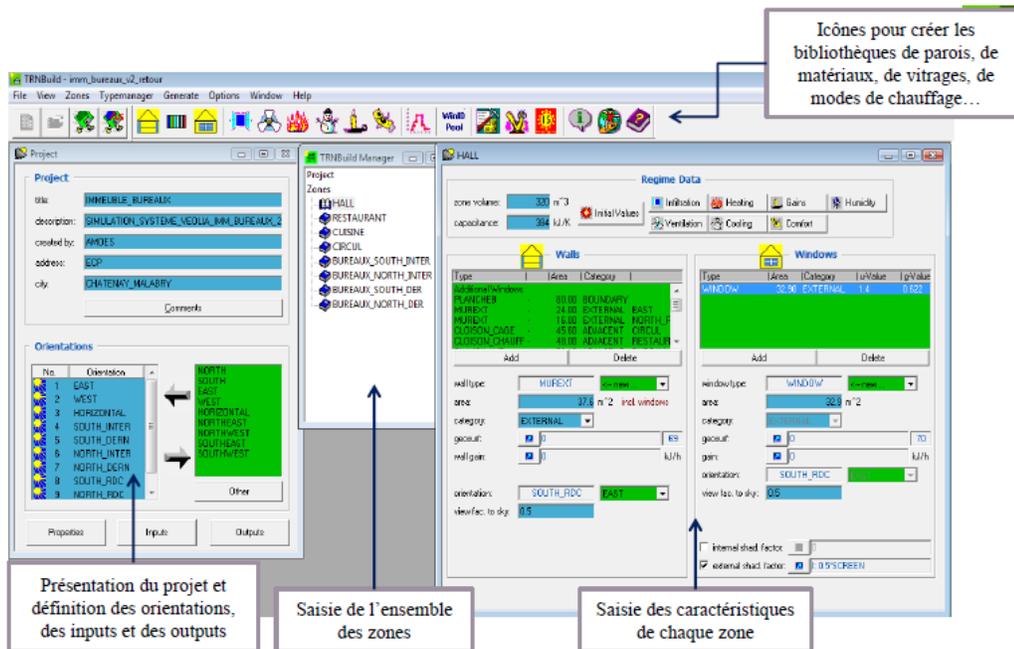


Figure 60 l'interface de l'application TRNBUILD pour décrire le bâtiment. Source auteur

TRNSYS Studio :

C'est un outil qui contient la bibliothèque des types. Il simule, en régime transitoire, les bâtiments (mono ou multizone). Comme il peut définir les liens entre les types et faire les liens entre eux. Aussi, Il détermine également, les entrées et les sorties de chaque type, ainsi que la période de simulation.

TRNEdit : un éditeur du programme de simulation, TRNsys.

TRNSYS3D plugin de Google Sketch-up:

Programme permettant de définir le modèle énergétique, les zones thermiques et les masques solaires. Il permet à l'utilisateur de créer la volumétrie et la géométrie de la construction d'une manière graphique et sous interface à manipulation facile.

Les types utilisés pour la simulation des constructions mono ou multizone sont réparties en trois catégorie distinctes :

- **Utilitaires :** Type 25, Type 65, Type 15, Type 56 ...etc.

Ex : lecteur de données, imprimante, traceur de courbes

- **Equipement :**

Ex : tour de refroidissement, capteur solaire, pompe, ventilateurs

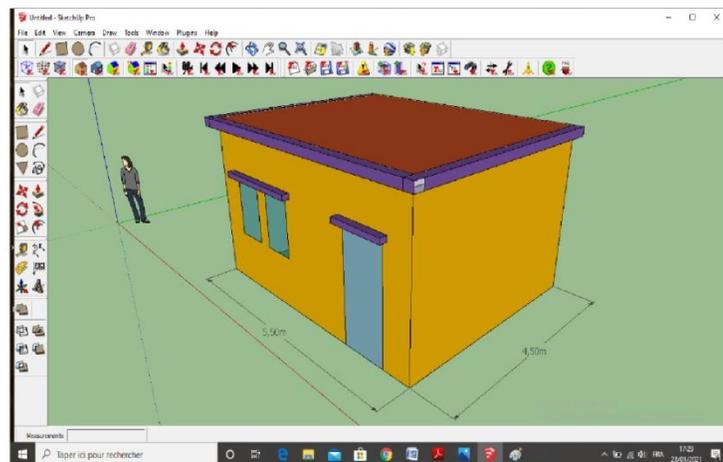
- **Phénomènes Physiques :** Type 16, Type 34

Ex : psychométrie, processeur de rayonnement

IV.1.3 Modélisation pour simulation à partir de TRNsys :

IV.1.3.1 Détermination de la zone thermique sous Trnys3d

Notre objectif est d'étudier les performances énergétiques des enveloppes en terre. Pour ce faire, nous avons opté pour une construction simple mono zone dont les dimensions sont définies comme indiqué sur Annexe III. De plus, nous l'avons considérée comme une construction qui endosse un talus de terre pour reprendre l'allure des constructions qu'on trouve souvent en région des Aurès.



IV.1.3.2 Introduction des Données météo :

Les données météorologiques sont très importantes pour obtenir de bons résultats fiables.

Les données climatiques des deux sites choisis, M'chouneche et Ichmoul, sont déduites par la base de données Métronome 7. Ces dites données sont obtenues par méthode d'interpolation car les données des deux sites ne figures pas dans la base de données prédéfinie.

Les fichiers sont généralement de type tmy2 (typical meteorological year version 2).

IV.1.3.3 Détermination des « Outputs », résultats souhaites de TRNsys :

Plusieurs sorties optionnelles sont offertes par Trnsys, de type 56, peuvent être spécifiées par l'utilisateur. Elles sont définies sur la liste de l'outil TRNbuild, après avoir sélectionné au préalable la zone à simulée.

Les données choisies sont définies a partir des objectifs de notre travail, qui concerne la performance énergétiques des enveloppes en terre. Nous avons choisi ce qui suit :

TAIR : température d'air intérieur

TSO : températures surfaciques extérieures des murs sud et ouest.

TSI : températures surfaciques intérieures des murs sud et mur ouest.

Q HEAT : besoins pour chauffer l'espace.

Q COOL : besoins pour refroidir l'espace.

RELHUM : Humidité relative intérieur.

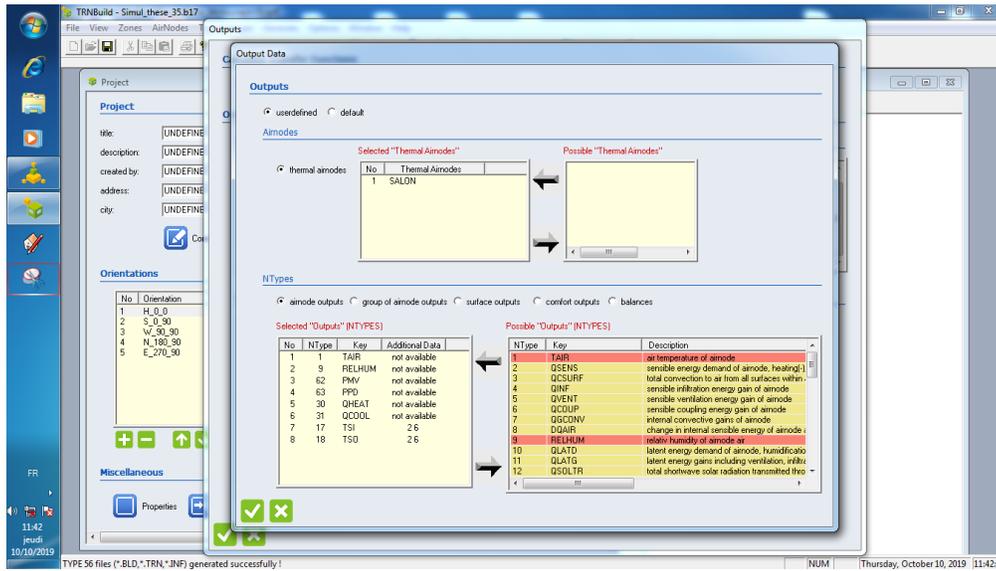


Figure 61 Choix des outputs et zone objet de simulation. Source auteur

IV.1.3.4 Lancement de la simulation :

La dernière étape consiste à lancer la simulation par l'outil simulation studio. Il fait un lien entre tous les types composant le schéma général. Cette étape est déterminante ; elle définit les sorties (outputs) ainsi que les entrées (Inputs) de chaque calcul à effectuer.

Enfin, dans notre étude certains paramètres ont été fixés tels que : l'orientation de la construction, la géométrie de la construction, les matériaux utilisés avec leurs paramètres thermo physique, et ainsi le scénario adopté.

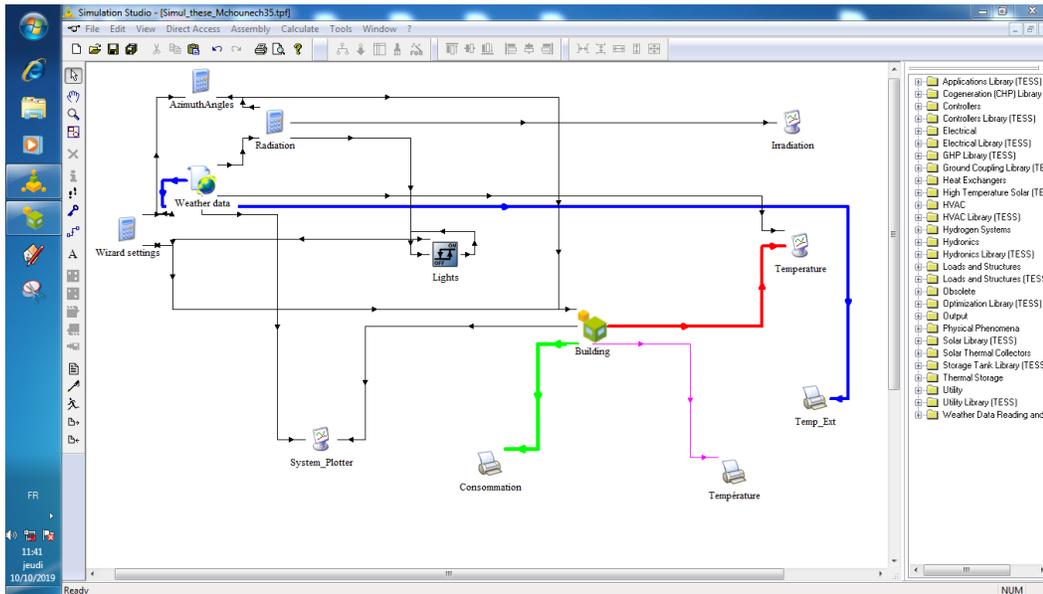


Figure 62. Schéma de calcul de Températures. Source : auteur

Ensuite, on ne fera que changer et varier la composition des matériaux de l'enveloppe extérieure. Afin de nous permettre d'évaluer l'influence de certains paramètres constituant les matériaux mis en œuvre dans cette étude sur la performance énergétique de l'enveloppe, et estimer les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation.

Enfin, on a formulé six compositions : 0F10P, 0F5C10P, 0F5C5P, 0F5P, composition 1 et composition 2 (que nous détaillerons ci-dessous).

IV.2 Présentation des sites choisis

Le massif des Aurès (L'Aurès), est un domaine géographique particulièrement montagneux situé au Nord-est de l'Algérie. Il présente une topographie variée, allant des altitudes atteignant les 2328 m (Mont Chélia) aux vallées et plaines d'altitudes basses, environ 200M aux abords de Biskra.

Les populations Chaouis occupent des décheras qui furent des lieux de refuge, vu le caractère rocheux et accidentés des sites. En outre, il est aussi remarquable de noter que les populations chaouis préservent les terres agricoles et construisent sur des terrains rocheux et difficiles d'accès, un concept écologique et durable.

L'architecture des constructions est parfaitement intégrée à son environnement, soit par l'utilisation des matériaux issues de l'environnement immédiat (terre, pierres et bois), soit par une adaptation harmonieuse aux irrégularités des sites, souvent très accidentées.

L'Aurès se caractérise par trois climats distinctifs :

- Un climat très rude en hiver, modéré en été dans les régions montagneuses centrales.
- Un climat modéré en hiver, chaud et sec en été dans les steppes sahraouies du sud.
- Un climat très froid en hiver, sec en été dans les hautes steppes au nord.

Cette diversité climatique a donné à la région Aurassienne un penchant naturel multiple conférant des spécificités non négligeables.

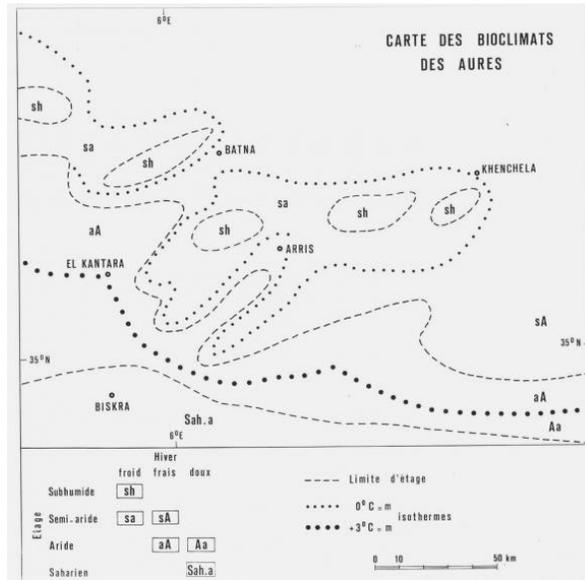


Figure 63 carte des bioclimats des Aurès source : (E.B. et J.-L. Ballais, « Aurès », Encyclopédie berbère, 7 | 1989, 1066-1095.)

IV.2.1 Choix des lieux pour les simulations :

La diversité climatique et topographiques des Aurès nous mènes à choisir deux sites distincts par leur altitudes et leur climats différents. Ichemoul, site situé à plus de 2000m, est caractérisé par un climat de montagne ; hiver rude et été modéré. Par contre, M'chouneche situé à 329m d'altitude, est une agglomération distinguée par sa palmeraie et son climat semi-aride, sec en été et modéré en hiver. Ce choix nous permettra de tester nos matériaux à des conditions climatiques différentes, et enfin voir leurs performances par rapport à deux climats contrastés.

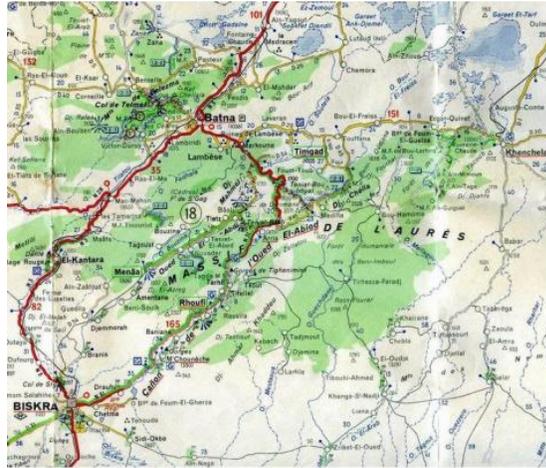


Figure 64. Situation géographique des deux lieux choisis. Source: auteur

Pour cela, et en réponse aux questionnements de la problématique et afin de vérifier les hypothèses, nous avons choisi de modéliser une pièce d'habitation, sous le programme Trnsys 3d, et effectuer la simulation par l'outil, studio simulation de Trnsys.

Ceci nous permettra d'évaluer les performances thermiques et énergétiques. Enfin, les résultats obtenus seront analysés pour confirmer ou infirmer nos hypothèses.

La bâtisse (model) est simple, RDC seulement, elle dispose, au sud d'une entrée et deux fenêtres, à l'ouest deux fenêtre identiques, par contre à l'est le mur est nu sans aucune ouverture et enfin au Nord un mur partiellement enterré. Le système structurel est constitué de murs porteurs et de dalle horizontale. Pour simuler nous varieront les épaisseurs et les compositions des murs voir tableau.

IV.2.2 Caractéristiques thermo physiques des matériaux sélectionnés pour les simulations

Le tableau ci-dessous montre les valeurs thermo-physiques choisi parmi les matériaux caractérisés, à savoir, la Conductivité thermique, la capacité et la densité, de chaque matériau utilisé dans la simulation.

Tableau 9 caractéristiques thermo-physiques des matériaux choisis pour la simulation

Matériaux	Caractéristiques thermo-physiques		
	Conductivité thermique (KJ/hmk)	Densité (Kg/m ³)	Capacité (kj /KgK)
0F5C5P	3,56	1917,28	1,04
0F5C10P	4,59	2018,96	0,96
0F5P	3,67	1929,11	1,03
0F10P	4,85	2044,28	0,95
10F10P	1,54	1477,43	1,77
10F5P	1,66	1275,03	1,97
Bois léger	0,54	500	1,20
Carrelage	6,14	2300	0,70

IV.2.3 Composition des parois et dalle, adoptées pour la simulation :

Pour effectuer les simulations, nous avons adopté deux sortes de parois, simples et composées en multicouches, à partir des matériaux sélectionnés au préalable (voir le tableau ci-dessus). En effet, nous avons essayé de maintenir un système structurel similaire au model architectural traditionnel (murs porteurs). Les murs simples sont composés uniquement d'une seule paroi dont on varie l'inertie (épaisseur), quant aux murs composés, ils sont constitués de parois juxtaposées de type et épaisseurs au choix arbitraire.

Cependant, nous signalons que les parois ne sont pas recouvertes d'enduit, quel que soit sa nature.

Les modèles sont ensuite simulés sous deux épaisseurs distinctes : 35 cm et 55cm, en période hivernale et aussi en période estivale.

Le tableau... donne les dimensions et la constitution des parois adopté pour ce travail de recherche.

Tableau 10 compositions des parois (composite 1,2,3)

Type Paroi de mur	Épaisseur	Composition de la paroi
Composite1	35cm	10 cm (F5C10P)+ 15cm(10F10P) + 10cm (0F5P)
	55cm	15cm (0F5C10P)+20cm (10F10P)+ 20cm(0F5P)
Composite2	35cm	10cm(0F5C10P)+15cm-(10F5P)+10cm (0F5P)
	55cm	15cm(0F5C10P)+20cm(10F5P)+20cm (0F5P)
Composite 3	35cm	15cm(0F5C10P)+20cm(10F5P)+20cm (0F10P)
	55cm	15cm(0F5C10P)+20cm(10F5P)+20cm (0F10P)
Dalle 20cm		15cm(0F5C10P)+ 5cmBois léger

IV.3 Résultats et interprétations

IV.3.1 Site M'chouneche

IV.3.1.1 Période d'été

Les figures ci-dessous illustrent les variations des températures intérieures en fonction des températures extérieures ainsi que l'évolution des humidités relatives intérieures par rapport aux fluctuations des humidités relatives extérieures. L'analyse des résultats des simulations obtenus sur tous les modèles montre une évolution très peu dépendante des températures intérieures aux variations extérieures pendant la période la plus chaude de l'année. Bien que les températures extérieures atteignent un pic de 46.4°C, les températures intérieures restent stables et très peu fluctuantes avec de faibles amplitudes.

Pour les enveloppes à simples parois, non renforcées, les maximales de températures intérieures enregistrées pour tous les modèles sont comprises entre : 26,5°C et 29,5°C, voir figure 65, et affichent des amortissements et déphasages très importants. Toutefois, les enveloppes à 55cm d'épaisseur affichent un amortissement maximal de 19,8°C après une durée de déphasage de 4h00. Par contre, les enveloppes à 35cm montrent un amortissement max de 16,9°C après un temps de déphasage de 9h00. L'épaisseur des enveloppes à, donc, montré sa capacité à atténuer l'onde thermique extérieure résultant des effets conjugués des conditions d'aridité climatique de la région. En effet, l'amortissement et le déphasage sont aussi le résultat de l'effet d'inertie thermique. Ce qui explique l'écrasement des courbes des températures intérieures sur une période de plusieurs journées chaudes de l'année.

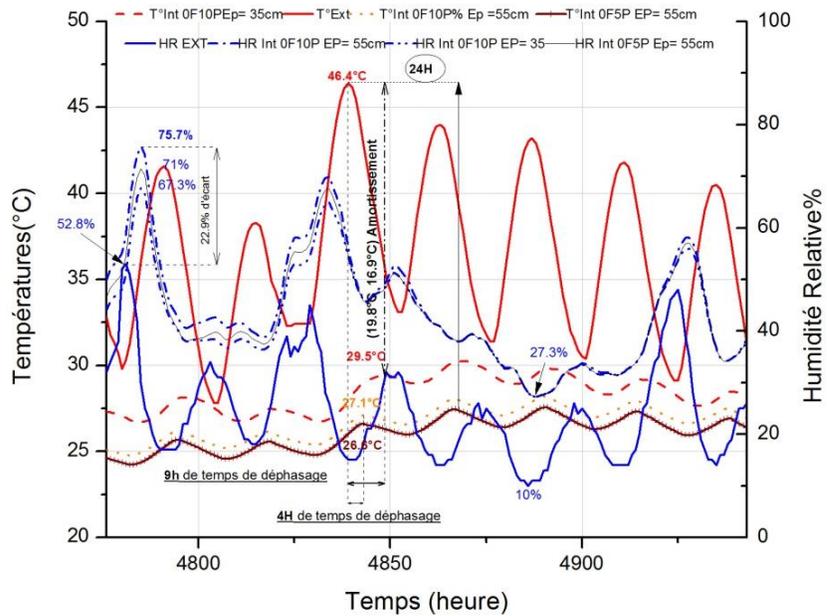


Figure 65. Variations des températures et HR, cas enveloppes non renforcés.

Lieux M'chouneche, période Eté.

Par ailleurs, l'écart max enregistré entre les températures intérieures relatives aux modèles à épaisseurs 55cm et à 35cm est respectivement de 3°C.

Quant aux enveloppes stabilisées, les maximales de températures intérieures enregistrées, tous type confondu, sont comprises entre : 26,1°C et 29,2°C, voir figure.66. Les écarts entre les températures max relatives aux modèles, (55cm et 35 cm) sont 0,7°C et 1,2°C figure 66. Toutefois, les enveloppes à 55cm d'épaisseur affichent un amortissement maximal de 20,3°C après une durée de déphasage de 4h00. Par contre les enveloppes à 35cm montrent un amortissement max de 17,2°C après un temps de déphasage de 9h00.

En effet, les enveloppes stabilisées affichent des températures basses par rapport aux enveloppes simples non stabilisées, avec un écart des amortissements de 0,5°C et 0,3°C, respectivement aux modèles à

épaisseurs 55cm et 35cm et des déphasages identiques ; ceci peut être considéré comme négligeable.

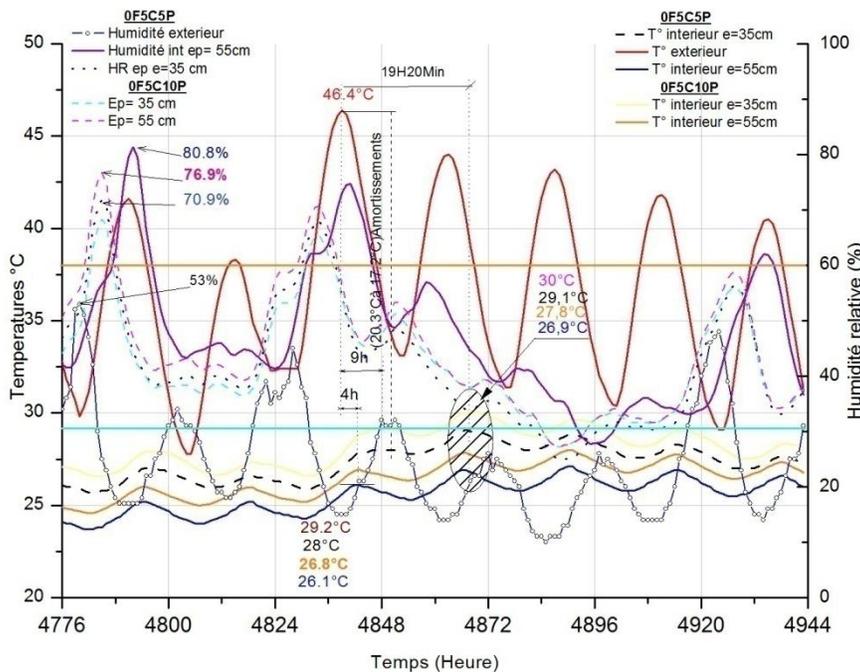


Figure 66 Variations des températures et HR, cas enveloppes stabilisés.

lieux M'chouneche, période Eté

De plus, on tient à souligné que toutes les enveloppes illustrent clairement l'effet de l'inertie thermique séquentielle, caractérisée par un déphasage max de 28h00 et un amortissement compris entre (16°C ; 19,5°C), qui résultent de la capacité des parois en terre à cumuler et stocker la chaleur, et par conséquent amortir l'onde thermique extérieure progressivement. En effet, on constate lors de la baisse des températures extérieures, après le pic 46,4°C, les températures intérieures continuent leur croissance lentement, jusqu'à atteindre leurs pics, après des déphasages de : (19h20min et 28h00), voire Figures (66, 67). Ces durées représentent les temps des déphasages séquentiels. En conséquence, la stabilité et la régularité des températures intérieures explique, bien, les très faibles

amplitudes moyennes journalières, de 1,2°C, par rapport à celle de températures extérieures, 11,6°C.

En fait, le facteur d'amortissement présente le rapport entre l'amplitude de la température intérieure à celle de la température extérieure. L'amplitude thermique est l'écart entre la température minimale et maximale en un même lieu pendant une durée de temps déterminée. Cette période peut être quotidienne, mensuelle, saisonnière ou annuelle.

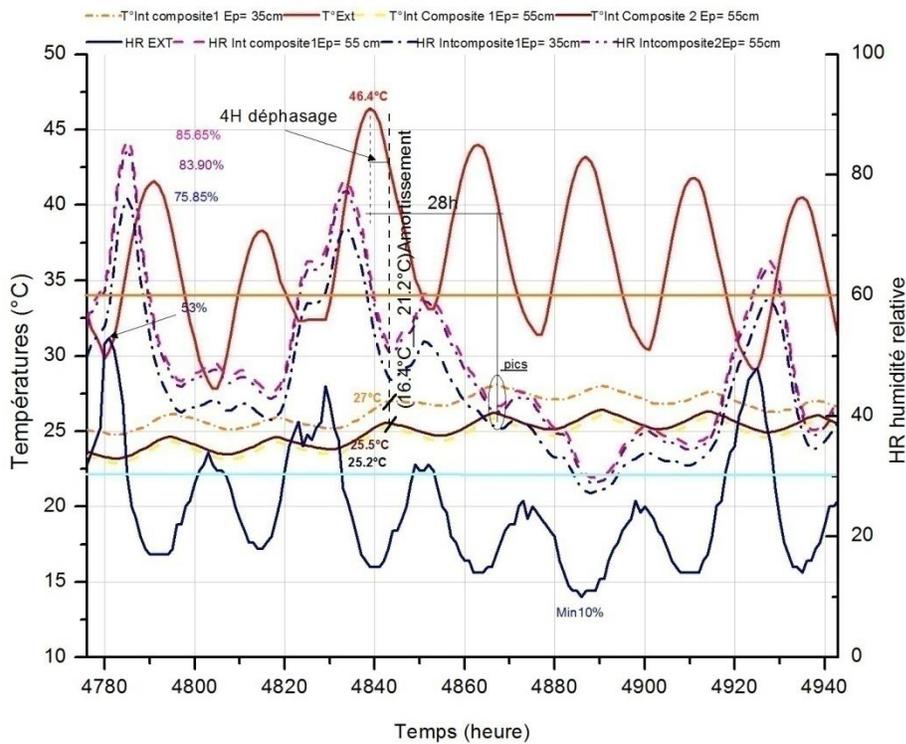


Figure 67 Variations des températures et HR, cas enveloppes composites.

lieux M'chouneche, période Eté

La comparaison des variations des températures intérieures, relatives aux enveloppes, non composées, à 55cm d'épaisseur, fait ressortir les modèles compressés à 5MPa, affichant des températures plus basses (min 26,1°C) comparées aux autres enveloppes à 10MPa affichant (max 29,5°C). Il s'agit de l'effet conjugué de l'inertie thermique, la densité et la

conductivité thermique ainsi que leur capacité spécifique. Cependant, les températures relatives aux enveloppes à épaisseurs de 35cm sont supérieures en moyenne de 2,1°C aux précédentes à 55cm d'épaisseur. Ceci confirme l'hypothèse de l'inertie thermique qui influe considérablement les températures intérieures ambiantes.

En revanche, en ce qui concerne les enveloppes composées (multicouches) avec une couche constituée de FPD, les variations des températures intérieures illustrées sur la figure 58, d'une stabilité constante avec un déphasage de 4h00min et des amortissements importants compris entre 16,4°C et 21,2°C. Ces enveloppes à caractères poreux et hygroscopiques qui combinent, à la fois, une macroporosité due à l'arrangement imparfait des particules de terre (H.Guillaud, T.Joffray, et al., 1995) et une microporosité des fibres végétales de la FPD (M.Ben Mansour et al., 2016; D Medjelekh, Ulmet, & Dubois, 2013). Comparativement aux autres enveloppes, elles sont plus performantes et affichent les T° plus basses figures. (59,60). Cependant, les enveloppes à 55cm affichent de meilleures performances thermiques avec un écart max de 1,8°C par rapport à l'enveloppe à 35cm. En effet, le modèle composite1 présente les meilleurs résultats, 25,2°C pour enveloppe à 55cm et 27°C pour enveloppe à 35cm.

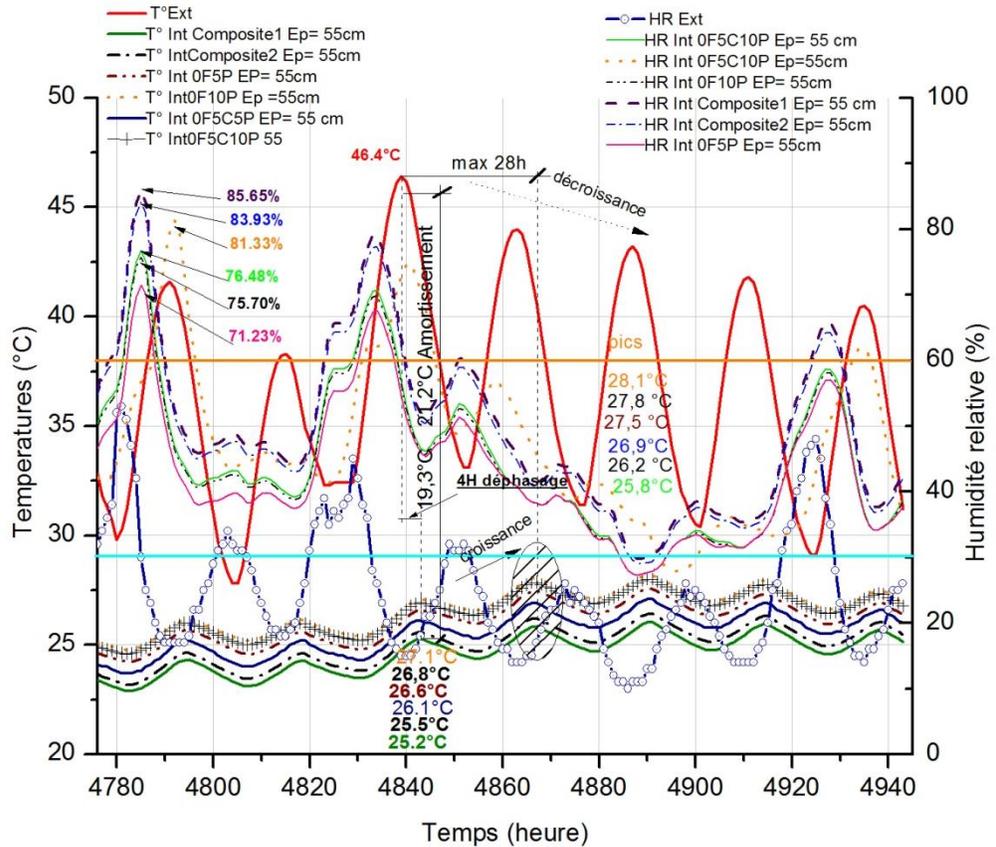


Figure 68 comparaisons des variations des T° et HR relatives aux enveloppes à épaisseurs 55cm, Période Été. Lieux M'chouneche

Ces performances sont surtout dues à l'effet de l'inertie thermique et de la couche intermédiaire, 10F10P, qui est plus poreuse et hygroscopique. Ce qui a causé une augmentation de la résistance thermique. Enfin, l'addition des fibres de palmier dattier à la matrice a été déterminante à atténuer la chaleur extérieure, et réguler les températures intérieures ambiantes pour leur porosité et leur faible conductivité thermique, ainsi que leur capacité d'absorptivité hydrique. A cet effet, plusieurs études scientifiques ont mis en exergue le rôle positif de l'inertie de l'enveloppe et des fibres végétales à atténuer les fluctuations de l'onde thermique extérieure (B.Taalah et al., 2014; D.MEDJELEKH, 2015; Faycal

El Fgaier, 2013a).

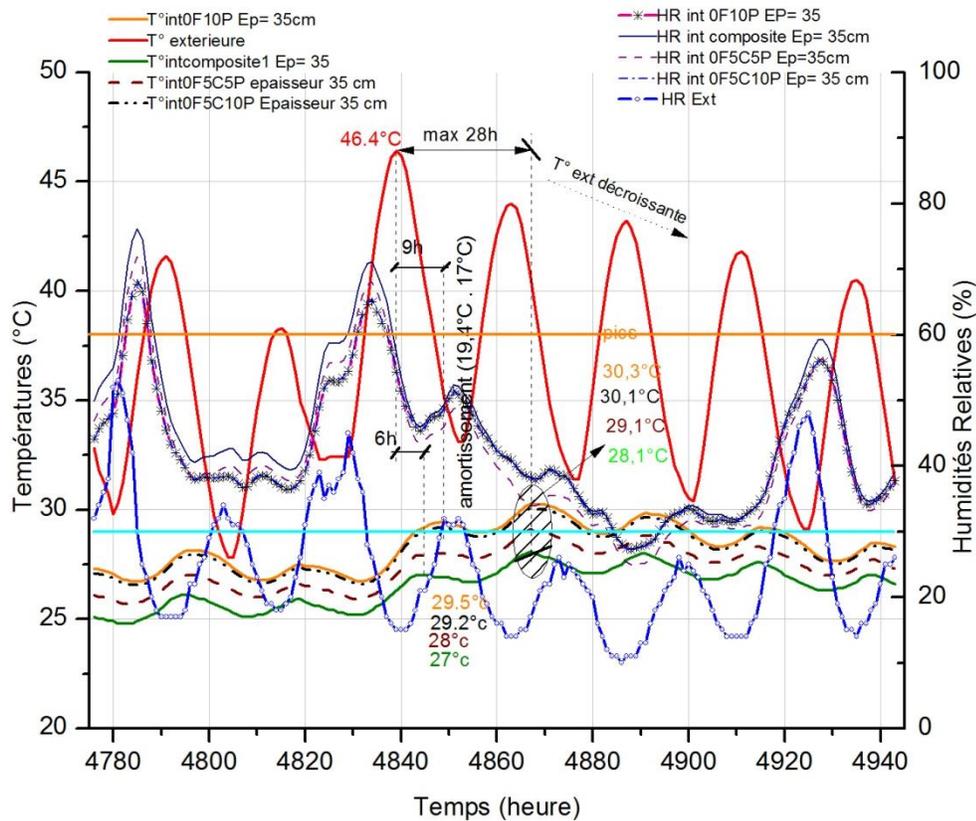


Figure 69 comparaisons des variations des T° et HR relatives aux enveloppes à épaisseurs 35cm, Période Eté. Lieux M'chouneche

En comportement hydrique, malgré la baisse de l'humidité relative extérieure, avec un maximum de 53% et 10% minimum en période de canicule, du fait de l'aridité du climat extérieur, l'humidité intérieure, pour la plus part des enveloppes est nettement supérieure à celle de l'extérieure. Cependant, elle atteints dans certains cas 85.65% avec un écart maximum de 32.6%. Ceci révèle les capacités hygroscopiques des matériaux en terre, en absorbant ou en libérant la vapeur d'eau (Brouard, 2018), quand l'humidité relative de l'air extérieure change, permettent enfin de réguler le climat intérieur.

A cet effet, la pression de compactage et la FPD jouent un rôle important pour la formation du réseau poreux, cependant la pression de compactage réduit la taille et la surface des pores. Par contre, la FPD par la nature et la taille de ses pores augmente la structure et le réseau poreux. Sachant qu'un macropore permet un transfert hydrique plus rapide qu'un micropore (Merckx, 2013). De ce fait, la diversité et l'inter connectivité des pores conduisent à un volume d'absorption de vapeur d'eau, plus important. Ce qui explique la capacité des enveloppes composites à absorber et stocker plus de vapeur d'eau que les autres, figure 68.

D'autre part, on doit signaler que le logiciel TRnsys ne tient pas compte des lois de diffusion et de transfert d'humidité dans le matériau hygroscopique, mais seulement de la possibilité de stockage/diffusion d'humidité dans une zone tampon.

IV.3.1.2 Période hivernale :

Les figures ci-dessous montrent les variations des températures et humidités relatives des différentes typologies d'enveloppes à épaisseurs 35cm et 55cm.

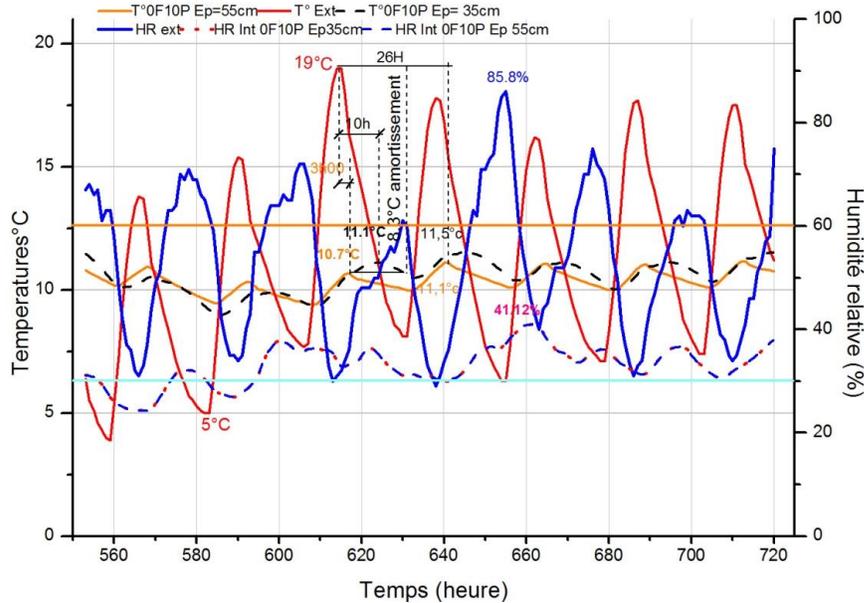


Figure 70 Variations des températures et HR, cas enveloppes non stabilisées.
période hiver , M'chouneche

Malgré les fluctuations de températures extérieures, les températures intérieures restent stables avec une amplitude moyenne de 0,8°C et un écart max de 8.3°C. Cependant, nous constatons des écarts faibles entre les températures intérieures relatives aux enveloppes de mêmes typologies, figures (70, 71, 72). Parfois on constate un accolement des courbes, ceci dit que l'inertie thermique ne crée pas tellement de différences de températures en période de chute importantes de températures extérieures.

Par ailleurs, on enregistre un amortissement max de 9°C des enveloppes stabilisées après des durées de déphasages allant de, 4h00min à 10h30min, respectives aux enveloppes d'épaisseurs 55cm et 35 cm. En conséquence, l'amortissement et le déphasage sont causés principalement par l'effet d'inertie thermique. En effet, les variations des températures intérieures, en période hivernale, par rapport à celles des températures

extérieures sont significatives, ce qui explique leurs régularités et leur indépendance des températures extérieurs.

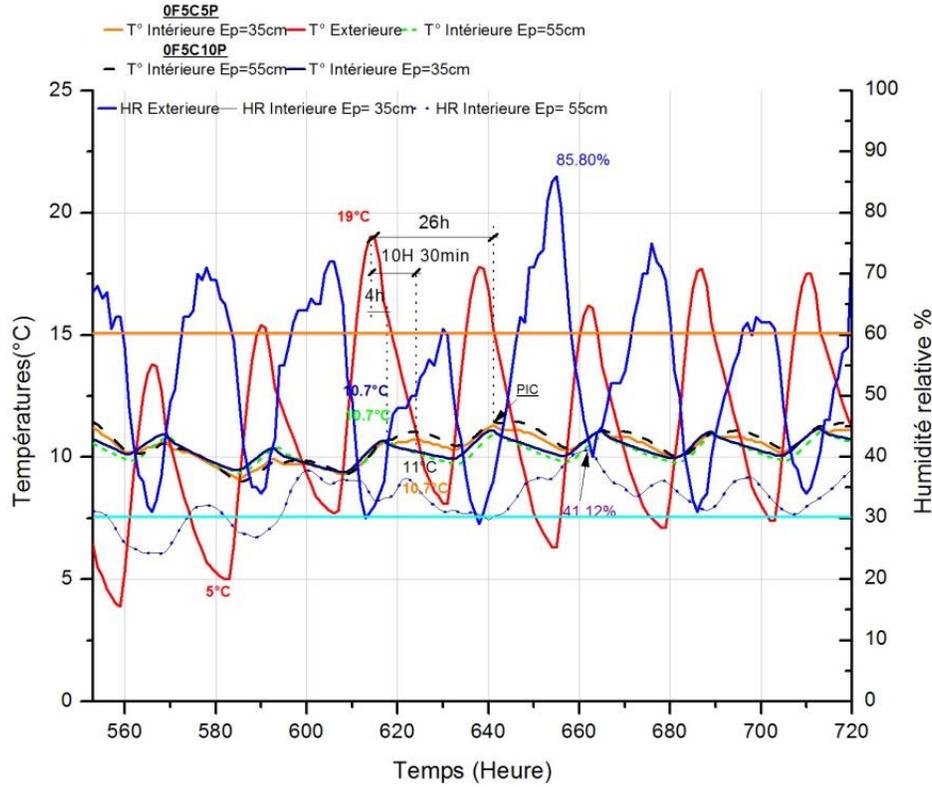


Figure 71 Variations des températures et HR, cas enveloppes stabilisé, Période hiver, lieux M'chouneche

Quant aux enveloppes de type composées, leur comportement reste similaire aux autres typologies avec de légères différences.

Par ailleurs, on note une humidité relative intérieure très faible en comparaison aux valeurs extérieures, ceci est dû probablement aux faibles valeurs des températures intérieures, ainsi qu'à l'absence du chauffage d'appoint et les charges internes que peut engendrer les occupants en activité par l'évapotranspiration. Enfin, en période hivernale, les valeurs des températures intérieures et d'humidité relatives restent relativement très basses, ce qui engendre un comportement hygrothermique des enveloppes

semblables car la terre n'est pas un bon isolant thermique.

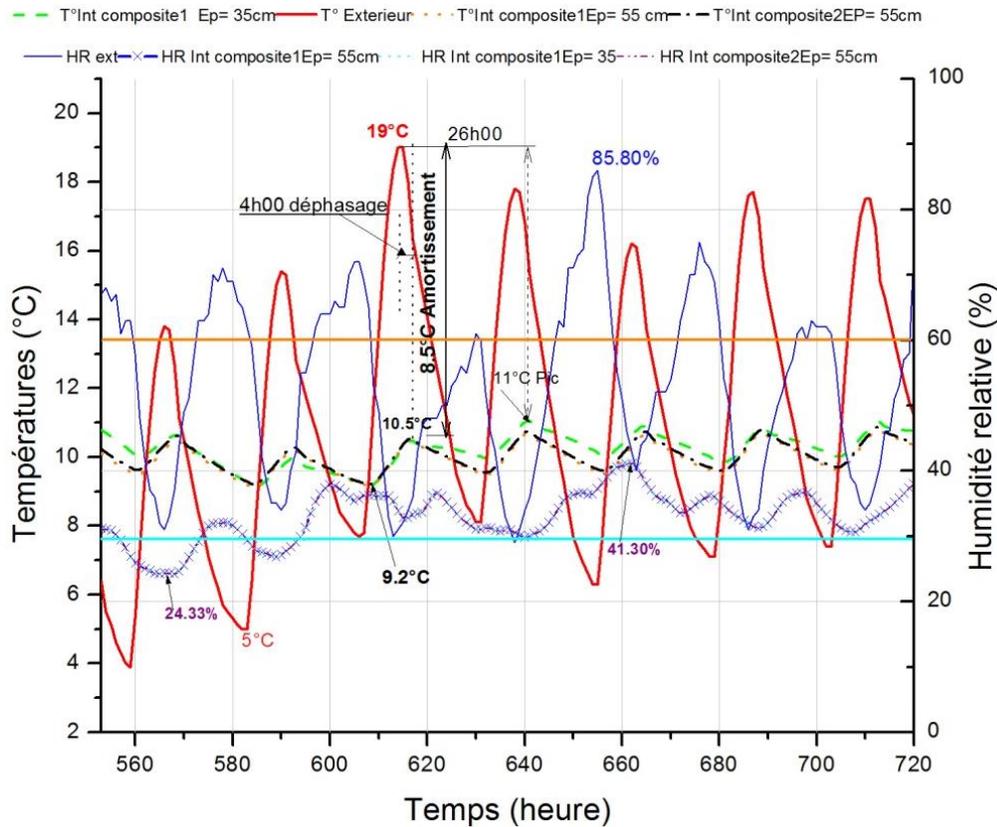


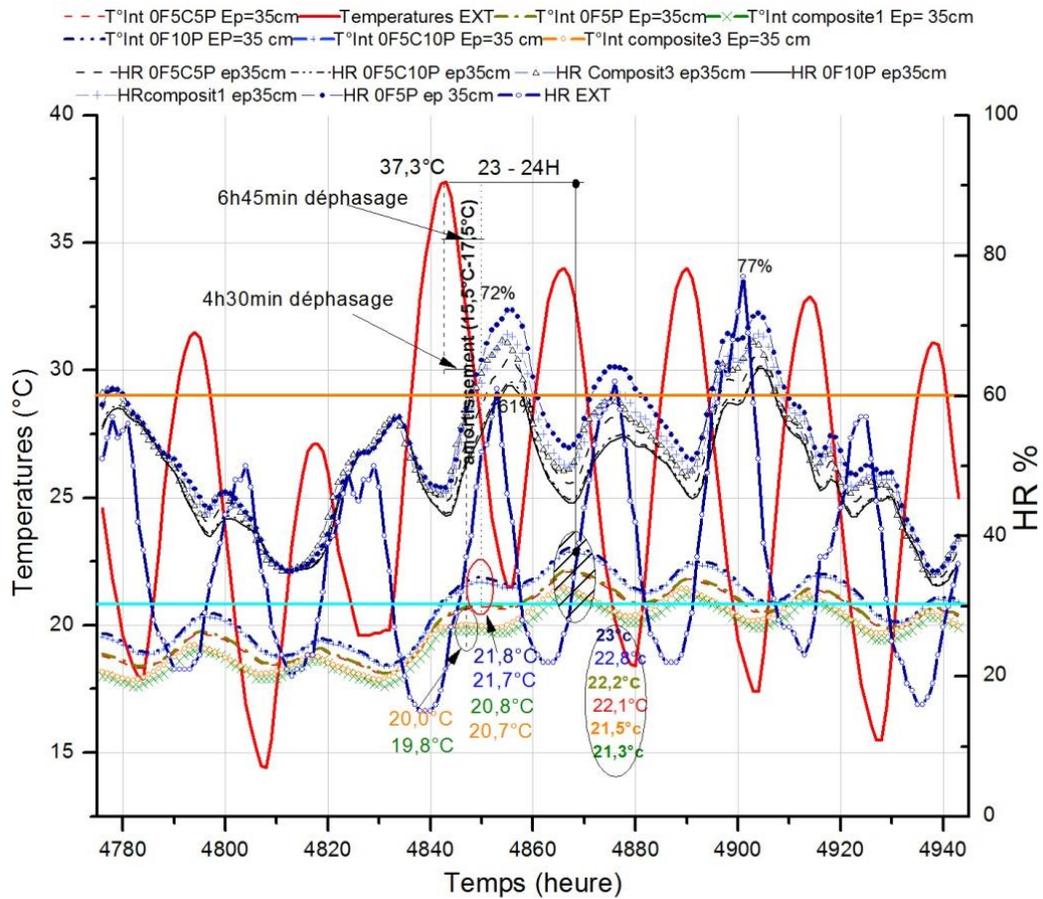
Figure 72 Variations des températures et HR, cas enveloppes composites, Période hiver, M'chouneche

IV.3.2 Site Ichemoul,

IV.3.2.1 Période d'été (la plus chaude de l'année):

Les résultats obtenus montrent une stabilité des températures intérieures malgré les fluctuations importantes des températures extérieures avec un pic de 37,3°C. L'amplitude des variations des T° extérieures est 14,5°C, celles des T° intérieures est en moyenne de 1,3°C soit un facteur

d'amortissement de l'ordre de 0,1°C. Cependant, les déphasages relatifs aux enveloppes à épaisseurs 35 cm sont : 6h45min pour les enveloppes simples et 4h30min pour les enveloppes composites. Les amortissements varient de : 17,1°C à 14,4°C. Ceci permet de limiter le phénomène de surchauffe. En revanche, les enveloppes composites affichent les plus basses T° intérieures. En effet, l'inertie thermique des murs a conduit à la baisse des T° intérieures. Le renforcement des enveloppes par FPD contribue à une baisse plus importante des T° intérieures.



Quant aux enveloppes à 55cm d'épaisseurs, les déphasages sont de l'ordre de 24h00 avec des amortissements variant de 16°C à 18°C. Ce déphasage est dû principalement l'inertie thermique des enveloppes et la

capacité du matériau terre crue à stocker l'énergie et la restituée au moment opportun. Ce qui induit à une contribution à réaliser le confort l'intérieure.

Comparativement, les deux types d'enveloppes (55 et 35cm) sont performants. Cependant, les enveloppes composites renforcées par FPD révèlent des résultats optimums.

Toutes fois, et en plus de l'inertie thermique avec l'amortissement et les déphasages, l'inertie thermique séquentielle peut être distinctif et déterminante sur le cycle annuel.

En ce qui concerne le comportement hydrique, on note sur la figure 74 des valeurs d'humidité relatives intérieures élevées, avec des maximales allant de : 61% -72%. Cependant, c'est aussi les enveloppes à épaisseurs 55cm qui affichent les valeurs importantes, par rapport aux enveloppes à 35 cm d'épaisseurs.

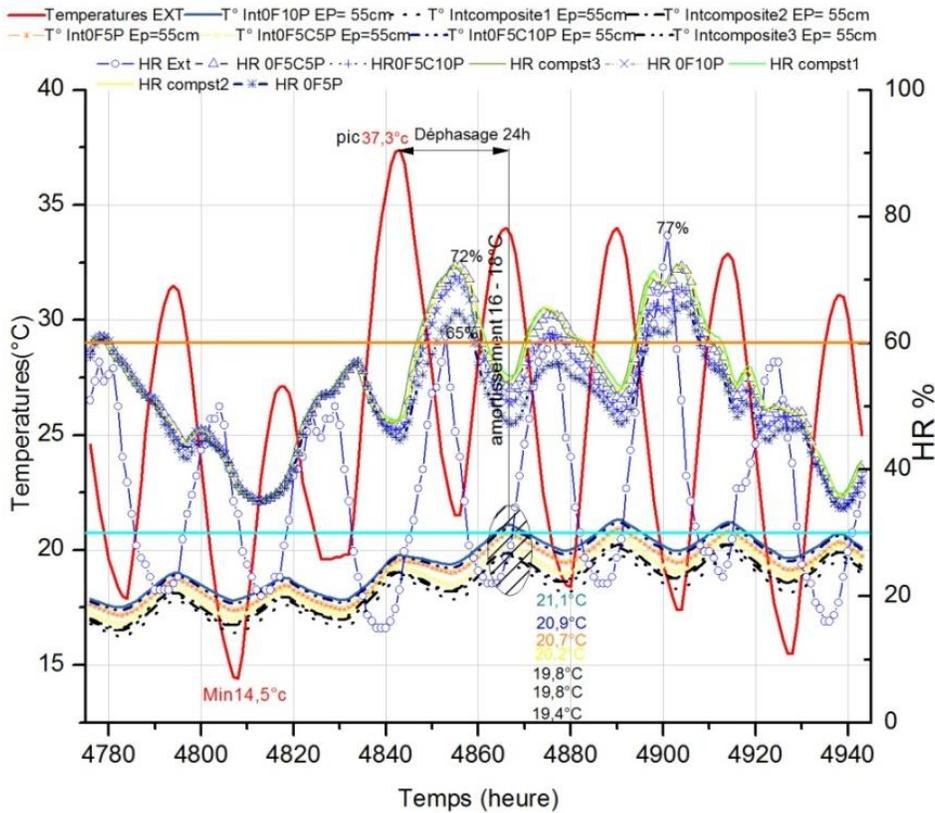


Figure 73 variation des T° et HR relatives aux enveloppes à e=55cm. période été, lieux Ichmoul

Les HR intérieures sont comprises en majorité entre 30% et 60%, avec quelques dépassements dus probablement à la ventilation intérieure insuffisante. De plus, les variations des HR internes révèlent une inertie hydrique qui affecte, notamment, le comportement hygrothermique des enveloppes. En effet, l'écart entre le HR intérieures et extérieures est dû à l'amortissement hydrique. En fin, HR intérieure est nettement élevée par rapport aux valeurs extérieures, ceci montre la capacité de la terre à réguler l'humidité intérieure H.Cagnon et al. (2014), malgré les conditions d'aridité climatiques extérieures. En effet, des recherches antérieures, ont montré les capacités hygroscopiques des matériaux en terre d'équilibrer le climat intérieur en absorbant ou en libérant l'humidité, quand l'humidité relative de l'air ambiant change.

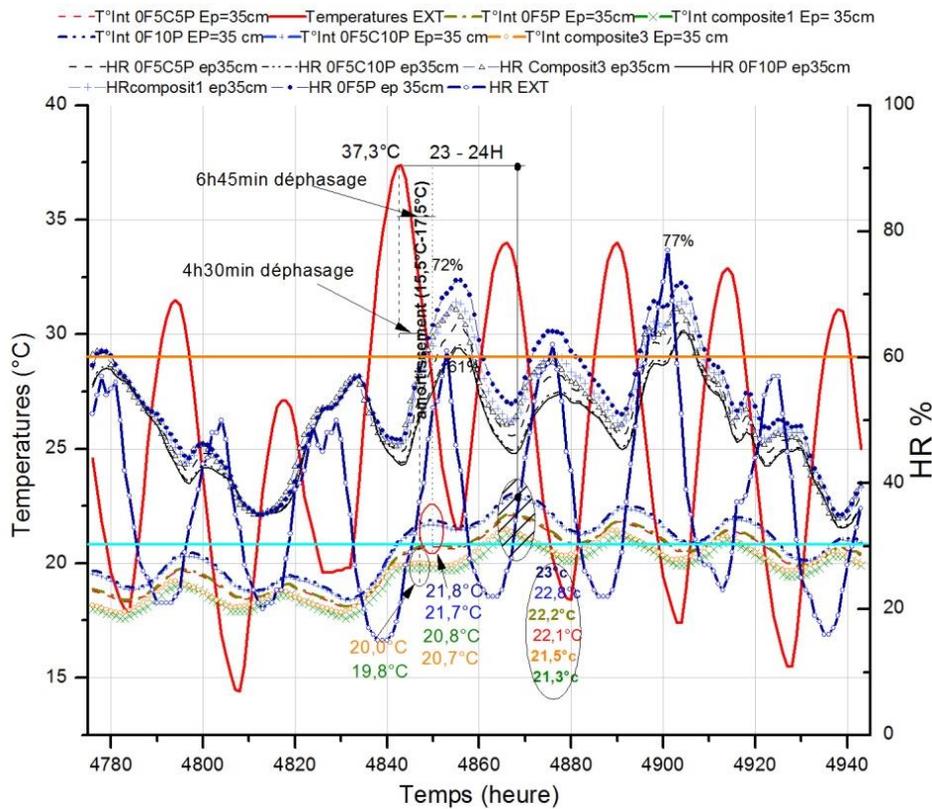


Figure 74 variations des T° et HR relatives aux enveloppes à e=35cm. période été, lieux Ichmoul

En revanche, les enveloppes renforcées par FPD, ont un comportement hygrothermique meilleur avec un écart entre les T° intérieures de 2°C de moins que ceux des autres enveloppes. De même, la Figure.76 montre que les enveloppes d'épaisseurs 55cm sont les plus performantes, avec un écart de 2°C par rapport aux enveloppes à 35cm. En fin, l'ajout de fibres végétales FPD a donc une incidence considérable sur les températures et les humidités relatives, intérieures.

IV.3.2.2 Période d'hiver :

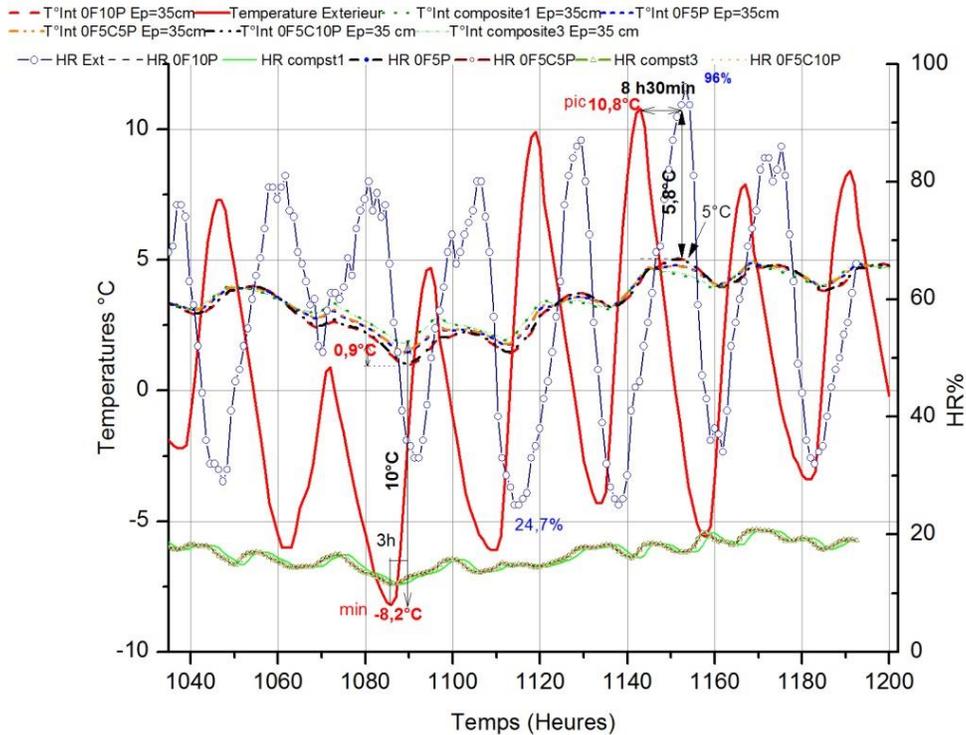


Figure 75 variations des T° et HR des enveloppes e=35cm, période d'Hiver. Ichmoul

En période hivernale de froid, et malgré les T° extérieures très basses atteignant -8,2°C avec une amplitude moyenne de 13,6°C, les T° intérieures restent stables avec une amplitude moyenne de 1,2°C. La figure 76 montre une différence de 9°C entre les T° minimales extérieures et intérieures, et ce sans apport de chauffage d'appoint interne. En effet, l'inertie thermique atténue les chutes thermiques brutales. Cependant, le matériau en terre a la capacité à stocker l'énergie et la faire dissiper progressivement sans être influé par les fluctuations thermiques extérieures.

De plus, nous constatons sur les deux figures(76, 77), un accolement des courbes de T° de mêmes typologie et de même épaisseur,

notamment pour les enveloppes à 55cm, ou l'écart entre les températures est négligeable. A cet effet, et en période de froid l'épaisseur des enveloppes ne fait pas de différence. Il faut noter que le scénario ne prévoit ni chauffage d'appoint, ni de gains thermiques importants, à savoir les activités des occupants ; ce qui à, probablement, un effet sur les résultats obtenues notamment ceux des HR intérieures.

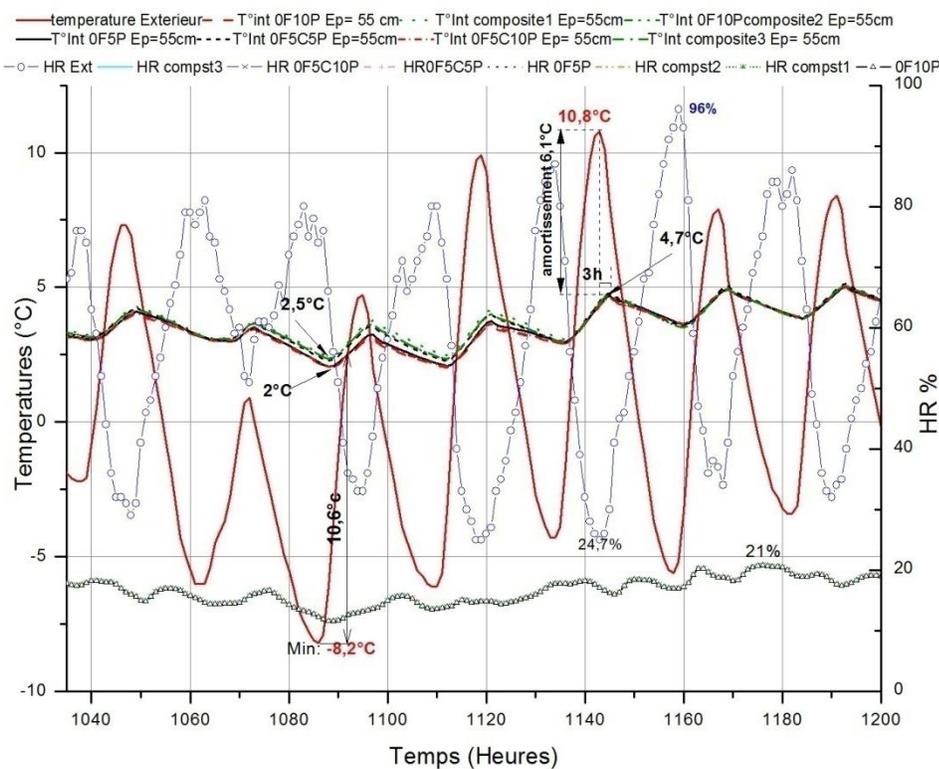


Figure 76 variations des T° et HR des enveloppes e=55cm, période d'Hiver. Ichmoul

En fin, et à titre comparatif, les figures(76,77) montrent une similarité des courbes des températures et HR, relatives aux différentes enveloppes. Cependant, les enveloppes composites présentent un léger décalage avec un écart de 0,9°C. Il est à noter que le matériau terre n'est pas un isolant thermique. Par ailleurs, un apport thermique est préconisé en période d'Hiver. Dalel Medjelekh (2015) rapporte qu'une forte inertie

améliore le confort et le comportement thermique des bâtiments chauffés en continu. En conséquent, le chauffage d'appoint maintiendra la température de confort en cas de refroidissement potentiel.

IV.3.3 Analyse des Performances énergétiques

L'amélioration des performances énergétiques des enveloppes permet de réduire les besoins en énergie, que ce soit pour le chauffage ou la climatisation, et donc contribue à résoudre les défis environnementaux et énergétiques. L'efficacité énergétique d'un bâtiment est atteignable par la mise en place des matériaux performants. L'utilisation des matériaux biosourcés peu transformés la terre crue permettent de réaliser un confort hygrothermique et une économie en matière de consommation énergétique.

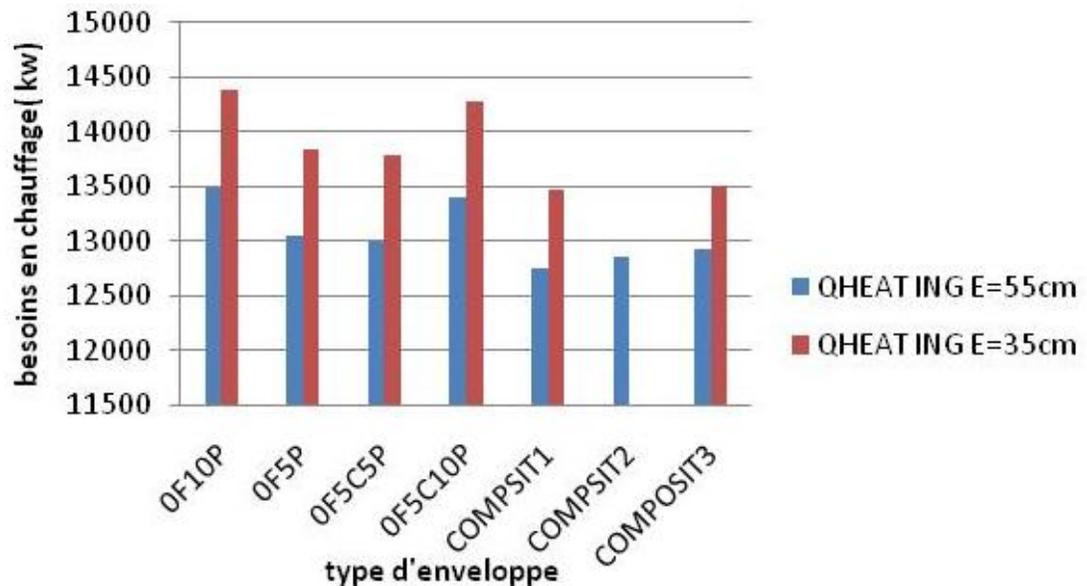


Figure 77 Besoins en chauffage, cas Ichmoul

IV.3.3.1 Analyse des besoins énergétiques

La simulation par Trnsys 17 nous a permis de déterminer les besoins en chauffage et en climatisation, relatifs aux différents types

d'enveloppes simulées. Les résultats montrent également que l'inertie thermique est un paramètre déterminant pour la performance énergétique de l'enveloppe. De plus, pour les deux sites étudiés, l'inertie thermique a un effet positif sur les besoins énergétiques, que ce soit en chauffage ou en climatisation.

1. Besoins en chauffage

- Cas M'chouneche :

Les résultats, indiqués au tableau9, montrent bien que les enveloppes épaisses, de 55cm, sont moins énergivores que celles à 35cm. Par ailleurs, les besoins en énergie varient du plus dense au moins dense, suivant la typologie de l'enveloppe. Cependant, l'enveloppe 0F10P et 0F5C10P sont moins énergivores que 0F5P et 0F5C5P. Néanmoins, les différences ne sont pas considérables. En revanche, pour les enveloppes composites, les besoins varient respectivement du composite3 au composite1, suivant la composition de la matrice, voir Tableau9.

Par ailleurs, les besoins en chauffage des enveloppes (35cm et 55cm) à parois simples sont très rapprochés. Paradoxalement, les besoins en chauffage des enveloppes à parois composite sont nettement supérieures aux précédentes et sont inverses aux épaisseurs, (c.a.d), les besoins relatifs aux e=55cm sont plus importantes que celles aux e=35cm, voir figure70. Ceci revient à la plage de températures de confort fixée, 18°C, 22°C et la répartition des besoins sur toute l'année.

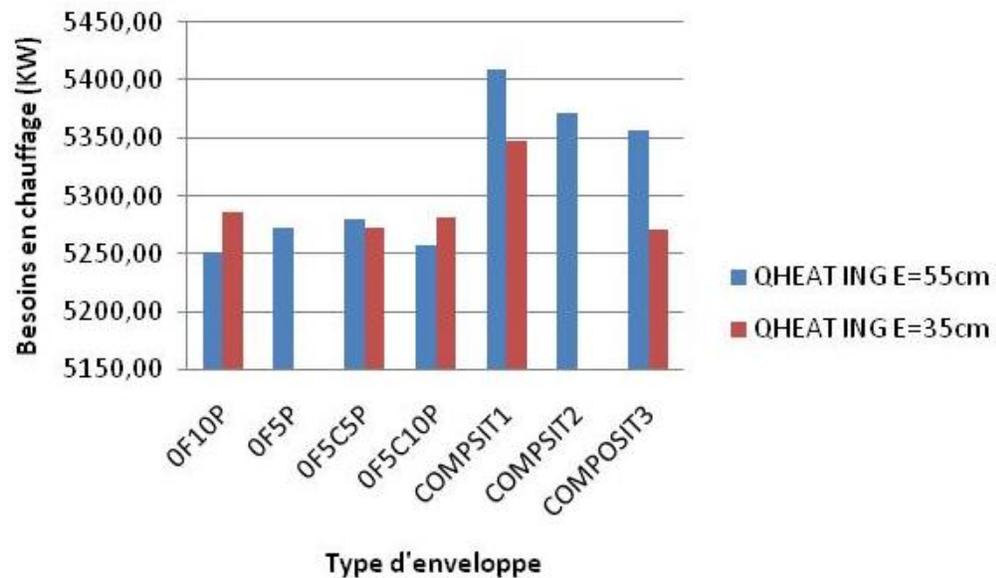


Figure 78 Besoins en chauffage, cas de M'chouneche

A cet effet, les besoins moyens annuels en chauffage sont respectivement : 5314,53 KWh/an pour les enveloppes à 55cm et 5292 KWh/an pour les enveloppes à 35cm d'épaisseur, et la différence est nettement négligeable.

- Cas Ichmoul

La figure 69, illustre bien les besoins en chauffage pour tous types confondus. Cependant, nous constatons clairement que les enveloppes de type composites sont les moins énergivores. En effet, l'enveloppe (composite1) présente les besoins les plus faibles soit en 55cm ou en 35cm. Ceci va en concordance avec les performances thermiques des composants constitutifs, particulièrement la FPD, et approuve aussi le pouvoir de l'inertie thermique des enveloppes en terre à stocker et restituer l'énergie, donc à atténuer l'onde thermique extérieure et contribuer à concrétiser le confort intérieur.

A titre comparatif, les besoins en chauffage relatifs au site Ichmoul sont

largement supérieures à ceux de M'chouneche. Cela est dû aux conditions climatiques du site Ichmoul, très distinctives et particulière ; notamment en saison hivernal, où la demande en chauffage s'avère particulièrement très élevée. Les typologies composites du site M'chouneche, contrairement au cas d'Ichmoul, affichent des valeurs supérieures par rapport aux typologies simples.

Tableau 11 Récapitulation des besoins en chauffage et climatisation, cas: M'chounech et Ichmoul

	M'chouneche				Ichemoul			
	55cm		35 cm		55cm		35 cm	
	Chauf (kw)	Clim (kw)	Chauf (kw)	Clim (kw)	Chauf (kw)	Clim (kW)	Chauf (kw)	Clim (kw)
0F5P	5372,82	41,45	Non testé		13055,17	0,00	13842,28	0,00
0F10P	5353,39	9,18	5285,90	139,37	13500,79	0,00	14386,08	0,00
0F5C5P	5280,43	0,00	5273,16	0,00	13009,97	0,00	13786,09	0,00
0F5C10P	5257,32	5,25	5281,50	133,33	13408,74	0,00	14275,55	0,00
Composite1	5409,34	0,00	5348,23	5,46	12753,13	0,00	13480,07	0,00
Composite2	5372,12	0,00	Non testé	Non testé	12869,80	0,00	Non testé	Non testé
Composite3	5357,30	0,00	5271,21	11,74	12930,31	0,00	13520,96	0,00

2. Besoins en climatisation

• **Cas M'chounech :**

Pour ce qui est des besoins en climatisation, le tableau.9 montre des valeurs quasiment très faibles, particulièrement pour type e=55cm. Par ailleurs, les types e=35cm dont les besoins restent faibles mais légèrement au dessus de ceux e=55cm. Cependant, les enveloppes concernées sont de types simples et compressées à 10MPa. Ceci dit que les besoins en climatisation sont négligeables et parfois nuls.

• **Cas Ichmoul :**

Les résultats obtenus et illustrés dans tableau.9, montrent clairement le non besoin au recourt à la climatisation. Les conditions climatiques de la

région, particulièrement en été où les températures extérieures sont très confortables et clémentes, et les capacités des enveloppes en terre à réguler l'ambiance thermique intérieure, ont été les facteurs déterminants à s'en passer de la climatisation en été.

IV.4 Conclusion

Cette partie de notre travail a consisté à faire une simulation du comportement des enveloppes de constructions réalisées en matériaux étudiés face à deux climats : un climat semi-aride et un climat de montagne. L'enveloppe de bâtiment est constituée soit de matériaux de terre stabilisée, soit de matériau de terre crue soit de matériaux composites, comprenant une couche stabilisé, une couche avec incorporation de PFD et une couche en terre crue simple. En les épaisseurs seront variés soit de 35cm soit de 55cm.

L'étude numérique a porté sur la simulation grâce au logiciel TRNsysV.17. La simulation a permis de déterminer les profils de température et d'humidité relative à travers l'enveloppe. Les résultats permettent de faire une prédiction sur la durabilité des matériaux utilisés pour les murs soumis aux conditions climatiques locales.

Les résultats montrent que pour chacun des deux climats, on relève une stabilité des températures intérieures et des HR intérieures satisfaisantes malgré les fluctuations des conditions climatiques extérieures, soit en hiver ou en été. On peut conclure que les matériaux de terre avec incorporation de fibre de palmier dattier peuvent être utilisés comme enveloppe de bâtiment dans les régions à climat Aurasien sans que leur durabilité soit altérée par les conditions climatiques. Sur le plan hygroscopique la FPD

incorporée à la terre a pour effet de réguler l'humidité relative intérieure à celle du milieu environnant tout en contribuant au confort intérieur. De plus, les enveloppes de type composites associées à l'inertie thermique contribuent efficacement à minimiser les besoins énergétiques de manière très importante.

CONCLUSION GENERALE

La nécessité de faire face aux défis environnementaux et afin de sécuriser les ressources énergétiques aux générations futures, nous mène de plus en plus, à s'orienter davantage vers les matériaux biosourcés utilisés dans la construction. En conséquence, les matériaux durables sont devenus des alternatives prometteuses dans le secteur de la construction, dans le but d'améliorer le niveau de confort intérieure et contribuer à économiser l'énergie.

En premier lieux nous avons jugé intéressant d'exposer les résultats des études antérieures, menées sur des matériaux similaires aux notre. En effet, la majorité des chercheurs se sont, plutôt, focalisés sur les caractéristiques mécaniques et peu d'études qui se sont intéressées aux propriétés hygroscopiques et hygrothermiques des matériaux fait à base de terre crue. De plus, la fibre de palmier dattier, très abondante en Algérie, n'a pas fait l'objet d'études de ses applications dans le domaine de la construction soit comme matière composite ou en matière brute. Il en résulte que la terre crue possède des caractéristiques mécaniques et thermiques très prometteuses. Comme ces matériaux ont une structure hétérogène ce qui peut générer une difficulté dans la détermination de leurs propriétés thermophysiques. Une partie de cette synthèse bibliographique, a été consacrée à la description de différentes méthodes et outils de mesures des propriétés thermophysiques et hygrothermiques des matériaux hygroscopiques. Ce fut également l'occasion de mettre en exergue la pertinence environnementale de l'utilisation de matériaux locaux.

Notre thèse, constitue une contribution dans ce contexte dont l'objectif est l'optimisation des performances hygrothermiques des matériaux à base de terre crue et de fibre de palmier dattier. Cette recherche est basée sur une

caractérisation des propriétés intrinsèques hygroscopiques des matériaux mis en œuvre, suivie d'une optimisation des performances énergétiques des enveloppes exposées aux conditions climatiques des Aurès, moyennant des méthodes expérimentales et numériques. Sur le plan économique l'utilisation de ces matériaux contribue à diminuer la quantité des matériaux importés et sur le plan écologique à réduire l'émission de dioxyde de carbone.

Notre premier souci était la mise au point des séries de matériaux locaux pour l'enveloppe suivant deux facteurs variables, le degré compactage ainsi que le taux de FPD contenu. Les fibres du palmier dattier, qu'on trouve en abondance au sud Algérien, la terre crue locale et le ciment ont servi comme composants essentiels à la préparation des échantillons. Nous avons pu alors constater une forte diversité des densités selon la composition et le compactage. Les compositions ainsi réalisés ayant pour vocation d'améliorer les performances hygrothermiques des enveloppes, les caractéristiques thermiques et mécaniques de ceux-ci ont tout d'abord été déterminées. Ce fut l'occasion de confirmer que la masse volumique et le degré de compactage des mixtures terre-FPD sont les paramètres qui auront la plus forte influence sur les performances.

Pour pouvoir utiliser les matériaux étudiés dans la construction, il est évident de s'assurer qu'ils possèdent des propriétés mécaniques suffisantes. Malgré sa faible résistance mécanique, rapportée par la plus part des chercheurs, nos mesures de la résistance à la compression révèlent des résultats satisfaisants du même ordre de grandeur que les exigences actuellement utilisées, ces mesures sont fortement mis en exergue à partir de l'ajout de 5% FPD combiné à un compactage de 5MPa et plus. Ces résultats varient de plus 5Mpa jusqu'à atteindre 17MPa et plus notamment quand en augmente la compaction (5MPa et 10MPa), ce qui favorise une meilleure résistance. Ces mêmes résultats se situant dans une gamme de

tenue mécanique permettant même leur utilisation structurelle. Quant aux performances thermiques quoique supérieures aux exigences normatives permettant de les mettre à niveau comme isolants thermiques, sont comparables à celles d'autres matériaux et permettent d'envisager une prescription similaire. Les valeurs de la conductivité thermique des différents échantillons varie de $0,23 \text{ (w.m}^{-1}\text{k}^{-1}\text{)}$ à $1,35 \text{ (w.m}^{-1}\text{k}^{-1}\text{)}$ et ont une tendance similaire à leurs variations de densité. Quant aux résultats des mesures de perméabilité à la vapeur d'eau sont très proches de beaucoup de matériaux similaire, (ex : béton de chanvre), ces résultats sont un bon indicateur de leur utilisation en tant que matériau thermiquement performant.

Les matériaux à base de terres crues, sont souvent recommandés pour leurs qualités de régulation hydrique, les isothermes de sorption-désorption permettent de caractériser les capacités de stockage de l'humidité dans les matériaux selon les humidités relatives ambiantes. Les résultats des isothermes révèlent que l'incorporation de FPD est un facteur déterminant pour le stockage de l'humidité donc de la régulation hydrique des enveloppes en terre crue. En effet, les échantillons avec incorporation de PFD ont une plus grande capacité d'absorption de la vapeur d'eau que les simples, atteignent jusqu'à 6%. En revanche, ceux incorporant du ciment seul, en absorbent moins que tous les autres 3,5% d'absorption.

Nous avons ensuite procédé à la détermination de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique ainsi que capacité spécifique des matériaux. La dépendance de ces paramètres en fonction de la densité et de la teneur en FPD reste importante. L'addition de ciment dans les matériaux étudiés entraîne une augmentation de la conductivité et une baisse de la diffusivité thermique, $1,27 \text{ (w.m}^{-1}\text{k}^{-1}\text{)}$ $6,56787\text{E-}07$ pour 0F5C10P.

CONCLUSION GENERALE

Le logiciel de simulation TRNsys v.17, une fois les paramètres des différents matériaux entrés, a permis de soumettre une enveloppe, réalisée avec certains des matériaux étudiés, à deux climats différents ; Ichemoul pour un climat de montagne et M'chouneche pour un climat semi arides. Cette partie a permis de faire des simulations portant sur l'évolution de la température, de l'humidité et sur les besoins énergétiques, en chauffage et en climatisation, en faisant varier l'épaisseur et le matériau de l'enveloppe.

La stabilité des températures intérieures malgré les fluctuations des températures extérieures, a engendré la régulation des conditions hygrothermiques, un déphasage atteignant 24H00 max et 4H00 Min, suivant la composition et l'épaisseur des murs et en plus de la réduction remarquable des besoins énergétiques, notamment la climatisation en été sont les résultats de l'influence de l'inertie thermique et des performances thermiques des enveloppes en terre. L'incorporation des FPD aux matériaux en terre à un apport positif sur les performances énergétiques des enveloppes. Grâce à leur structure poreuse, ces enveloppes ont la capacité d'atténuer les variations d'humidité à l'intérieur des constructions.

En fin, le choix d'une enveloppe étudiée dépendra de ses compositions et particulièrement de ses performances en isolation thermique et le comportement face à l'humidité du milieu environnant. Les enveloppes incorporant de la PFD présentent les meilleures performances en matière d'isolation, par contre elles sont plus hygroscopiques. Par conséquent, leur utilisation est conseillée pour un climat semi-aride.

Si l'on ne considère que les propriétés d'isolation, on peut trouver des matériaux plus performants que la terre, avec des propriétés thermo physiques meilleures qui peuvent justifier leur utilisation dans la construction. En revanche, les matériaux en terre crue renforcés au PFD

peuvent être considérées comme le compromis entre trois exigences : un coût raisonnable, une résistance mécanique satisfaisante et des caractéristiques thermiques satisfaisantes.

Les travaux réalisés dans cette recherche soulèvent plusieurs pistes de recherches additives et complémentaires et ouvrent de nombreuses perspectives.

- Il est intéressant de proposer une caractérisation des matériaux non seulement à l'échelle de l'enveloppe mais aussi à l'échelle du bâtiment, afin d'affiner les propriétés et les caractéristiques hygroscopiques et thermo physiques.
- Des essais mécaniques plus approfondis restent aussi indispensables afin d'évaluer la performance et la durabilité des matériaux étudiés.
- Une étude de la microstructure mettant en relief le rôle du réseau poreux sur le comportement hygrothermique.

BIBLIOGRAPHIE

- A.Alawar, A.M.Hamed, & K.Al-Kaabi. (2009). Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *composite: part B*, 40, 601–606.
- A.Heath, M.Lawrence, P.Walker, & C.Fourie. (2009). *The compressive strength of modern earth masonry*. Paper presented at the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies, NOCMAT 2009, 2009-09-06 - 2009-09-09, Bath., Bath.
- A.Mesbah, J.C.Morel, P.Walker, & Kh.Ghavami. (2004). Development of a direct tensile test for compacted earth blocks reinforced with natural fibers. *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*, 16, 95-98.
- Abdi, M., A.Parsapajouh, & Arjomand, M. A. (2008). Effects of random fiber inclusion on consolidation, hydraulic conductivity, swelling, shrinkage limit and desiccation cracking of clays. *International Journal of Civil Engineering*, 6, 284-292.
- Amina, M., & Besma, D. (2019). Evaluation de l'effet anti-corrosif d'un film de matériau nanoporeux porté sur une surface métallique. (Master), Université L'arbi Ben Mhidi Oum El Bouaghi.
- Anger, R., Fontaine, L., Houben, H., Doat, P., & Van Damme, H. J. D. g. d. s. à. l. a. P., Belin/Cité des sciences et de l'industrie. (2009). Bâtir en terre.
- AUBERT, J.-E. (2013). *Caractérisation des briques de terre crue de midi-pyrénées*. Retrieved from toulouse:
- B.Agoudjile, A.Benchabane, A.Boudenne, L.Ibos, & M.Fois. (2011). Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood. *Energy and Buildings*, 43, 491–497.
- B.Haba, B.Agoudjil, A.Boudenne, & K.Benzarti. (2017). Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material for building based on date palm concrete. *Construction and Building Materials*, 154, 963–971.
- B.Taalah, G, A., G, S., & K, A. (2014). Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 59, 161–168.
- B.Taallah, & A.Guettala. (2016). The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 104, 52–62.
- Brouard, Y. (2018). *Caractérisation et optimisation d'un composite biosourcé pour l'habitat*. (Doctorat), UNIVERSITÉ DE TOURS, TOURS.
- Enveloppe des objectifs à atteindre. (2021). Retrieved from <https://www.construction21.org/data/sources/users/8382/docs/141002-enveloppe-j1v2.pdf>

- C.Galán-Marín, C.Rivera-Gómez, & J.Petric. (2010). Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and Building Materials*, 24, 1462–1468.
- Chehema, A., & Longo, H. J. R. d. é. r. (2001). Valorisation des sous-produits du palmier dattier en vue de leur utilisation en alimentation du bétail. 59-64.
- D.MEDJELEKH. (2015). *Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques*. (Doctorat), constantine 3, constantine.
- Dung, T. L. A. (2010). *Etude des transferts hygrothermiques dans le beton de chanvre et leur application au bâtiment*. (Doctorat), UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE, REIMS.
- E.Quagliarini, & S.Lenci. (2010). The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient roman adobe bricks. *Journal of Cultural Heritage*, 11, 309–314.
- F.Aymerich, L.Fenu, & P.Meloni. (2012). Effect of reinforcing wool fibres on fracture and energy absorption properties of an earthen material. *Construction and Building Materials*, 27, 66–72.
- F.Collet, J.Chamoin, S.Pretot, & C.Lanos. (2013). Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. *Energy and Buildings*, 62, 294–303.
- F.V.Riza, I.A.Rahman, & Zaidi, A. M. A. (2011). *A brief review of compressed stabilized earth brick (cseb)*. Paper presented at the 2010 international conference on science and social recherche (CSSR 2010), kuala lumpur.
- Fgaier, F. E. (2013a). *Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue*. (Doctorat), ECOLE CENTRALE DE LILLE, LILLE.
- Fgaier, F. E. (2013b). *Conception, production et qualification des briques enterre cuite e ten terre crue*. (Doctorat), Ecole centrale de Lille, Lille.
- Fgaier, F. E., Z.Lafhaj, C.Chapiseau, & Antczak, E. (2016). Effect of sorption capacity on thermo-mechanical properties of unfired clay bricks. *Journal of Building Engineering*, 6, 86–92.
- Flament, C. (2013). *Valorisation des fines de lavage de granulats: Application à la construction en terre crue*. Artois,
- Guettala, A., Abibsi, A., & Houari, H. (2006). Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Construction and Building Materials*, 20, 119–127.
- Hassan, F. (1970). *Construire avec le peuple: Histoire d'un village d'egypte* (Sindbad ed.): Paris.
- H.Binici, O.Aksogan, M.Bodur, E.Akca, & S.Kapur. (2006). Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials. *Construction and Building Materials*.
- H.Binici, O.Aksogan, & T.Shah. (2005). Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material. *Construction and Building Materials*, 19, 313–318.
- H.Cagnon, J.E.Aubert, M.Coutand, & C.Magniont. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80, 208–217.

- H.CHAIB, A.KRIKER, & A.MEKHERMECHE. (2015). Thermal study of earth bricks reinforced by date palm fibers. *Energy Procedia*, 74, 919 – 925.
- H.Guillaud, T.Joffray, & P.Odul. (1995). *Bloc de terre comprimé*.
- H.Guillaud, T.Joffroy, & P.Odul. (1995). *Blocs de terre comprimés* (Vol. VOLUME II: manuel de conception et de construction). Eschborn: Deutsches Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) Zentrum für entwicklungsstrchnologien.
- H.H.Abdel-Rahman, R.Al-Juruf, F.Ahmad, & I.Alam. (1988). Physical, mechanical and durability characteristics of date palm frond stalks as reinforcement in structural concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 10, 175-181.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1989). *Traité de construction en terre*.
- JOHANNESSON, M. J. A. B. F. (2001). Measurement of the moisture storage capacity using sorption balance and pressure extractors. *Journal of Building Physics*, 24.
- Khadidja, Z. (2011). *Etude du mode de fabrication du ciment et effet, des matières premières- impact de l'utilisation, du ciment sur l'environnement*. (Magistere), Université Hassiba Benbouali de Chlef, Chlef.
- l'énergie, M. d. (2015). Energies nouvelles, renouvelables et maîtrise de l'énergie. In (Vol. 2020).
- l'énergie, M. d. d. (2015). *Bilan énergétique national 2015*. Retrieved from <https://www.energy.gov.dz/?article=bilan-energetique-national-du-secteur>.
- L.Zhang, A.Gustavsen, B.P.Jelle, L.Yang, T.Gao, & Y.Wang. (2017). Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 151, 504–511.
- La terre crue améliore le confort hygrothermique. (2010). Cahiers Techniques du Bâtiment.
- Labat, M., Magniont, C., Oudhof, N., Aubert, J.-E. J. B., & Environment. (2016). From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential. 97, 69-81.
- Laborel-Preneron, A., Aubert, J. E., Magniont, C., Tribout, C., & Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 111, 719–734.
- Lelièvre, D. (2015). *Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés*. (Doctorat), UNIVERSITE DE BRETAGNE-SUD, Bretagne.
- Liuzzi, S., Rubino, C., Stefanizzi, P., Petrella, A., Boghetich, A., Casavola, C., . . . Materials, B. (2018). Hygrothermal properties of clayey plasters with olive fibers. 158, 24-32.
- M.Chikhi, B.Agoudjil, A.Bouenne, & A.Gherabli. (2013). Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation. *Energy and Buildings*, 66, 267–273.
- M.Dondi, F.Mazzanti, P.Principi, M.Raimondo, & G.Zanarini. (2004). Thermal conductivity of clay bricks. *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*, 8-14.

- M.Hall, & D.Allinson. (2009). Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Building and Environment*, 44 1935–1942, 1935–1942.
- Mansour, M. B., A.Jelidi, Cherif, A. S., & Jabrallah, S. B. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (ceb). *Construction and Building Materials*, 104, 44–51.
- Mansour, M. B., Jelidi, A., Cherif, A. S., Jabrallah, S. B. J. C., & Materials, B. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (ceb). *104*, 44-51.
- Medjelekh, D. (2015). *Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hybride des enveloppes hygrosopiques*.
- Medjelekh, D., Ulmet, L., & Dubois, F. J. c. C., Reims. (2013). Effet du comportement thermohydrigue de l'enveloppe hygrosopique sur le confort thermique de l'habitat: Cas de la terre et de la paille.
- Mehdi Jonoobi, M. S., Younes Shirmohammadli, Alireza Ashori, Hamid ZareaHosseinabadi Tizazu Mekonnen. (2019). A review on date palm tree: Properties, characterization and its potential applications. *Journal of Renewable Materials*, 7 N°11.
- Merckx, B. (2013). *Étude et modélisation des transferts hydriques et thermiques au sein des matériaux inorganiques poreux : Application aux matériaux du patrimoine bâti ancien, exemple de l'hypogée des dunes à poitiers et de la crypte de l'abbatiale de saint-savin-sur-gartempe*. (doctorat), Poitier, Poitiers.
- MEUKAM, P. (2004). *Valorisation des briques de terre stabilisees en vue de l'isolation thermique de batiments*. (doctorat), Université de Yaoundé I,
- Minke, G. (2006). *Building with earth*. Basel: Birkhäuser.
- Mohamed, A. E. M. K. (2013). Improvement of swelling clay properties using hay fibers. *Construction and Building Materials*, 38, 242–247.
- N.BENMANSOUR. (2011). *Etude des performances de produits renouvelables et locaux adaptés aux applications de l'isolation thermique dans le bâtiment*. (Magister), Batna 1, Batna.
- NFENISO12571. (2000). Hygrothermal performance of building materials and products—determination of hygroscopic sorption properties. In.
- NFENISO12572. (2001). Hygrothermal performance of building materials and products—determination of water vapour transmission properties. In.
- Oudhof, N., Labat, M., Magniont, C., & Nicot, P. J. A. J. o. C. E. (2015). Measurement of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures. 33(2), 474-479.
- P.MEUKAM. (2004). *Valorisation des briques de terres satbilisees en vue de l'isolation thermique de batiments*. (DOCTORAT), YAOUNDI 1, YAOUNDI.
- R.ANGER. (2011). *Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction*. (doctorat), Lyon, Lyon.
- R.Bahar, M.Benazzoug, & S.Kenai. (2004). Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement & Concrete Composites*, 26, 811–820.

- R.Jowitt, & P.Wagstaffe. (1989). *The certification of the water content of microcrystalline cellulose (mcc) at 10 water activities.*: COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES.
- Rigassi, V. (1995). *Compressed earth blocks: Manual of production* (Vol. 1): Vieweg.
- Ruskulis, O. (1991). Additives to clay-organic.
- S.Goodhewa, & R.Griffithsb. (2005). Sustainable earth walls to meet the building regulations. *Energy and Buildings*, 37, 451–459.
- S.Hejazi, M.Sheikhzadeh, S.Abtahi, & A.Zadhoush. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 30, 100–116.
- Service, A. p. (2018). Ciment: Gica enregistre une production record de près de 14 millions de tonnes en 2017. Retrieved from <https://www.aps.dz/economie/68087-ciment-gica-enregistre-une-production-record-de-pres-de-14-millions-de-tonnes-en-2017>
- T.Ashour, A.Korjenic, & S.Korjenic. (2015). Equilibrium moisture content of earth bricks biocomposites stabilized with cement and gypsum. *Cement & Concrete Composites*, 59, 18–25.
- T.Ashour, H.Georg, & W.Wuc. (2011). An experimental investigation on equilibrium moisture content of earth plaster with natural reinforcement fibres for straw bale buildings. *Applied Thermal Engineering*, 31, 293-303.
- T.Berrehaïl. (2009). *La terre un matériau de construction, une alternative pour une solution durable*. (Magister), MENTOURI, Contantine.
- T.Ochsner, R.Horton, & T.Ren. (2001). A new perspective on soil thermal properties. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 1641–1647.
- Touré, P. M., Sambou, V., Faye, M., Thiam, A., Adj, M., & Azilinson, D. J. J. o. B. E. (2017). Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (cseb). *13*, 266-271.
- X.Faure. (2007). *Optimisation d'enveloppe hybride pour bâtiment à haute performance énergétique*. (Doctorat), Joseph Fourier, Grenoble.
- Y.Millogo, J.C.Morel, Aubert, J. E., & K.Ghavami. (2013). Experimental analysis of pressed adobe blocks reinforced with hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials*, 52, 71–78.
- Z.Jamellodin, Z.Talib, R.Kolop, & Noor, N. M. (2010). *The effect of oil palm fibre on strength behaviour of soil*. Paper presented at the 3rd SANREM Conference.

ANNEXE I

DONNEES METEOROLOGIQUES DE M'CHOUNECHE

M'chouneche : 35.0°N/ 6°E Altitude : 329 m

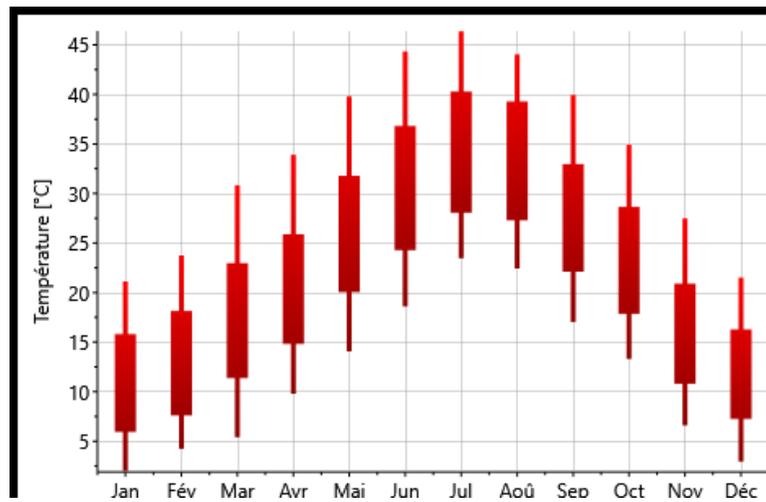


Figure 79 Températures mensuelles (source: meteonorm)

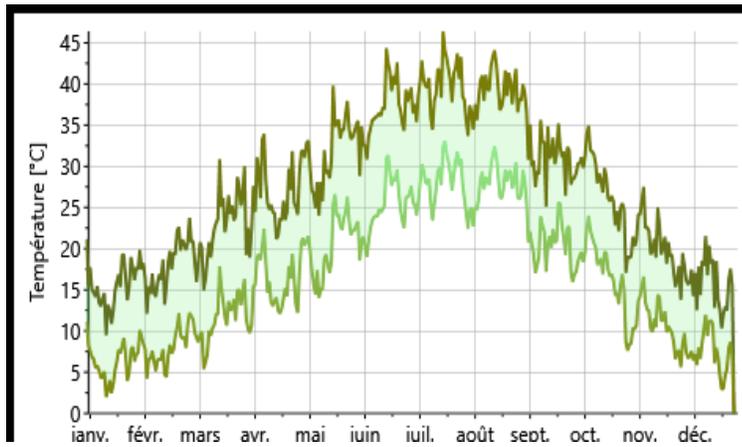


Figure 80 températures journalières maximales et minimales (source : meteonorm)

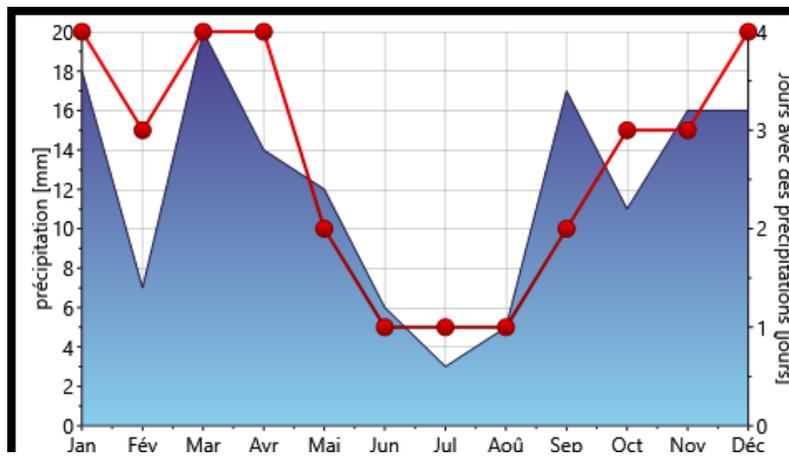


Figure 81 les précipitations annuelles (source : meteonorm)

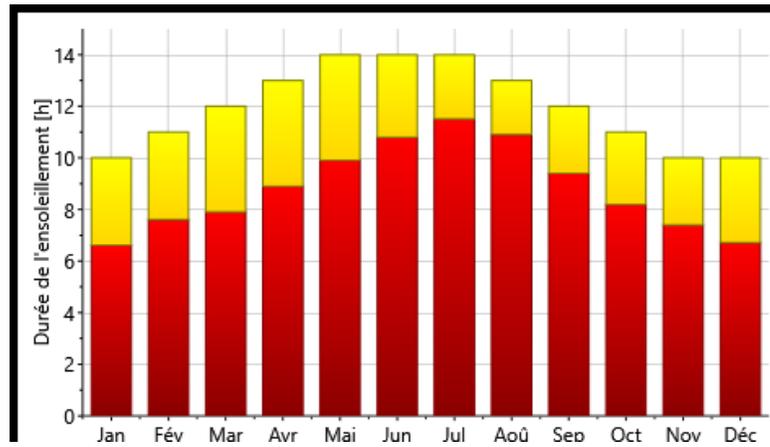


Figure 82 durées d'ensoleillement (source : meteonorm)

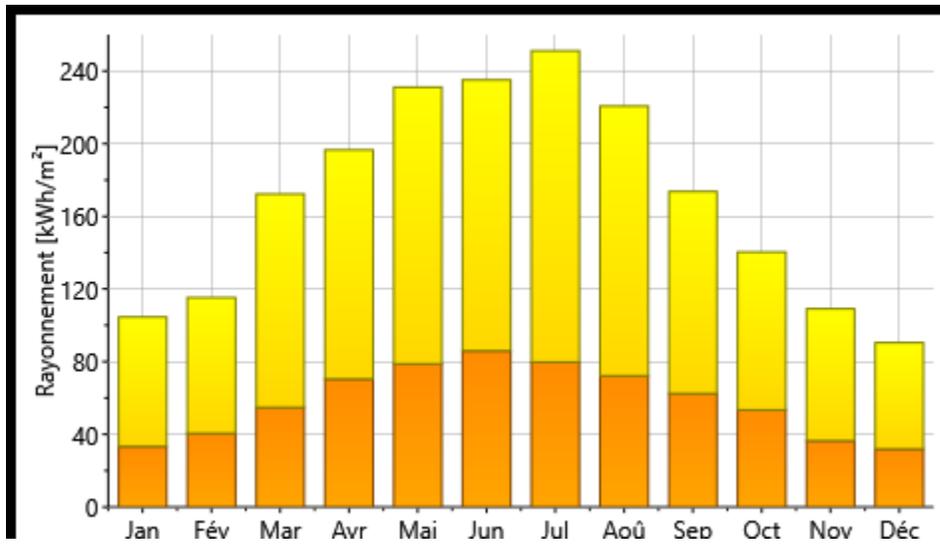


Figure 83 Rayonnement diffus et global

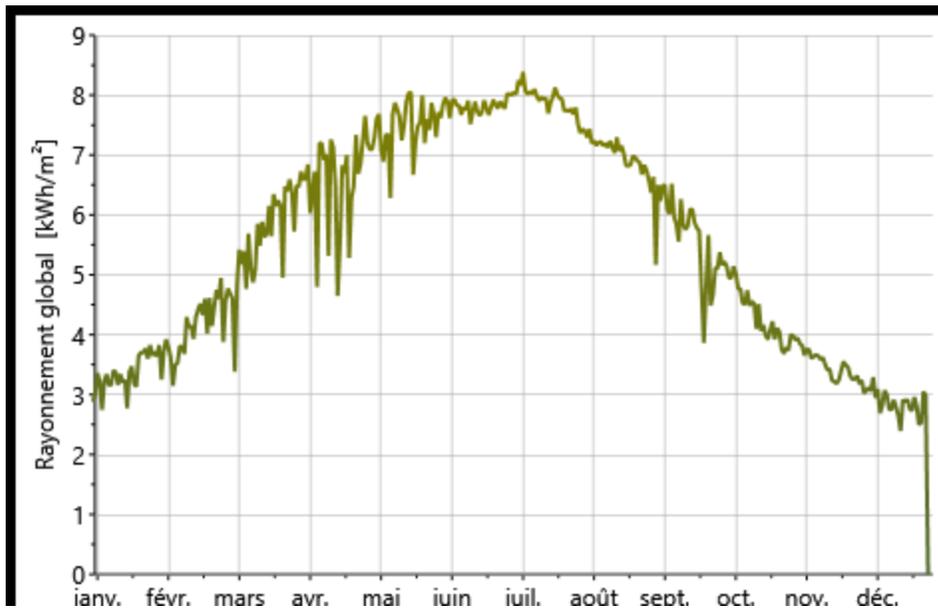


Figure 84 Rayonnement global journalier

ANNEXE II

DONNEES METEOROLOGIQUES D'ICHMOUL

Ichmoul: 35.3°N/ 6.5°E Altitude : 2036 m

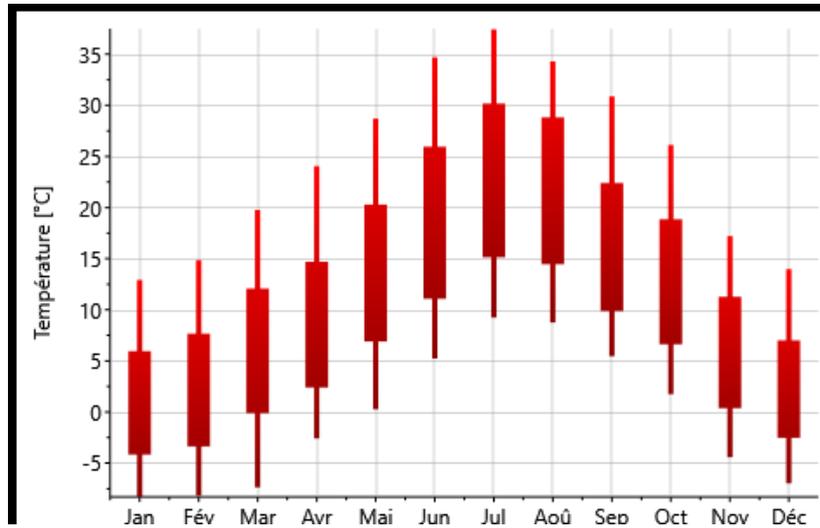


Figure 85 Températures mensuelles (source: meteonorm)

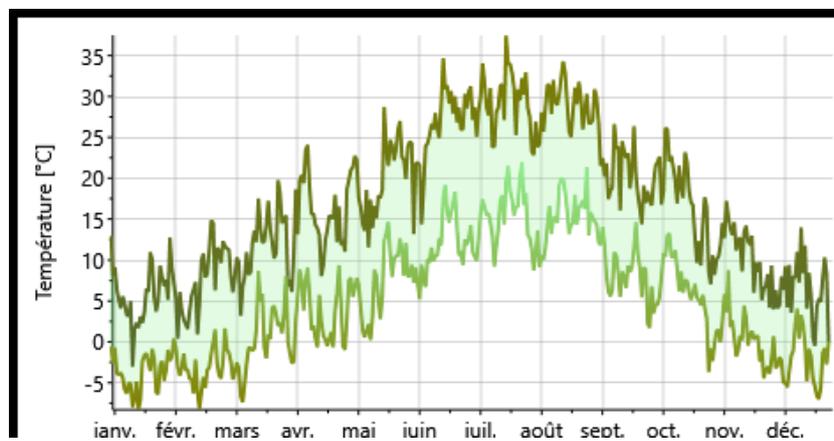


Figure 86 températures journalières maximales et minimales (source : meteonorm)

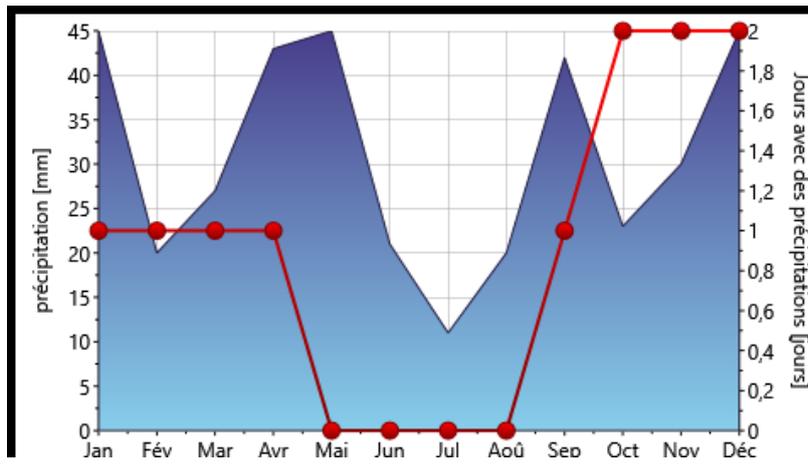


Figure 87 1les précipitations annuelles (source : meteonorm)

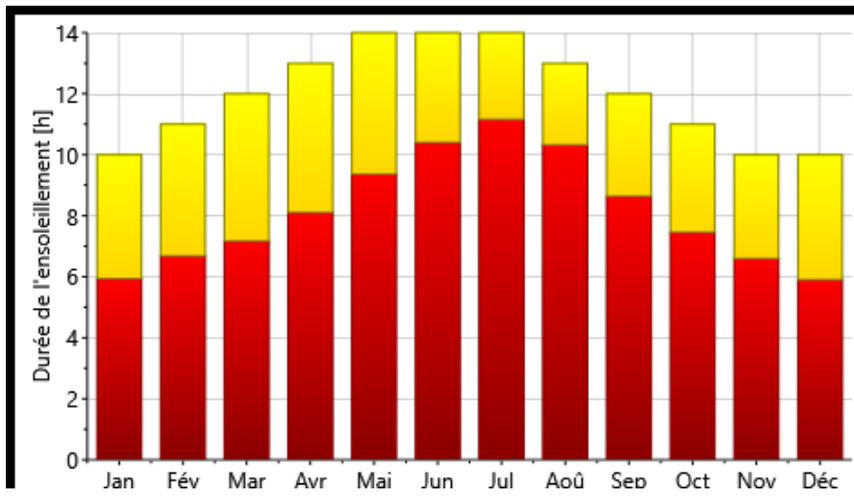


Figure 88 durées d'ensoleillement (source : meteonorm)

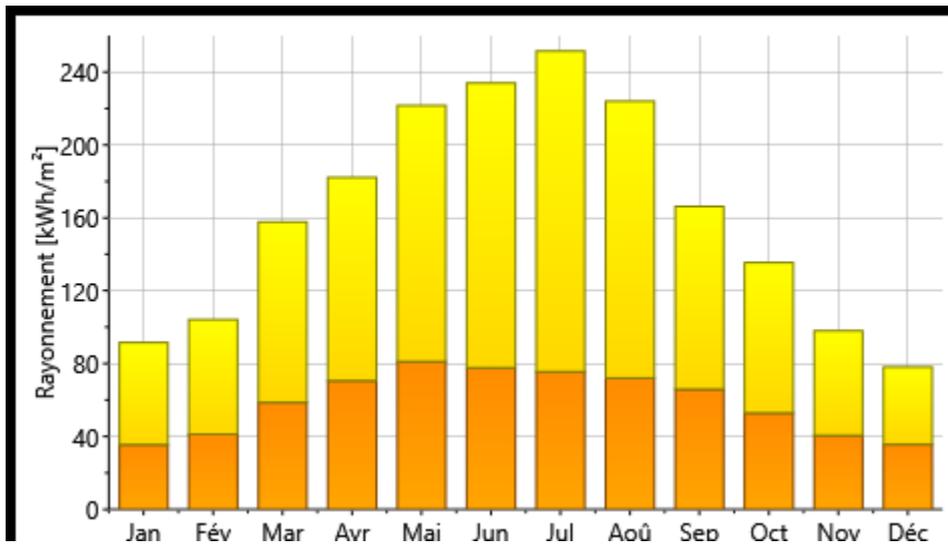


Figure 89 Rayonnement diffus et global

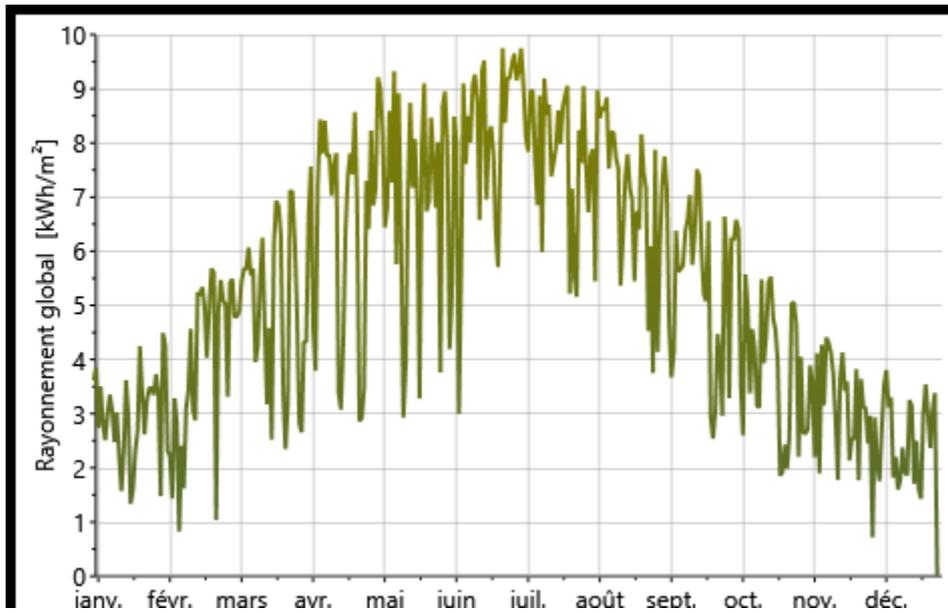
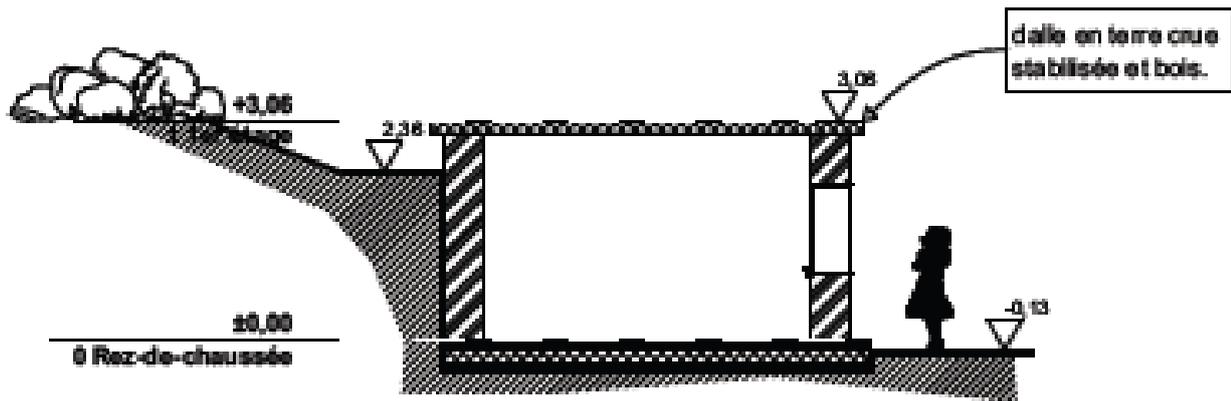


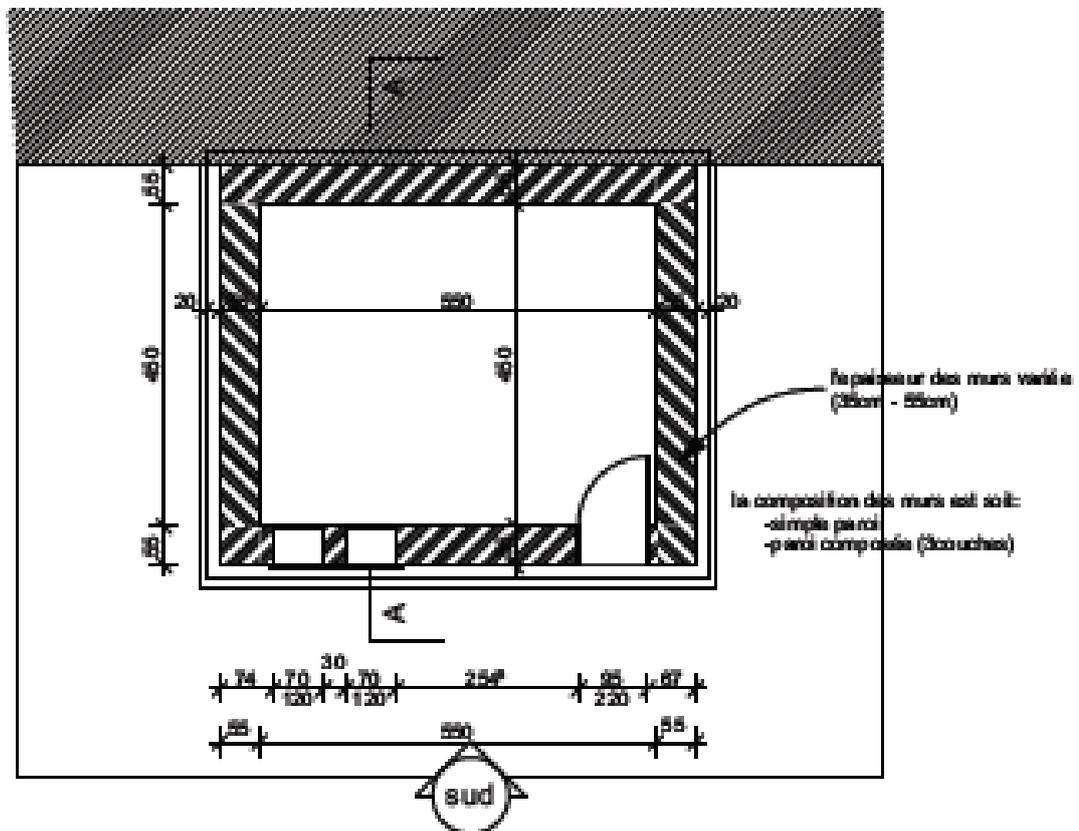
Figure 90 Rayonnement global journalier



A

Coupe AA'

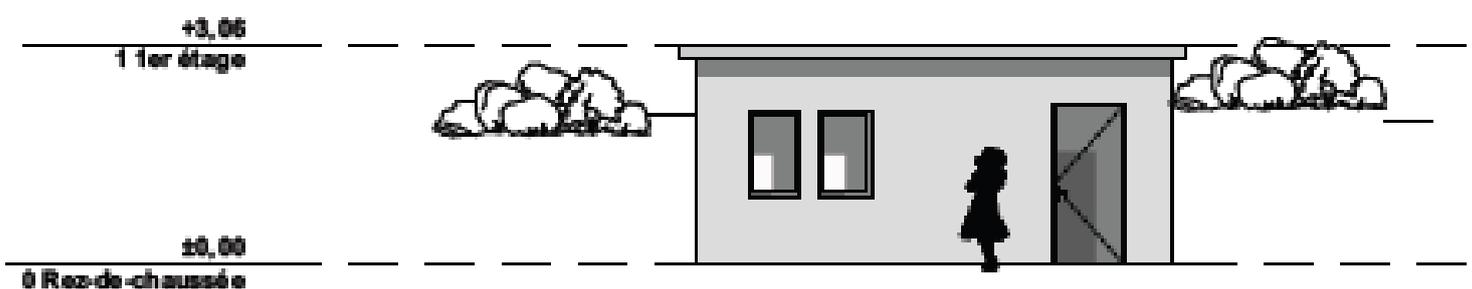
1:100



0.

Rez-de-chaussée

1:100



sud

Façade principale

1:100