

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB BLIDA 1

FACULTÉ DE TECHNOLOGIES

DÉPARTEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES



## Mémoire présenté en vue d'obtention du diplôme de master en énergies renouvelables

Option : Énergies renouvelables et habitat bioclimatique

Thème :

Elaboration d'un nouveau matériau biocomposite a base de déchets de  
palmier dattier

Présenté par :

SEDDIKI Chaimaa

Soutenu publiquement le : 13/07/2023 devant le Jury composé de :

Mme. Oukaci soumia	Docteur	USDB	Promoteur
Mr.Hamid Abdelkader	Professeur	USDB	Président
Mme. Guebli wassila	Docteur	USDB	Examineur

2022/2023

## REMERCIEMENTS

Je suis remplie d'une immense gratitude envers Mr. HAMID Abdelkader et Mme OUKACI Soumia. Leur soutien inestimable et leur dévouement ont été des cadeaux précieux dans mon parcours. Chaque instant qu'ils ont consacré à m'aider a été empreint de générosité et de bienveillance, et je suis profondément touchée par leur présence à mes côtés. Leurs conseils avisés ont illuminé mon chemin, dissipant mes doutes et m'encourageant à atteindre de nouveaux sommets. Je n'oublierai jamais les moments partagés, les discussions enrichissantes et la confiance qu'ils ont placée en moi.

Je tiens à remercier sincèrement les professeurs du département des énergies renouvelables. Leur expertise et leur enseignement ont joué un rôle déterminant dans mon parcours, en me fournissant une base solide de connaissances et de compétences.

Je suis profondément reconnaissante envers mon collègue DOUIFI Mohammed Amin et la doctorante MAGHRAOUI Chaima pour leur soutien inestimable dans l'élaboration de ce mémoire.

Enfin, je souhaite témoigner ma profonde gratitude envers tous les membres du Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB), en particulier Mme SLYEMI Amina, Ingénieur de soutien à la recherche, pour son professionnalisme, sa disponibilité et sa gentillesse remarquable. Leur collaboration et leur soutien tout au long de ce projet ont été d'une valeur inestimable.

*Seddiki*

*Chaimaa*

# Dédicace

À la mémoire de mon cher père,

Ton absence me plonge dans une profonde tristesse, et les mots ne suffisent pas à exprimer l'ampleur de mon chagrin. J'aurais tant souhaité que tu sois à mes côtés en ce jour. Que ce travail soit une humble prière pour le repos éternel de ton âme, et que ta lumière continue de guider ma route.

À ma chère mère,

Aucune dédicace ne serait à la hauteur pour exprimer la gratitude et le respect que je porte envers toi. Les sacrifices que tu as consentis pour mon éducation ont façonné la personne que je suis aujourd'hui. Je prie Dieu le Tout-Puissant de te préserver une santé de fer et de t'accorder une longue vie, afin que tu puisses continuer à être le phare qui illumine ma vie.

À mes chères sœurs, Khadîdja et Safia, ainsi qu'à mon frère Abdelkrim, Vous êtes mes piliers, mes confidents et mes plus grands soutiens. Merci d'être là à chaque étape de ma vie, de m'encourager et de croire en moi. Votre amour inconditionnel est une bénédiction que je chéris chaque jour. À ma chère amie Melissa, je te remercie du fond du cœur d'être une amie précieuse. Ta présence et ton soutien m'ont donné le courage de surmonter les difficultés. Notre amitié est une source d'inspiration et de force inébranlable.

*Seddiki*

*Chaimaa*

## ملخص :

المواد الحيوية هي بدائل مستدامة للمواد التقليدية المستخدمة في البناء. يتم تصنيعها من مواد خام عضوية. تتميز هذه المواد بطابعها المتجدد وتأثيرها المنخفض على البيئة.

يركز هذا العمل على تطوير مادة حيوية مركبة جديدة مستخدمة للعزل الحراري في المباني من نفايات نخيل التمر. تم إجراء التوصيف الحراري للعينات المحضرة في المركز الوطني للدراسة والبحث المتكامل في مجال البناء (CNERIB). وصلت نتائج التوصيف إلى النتائج التالية بالنسبة للتوصيل الحراري: 0.253 واط/م.كلفن للمجموعة 01، 0.149 واط/م.كلفن للمجموعة 02 و 0.23 واط/م.كلفن للمجموعة 03

تم إجراء محاكاة حرارية ديناميكية (STD) باستخدام برنامج Pléiades لتقييم سلوك المادة المحضرة وأوراق النخيل في دراسة حالة تقع في عين صالح. أظهرت النتائج المستحصلة أن استخدام المواد الحيوية المحلية يمكن أن يقلل من الاحتياجات الحرارية واحتياجات التكييف حتى 48%. في حالة المحاكاة بدون ضبط للحرارة، كانت الفروقات بالنسبة للفترة الصيفية والشتوية على التوالي 2.6 درجة مئوية و 4 درجات مئوية، وبالنسبة للحرارة الخارجية، كانت 6.2 درجة مئوية و 12 درجة مئوية. تؤكد هذه النتائج أهمية استغلال الأجزاء المختلفة لنخيل التمر، مثل أوراق النخيل، وإسهامها في تحسين الراحة الحرارية في المساكن الحديثة في المناطق القاحلة

**الكلمات المفتاحية :** المواد الحيوية، المادة الحيوية المركبة، العزل الحراري، Pléiades، المحاكاة الحرارية الديناميكية (STD)، استغلال، المساكن الحديثة، المناطق القاحلة

## Résumé :

Les matériaux biosourcés sont des alternatives durables aux matériaux traditionnels utilisés dans la construction. Ils sont fabriqués à partir de matières premières biologiques. Ces matériaux se distinguent par leur caractère renouvelable et leur faible impact sur l'environnement.

Le présent travail se concentre sur le développement d'un nouveau matériau biocomposite à base de déchets de palmier dattier pour l'isolation thermique des bâtiments. La caractérisation thermophysique des échantillons élaborés a été réalisée au sein du Centre National de l'Étude et de la Recherche Intégrées du Bâtiment (CNERIB). Les résultats de la caractérisation ont révélé les conductivités thermiques suivantes : 0.253 W/m·K pour le groupe 01, 0.149 W/m·K pour le groupe 02 et 0.23 W/m·K pour le groupe 03.

En utilisant le logiciel Pléiades (version 5.23.4.4), des simulations thermiques dynamiques (STD) ont été effectuées pour évaluer le comportement du matériau élaboré, ainsi que des folioles, dans une étude de cas située à In Salah. Les résultats obtenus démontrent que l'utilisation de matériaux biosourcés locaux permet de réduire les besoins en chauffage et en climatisation jusqu'à 48%. Dans le cas de la simulation sans consigne de thermostat, les écarts par rapport au cas initial pour la période estivale et hivernale sont respectivement de 2.6°C et 4°C, et par rapport à la température extérieure, ils sont de 6.2°C et 12°C. Ces résultats soulignent l'importance de l'exploitation des différentes parties du palmier dattier, telles que les folioles, et leur contribution à l'amélioration du confort thermique dans les habitations contemporaines en région aride.

**Mots clés:** matériaux biosourcés, matériau biocomposite, isolation thermique, Pléiades, simulation thermique dynamique (STD), exploitation, habitations contemporaines, région aride.

**Abstract:**

Biosourced materials are sustainable alternatives to traditional building materials. They are made from biological raw materials. These materials are distinguished by their renewable nature and their low impact on the environment.

This work focuses on the development of a new date palm waste based biocomposite material for the thermal insulation of buildings. The thermophysical characterization of the samples developed was carried out at the National Centre for Integrated Building Studies and Research (CNERIB). The characterization results revealed the following thermal conductivities: 0.253 W/m·K for Group 01, 0.149 W/m·K for Group 02, and 0.23 W/m·K for Group 03.

Using Pléiades software (version 5.23.4.4), Dynamic Thermal Simulations (STD) were performed to assess the behavior of the developed material and leaflets in a case study located in In Salah. The results show that the use of local bio-based materials reduces heating and cooling requirements by up to 48%. In the case of the simulation without thermostat setpoints, the deviations from the initial case for the summer and winter periods are respectively 2.6°C and 4°C, and from the outside temperature, they are 6.2°C and 12°C. These results highlight the importance of using different parts of the date palm, such as leaflets, and their contribution to improving thermal comfort in contemporary homes in arid regions.

**Keywords :** biosourced materials, biocomposite material, thermal insulation, Pleiades, dynamic thermal simulation (STD), farm, contemporary housing, arid region

## *Sommaire*

### **INTRODUCTION GENERALE**

#### **CHAPITRE I: ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE ET ETAT DE L'ART**

I.1.	INTRODUCTION:.....	3
I.2.	CONSTRUCTION DURABLE :.....	3
I.3.	LE CONFORT ET L'ISOLATION THERMIQUE :.....	3
I.3.1	Le confort thermique : .....	3
I.3.2	L'isolation thermique :.....	4
I.4.	MATERIAUX BIOSOURCES : .....	5
I.4.1	Classification des isolants biosourcés :.....	6
I.5.	LES BIO-COMPOSITES :.....	8
I.5.1	Matrice :.....	9
I.5.2	Renforts :.....	9
I.6.	LES MATERIAUX BIOSOURCES DANS L'HABITAT : .....	10
I.6.1	Bois de palmier dattier :.....	10
I.6.2	Propriétés de bois de palmier dattier :.....	11
I.7.	COMPOSITES A BASE DE BOIS DE PALMIER DATTIER :.....	13
I.7.1	Composites à base de gypse :.....	13
I.7.2	Composites à base cimentaire : .....	14
I.7.3	Composites à base d'argile :.....	16
I.8.	REVUE DE LA LITTERATURE SUR LES AVANCEES DANS LA CREATION DE COMPOSITES A BASE DE FIBRES VEGETALES:.....	17
I.9.	CONCLUSION : .....	18

#### **CHAPITRE II : METHODOLOGIE D'ELABORATION DES MATERIAUX**

II.1.	INTRODUCTION :.....	19
II.2.	LES MATERIAUX UTILISES :.....	19
II.2.1	Les fibres de palmier dattier :.....	19
II.3.	MATERIELS UTILISES POUR LA PREPARATION DES EPROUVETTES :.....	21
II.4.	METHODOLOGIE D'ELABORATION :.....	21
II.4.1	Le broyage mécanique et classification granulométrique : .....	22
II.4.2	Choix du taux de gâchage : .....	23
II.4.3	Calcul des masses de fibres et de matrice dans les composites :.....	24
II.5.	CONFECTION DES EPROUVETTES :.....	24
II.5.1	Conditions de travail lors de la confection des éprouvettes : .....	25
II.6.	CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE :.....	25
II.6.1	Résultats de la caractérisation thermophysique :.....	27
II.6.2	Interprétation des résultats : .....	27
II.7.	CONCLUSION : .....	28

#### **CHAPITRE III : SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE STD**

III.1.	INTRODUCTION :.....	30
III.2.	PRESENTATION DE LA REGION ETUDIEE : .....	30
III.2.1	Données géographiques : .....	30
III.2.2	Données climatiques : .....	30
III.2.3	Classification de la ville d'in Salah : .....	31
III.2.4	Caractéristiques météorologiques de la ville d'In Salah : .....	31

---

---

III.3. PRESENTATION DU MODELE DE CONSTRUCTION ETUDIE : .....	34
III.3.1 Caractéristiques des éléments constructifs : .....	36
III.4. LA SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE (STD) : .....	36
III.4.1 Interfaces des logiciels : .....	36
.....	36
III.4.2 Etapes de simulation : .....	38
III.5. CONCLUSION : .....	52
<b>CHAPITRE IV : ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS</b>	
IV.1. INTRODUCTION : .....	53
IV.2. LES SIMULATIONS SANS CONSIGNE DE THERMOSTAT : .....	53
IV.2.1 Les simulations en période estivale : .....	53
IV.2.2 Les simulations en période hivernale : .....	57
IV.3. LES SIMULATIONS AVEC CONSIGNE DE THERMOSTAT: .....	61
IV.3.1 Les simulations en période estivale : .....	61
IV.3.2 Les simulations en période hivernale : .....	62
IV.4. CONCLUSION : .....	64
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	

## Liste des figures

Figure 1: Schéma d'une palme .....	4
Figure I.1 : Schéma illustratif d'un matériau composite [18] .....	8
Figure I.2 : Les différentes familles de matrice [18]. .....	9
Figure I.3 : Les différentes familles de renforts [18]. .....	10
Figure I.4 : Palmeraie[23]. .....	11
Figure I.5 : a. Base pétiolaire ; b et c. Echantillons avec différentes directions des fibres [5]. .....	12
Figure II. 1: Le broyeur et la balance électronique . .....	21
Figure II. 2 : Le CT-mètre utilisé pour les tests thermophysiques .....	26
Figure II. 3 : Mesure de la conductivité thermique des éprouvettes.....	26
Figure II. 4 : Mesure de la conductivité thermique des échantillons en poudre.....	27
Figure III. 1: In Salah en carte géographique [36] .....	30
Figure III. 2 : Le rayonnement diffus et global de la ville d'In Salah [38] .....	31
Figure III. 3 : Rayonnement global journalier de la ville d'In Salah [38] .....	32
Figure III. 4 : Durée d'insolation de la ville d'In Salah [38] .....	32
Figure III. 5 : Les températures de la ville d'In Salah [38]. .....	33
Figure III. 6 : Température journalière de la ville d'In Salah [38] .....	33
Figure III. 7 : Plan d'assemblage du cas d'étude [39]. .....	34
Figure III. 8 : Les différentes interfaces des outils de Pléiades version 5.23.4.4. ....	38
Figure III. 9: Procédure d'injection des données sur pléiade et simulation. ....	39
Figure III. 10 : Création du fichier météorologique.....	40
Figure III. 11 Les caractéristiques du matériau à base de fibres de palmier dattier.....	40
Figure III. 12 : Éprouvette du groupe 02. ....	40
Figure III. 13 : les folioles de palmier dattier. ....	41
Figure III. 14 :Les caractéristiques des folioles de palmier dattier. ....	41
Figure III. 15 : La composition du Plancher-bas et Plancher-haut. ....	41
Figure III. 16 : La composition du mur intérieur et extérieur. ....	42
Figure III. 17 : Insertion des éléments constructifs dans le Modeleur.....	42
Figure III. 18 : Le plan de logement étudié réalisé avec pléiades Modeleur. ....	43
Figure III. 19 : Le plan du logement en 3D dans pléiades Modeleur.....	43
Figure III. 20 : Scénario d'occupation pour la chambre parentale.....	44
Figure III. 21 : Scénario d'occupation pour la chambre d'enfants. ....	44
Figure III. 22 : Scénario d'occupation pour le séjour .....	45
Figure III. 23 : Scénario d'occupation pour la cuisine. ....	45
Figure III. 24 : Scénario de la puissance dissipée de la chambre parentale. ....	46
Figure III. 25 : Scénario de la puissance dissipée de la chambre d'enfants.....	46
Figure III. 26 : Scénario de la puissance dissipée du séjour.....	46
Figure III. 27 : Scénario de la puissance dissipée de la cuisine. ....	47
Figure III. 28 : Scénario d'infiltration pour la simulation avec consigne. ....	47
Figure III. 29 : Scénarios de ventilation pour la simulation sans consigne (les chambres + le séjour). ....	48
Figure III. 30 : Scénarios de ventilation pour la simulation sans consigne (la cuisine). ....	48
Figure III. 31: scénarios d'occultation hivernale et estivale .....	48

---

Figure III. 32: Scénarios de consigne de thermostat de climatisation et de chauffage. ....	49
Figure III. 33: Schéma de la démarche méthodologique pour l'intégration des nouveaux matériaux.....	49
Figure III. 34: composition du mur extérieur de la variante 02.....	50
Figure III. 35 : composition du plancher haut de la variante A.....	50
Figure III. 36: Composition du plancher haut de la variante B. ....	51
Figure III. 37: Composition du plancher haut de la variante C. ....	51
Figure IV. 1 : Évolution des températures pendant la semaine la plus chaude pour la variante 01. ....	53
Figure IV. 2 : Évolution des températures pendant la semaine la plus chaude pour la variante 02. ....	53
Figure IV. 3: Évolution des températures pendant la semaine la plus chaude pour la variante 03-A.....	54
Figure IV. 4 : Évolution des températures pendant la semaine la plus chaude pour la variante 03-B.....	54
Figure IV. 5: Évolution des températures pendant la semaine la plus chaude pour la variante 03-C.....	55
Figure IV. 6: Évolution des températures pendant la semaine la plus chaude pour la variante 04. ....	55
Figure IV. 7: Évolution des températures pendant la semaine la plus froide pour la variante 01. ....	57
Figure IV. 8: Évolution des températures pendant la semaine la plus froide pour la variante 02. ....	57
Figure IV. 9 : Évolution des températures pendant la semaine la plus froide pour la variante 03-A. ....	58
Figure IV. 10: Évolution des températures pendant la semaine la plus froide pour la variante 03-B.....	58
Figure IV. 11: Évolution des températures pendant la semaine la plus froide pour la variante 03-C.....	59
Figure IV. 12: Évolution des températures pendant la semaine la plus froide pour la variante 04. ....	59
Figure IV. 13: Comparaison des besoins en climatisation pour les différentes variantes. ....	61
Figure IV. 14: Comparaison des besoins en chauffage pour les différentes variantes. ....	62
Figure IV. 15: Comparaison de l'indice de performance énergétique entre le cas initial et la variante 04....	64

---

---

## Liste des tableaux

Tableau I. 1: Absorption d'eau de certaines fibres naturelles [26, 28].....	13
Tableau II. 1 : Photos réelles des différentes parties du palmier dattier utilisées. ....	19
Tableau II. 2 Classification granulométrique des échantillons après broyage. ....	22
Tableau II. 3 : Masses de fibres et de matrices correspondantes aux fractions massiques.....	24
Tableau II. 4 : Apparence des éprouvettes par groupe après confection. ....	25
Tableau III. 1: Classification thermique de la ville d'IN SALAH [37] .....	31
Tableau III. 2: Représentations visuelles du cas d'étude [39]. ....	35
Tableau III. 3: Liste des matériaux utilisés sur les logements étudiés [39]. ....	36
Tableau IV. 1: Comparaison des taux de réduction des besoins en climatisation et en chauffage des différentes variantes par rapport au cas initial .....	63
Tableau IV. 2: Besoins en climatisation et chauffage par variantes (en kWh) .....	63

## Liste des symboles et des abréviations

APRUE : Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie

FPD : Fibres de palmier dattier

STD : simulation thermique dynamique

$\lambda$  : la conductivité thermique en  $W/(m.K)$

R : la résistance thermique en  $m^2.K/W$

e : épaisseur en mètre

C : la chaleur spécifique en  $J/(kg.K)$

$\rho$  : La masse volumique en  $kg/m^3$ .

S : La capacité thermique en  $Wh/(m^3.K)$

CNERIB : Centre National de l'Étude et de la Recherche Intégrées du Bâtiment

e/p : le taux de gâchage

$M_f$  : la masse des fibres

$M_m$  : la masse de la matrice

$\varphi_f$  : la fraction massique

T0 : Température d'essai

DTR : Document technique réglementaire

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Ces dernières décennies, le développement durable est devenu l'un des défis majeurs. Il repose sur la sensibilisation à l'environnement et l'importance de réduire les impacts de l'activité humaine sur notre écosystème.

En Algérie, la demande croissante en énergie est principalement attribuable à l'amélioration du niveau de vie de la population. Pour faire face à ce défi, l'efficacité énergétique se présente comme une solution appropriée. L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie (APRUE) a mis en place un programme ambitieux d'efficacité énergétique à l'horizon 2030, qui vise à traiter les secteurs de consommation ayant un impact significatif sur la demande d'énergie, notamment le bâtiment, le transport et l'industrie [1]. L'objectif de ce programme est de réduire la consommation énergétique de 9% en introduisant des équipements et des technologies performantes. Dans le secteur du bâtiment, le programme se concentre sur la promotion et la diffusion de pratiques et de technologies novatrices en matière d'isolation thermique, tant pour les constructions existantes que pour les nouvelles [1].

L'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment en Algérie offre une opportunité idéale pour valoriser les abondantes ressources en fibres végétales du pays. En utilisant des matériaux comme le liège et le palmier dattier pour l'isolation thermique, l'Algérie peut non seulement améliorer l'efficacité énergétique de ses constructions, mais également soutenir la valorisation pratique de ces ressources locales. Cette approche favorise ainsi le développement durable en réduisant la consommation d'énergie et en promouvant l'utilisation de matériaux biosourcés dans le secteur du bâtiment.

L'Algérie bénéficie d'abondantes ressources en fibres végétales, telles que l'alfa, le diss, le liège et le palmier dattier. Toutefois, malgré leur potentiel, la valorisation pratique de ces ressources demeure insuffisamment exploitée [2,3,4].

Les fibres dérivées du bois de palmier dattier sont considérées comme des déchets en Algérie. Malgré leur abondance significative (210 000 tonnes de pétioles, 73 000 tonnes de folioles et 52 000 tonnes de grappes chaque année) [2,5], le bois de palmier n'est pas utilisé dans divers secteurs industriels. Par conséquent, il est nécessaire d'explorer le potentiel d'utilisation de cette ressource pour soutenir l'industrie nationale. En raison de leurs excellentes propriétés thermiques, les fibres de palmier dattier (FPD) se révèlent être un matériau de renforcement extrêmement efficace pour l'isolation thermique [2,5].

L'objectif de cette étude est le développement de matériaux biocomposites, constitués de fibres de palmier dattier dispersées dans une matrice de gypse, en vue de leur utilisation dans l'isolation thermique des bâtiments.

La problématique majeure de ce travail se pose ainsi : Est-ce que ces nouveaux biocomposites répondront aux critères techniques requis pour leur application en tant qu'isolants thermiques dans les bâtiments ?

Dans le contexte de notre travail, voici les hypothèses que nous avons formulées :

- L'exploitation des diverses parties du palmier dattier pourrait conduire à une amélioration des propriétés thermophysiques de l'échantillon élaboré.

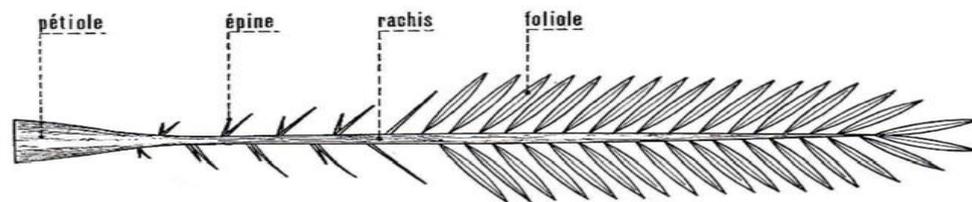


Figure 1: Schéma d'une palme

- L'incorporation de ce matériau innovant dans les divers éléments de construction offre le potentiel d'améliorer le confort thermique des habitations contemporaines dans les régions arides.

Ce projet de fin d'études est organisé en quatre chapitres, chacun ayant pour objectif d'explorer de manière approfondie divers aspects liés à la recherche en cours :

- Le premier chapitre est composé de deux parties. La première partie est consacrée à la revue de littérature sur l'isolation thermique, les matériaux biocomposites et les isolants biosourcés. La deuxième partie se concentre exclusivement sur les études antérieures portant sur les propriétés thermophysiques des composites à base de bois de palmier dattier.
- Le deuxième chapitre est dédié à la section expérimentale, qui comprend une description des matériaux utilisés, de la méthode de confection et des résultats de la caractérisation thermophysique, ainsi qu'une interprétation approfondie de ces résultats.
- Le troisième chapitre comprend l'identification de notre cas d'étude, la présentation du logiciel utilisé et les étapes de simulation thermique dynamique (STD) effectuées.

- Le dernier chapitre se focalise sur l'analyse détaillée et l'interprétation des résultats issus des simulations effectuées dans le chapitre précédent.

À la conclusion de cette étude, nous présenterons une synthèse générale qui mettra en avant les résultats obtenus ainsi que les perspectives pour de futures recherches.

# **Chapitre I:**

## **Analyse bibliographique et état de l'art**

## **I.1. Introduction:**

Les réglementations en vigueur encouragent le secteur de la construction à opter pour des bâtiments durables et respectueux de l'environnement. L'amélioration de la performance énergétique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre font partie des objectifs à atteindre. L'utilisation de matériaux biosourcés dans la construction est l'une des solutions envisageables actuelles et futures pour réduire l'impact écologique. Dans ce chapitre, nous commencerons par définir les notions de base de la construction durable et les critères de choix d'un bon isolant thermique, la présentation des matériaux biosourcés et leur classification. La deuxième partie portera sur une recherche bibliographique sur les propriétés principales du bois de palmier dattier ainsi que sur la synthèse des travaux antérieurs concernant les matériaux composites à base de bois de palmier dattier. La dernière partie sera consacrée à une revue de la littérature sur les avancées dans la création de composites à base de fibres végétales.

## **I.2. Construction durable :**

La construction durable, également connue sous le nom d'écoconstruction ou de "Green Building", vise à améliorer considérablement l'impact environnemental et sociétal des bâtiments. Son objectif principal est de préserver les ressources en matières premières, en énergie et en eau, de réduire les émissions de gaz à effet de serre pour lutter contre le changement climatique, de minimiser les déchets et autres formes de pollution, et d'assurer un haut niveau de confort et de santé pour les occupants grâce à l'utilisation de matériaux de qualité sanitaire et environnementale élevée, à la fois pour la construction et l'isolation thermique et acoustique [6].

Les avantages de la construction durable sont observés à deux niveaux : celui de l'impact environnemental et celui de la qualité de vie des occupants.

En ce qui concerne l'impact environnemental, il est important de noter la priorité accordée aux matériaux locaux, renouvelables, biosourcés et recyclables pour les occupants. Les avantages principaux incluent un environnement sain avec une qualité de l'air intérieur exempte de polluants liés aux matériaux, ainsi qu'un confort de vie amélioré grâce à une isolation acoustique et thermique optimisée, une gestion efficace des sources d'énergie et de la luminosité [6].

## **I.3. Le confort et l'isolation thermique :**

### **I.3.1 Le confort thermique :**

Le confort thermique se réfère à l'état de santé du corps en relation avec l'environnement thermique, mais cette notion est subjective et dépend de paramètres spécifiques sur lesquels l'isolation thermique doit agir. [7] :

- **Température des parois** : en plus de la température ambiante, la température des surfaces opaques ou transparentes joue un rôle crucial dans le confort thermique. Le mode de chauffage et surtout une isolation efficace peuvent résoudre ce problème en réduisant l'écart de température entre l'air et les surfaces des parois [7].
- **Humidité de l'air** : le taux d'humidité relative de l'air est également un facteur qui influence la sensation de confort thermique. Il est recommandé qu'en hiver, ce taux se situe entre 30% et 70%. En été, pour favoriser la transpiration du corps, il est préférable que l'air soit sec. [7].
- **Courants d'air** : les courants d'air sont très appréciés en été car ils favorisent la transpiration, mais ils peuvent être très désagréables en hiver car ils augmentent les échanges thermiques entre le corps et l'air, entraînant une sensation de froid. [7].

### I.3.2 L'isolation thermique :

L'isolation thermique joue un rôle crucial dans la réduction de la consommation d'énergie, ainsi que dans la création d'un environnement de vie sain et confortable dans un bâtiment. En effet, une bonne isolation thermique permet de choisir des équipements de climatisation moins puissants, ce qui se traduit par des économies d'énergie [8].

D'après la littérature, l'isolation thermique désigne une technique ou un matériau (ou combinaison de matériaux) visant à limiter les transferts de chaleur par conduction, convection et rayonnement entre l'intérieur et l'extérieur d'un logement. Elle retarde le flux de chaleur à l'intérieur ou à l'extérieur d'un bâtiment grâce à sa haute résistance thermique.

L'isolation thermique est essentielle pour garantir un niveau satisfaisant de bien-être thermique. Cette notion englobe des facteurs culturels et psychologiques au-delà du simple confort thermique, qui correspond à l'absence de sensations physiques désagréables telles que la sensation de froid ou de chaud [9].

#### I.3.2.1 Les grandeurs physiques:

- Plusieurs critères caractérisent un isolant. Ces derniers sont énumérés ci-dessous:
  - La quantité de chaleur qui peut être transférée dans un matériau en un temps donné pour une épaisseur donnée par mètre carré est caractérisée par la conductivité thermique ( $\lambda$ ), exprimée en W/(m.K). Plus cette valeur est faible, plus le matériau a des propriétés isolantes de qualité [10]. La conductivité thermique d'un matériau doit être inférieure à

0,065 W/(m.K). Généralement, un isolant de qualité a une valeur de  $\lambda$  qui se situe entre 0,035 et 0,045 W/(m.K) [11]

- La résistance thermique (R) d'une paroi, exprimée en m<sup>2</sup>.K/W, représente la capacité de cette dernière à résister au transfert de chaleur. Elle correspond au quotient entre l'épaisseur (e) du matériau constituant la paroi et sa conductivité thermique ( $\lambda$ ), comme formulé dans l'équation (1.1) [10].

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (1.1)$$

- La chaleur spécifique (C) est une mesure de la capacité d'un matériau à absorber et à stocker la chaleur. Elle indique la quantité d'énergie thermique nécessaire pour augmenter la température d'une unité de masse du matériau d'un degré Celsius. Elle est exprimée en J/(kg.K) [12].
- La masse volumique ( $\rho$ ) est mesurée en kg/m<sup>3</sup>. Pour assurer une bonne inertie thermique et une isolation phonique efficace, il est recommandé d'opter pour une masse volumique élevée. En revanche, pour une isolation thermique de qualité, une faible masse volumique est préférable [12,10].
- La capacité thermique (S) d'un matériau correspond à sa capacité à stocker de la chaleur en fonction de son volume, qui peut ensuite être restituée. Elle est exprimée en Wh/(m<sup>3</sup>.K) et se calcule en multipliant la chaleur spécifique du matériau (exprimée en Wh/(kg.K), notée C) par sa masse volumique (exprimée en kg/m<sup>3</sup>, notée  $\rho$ ), comme l'indique l'équation (1.2) [12].

$$S = C \times \rho \quad (1.2)$$

Ce sont principalement ces différentes caractéristiques qui doivent guider le choix de l'utilisateur vers un isolant plutôt qu'un autre en fonction de l'effet recherché : isolation thermique, inertie ou confort d'été.

#### **I.4. Matériaux biosourcés :**

Les caractéristiques les plus recherchées dans le domaine des matériaux de construction sont leur capacité à être renouvelables, respectueux de l'environnement, peu coûteux et dotés d'une haute résistance thermique [13].

Les matériaux biosourcés répondent à ces critères car leur matière première provient de la biomasse animale ou végétale. Les isolants biosourcés, tels que la laine, le chanvre et la paille,

peuvent être en rouleaux, en panneaux ou en vrac. Les bétons biosourcés sont des matériaux composites composés de particules ou de fibres végétales et d'un liant minéral. Les avantages de ces matériaux biosourcés sont nombreux, notamment leur faible impact sur l'environnement, l'utilisation de matières premières renouvelables et leur compétitivité économique [13].

Selon les recherches de Liu et al [13], l'intérêt croissant pour les matériaux biosourcés en tant qu'isolants a été observé à partir de 2003, mais le nombre d'études de recherche dans ce domaine a considérablement augmenté après 2010. Les auteurs ont également constaté que l'Algérie était l'un des cinq premiers pays en termes de recherche sur les matériaux biosourcés pour l'isolation thermique. Bien que le chanvre, le lin et les pailles soient les matériaux privilégiés pour la recherche en Europe et au Royaume-Uni, en Algérie, la recherche se concentre sur le bois, la paille et le palmier dattier.

À titre d'illustration, une étude réalisée par H. Chaïb et al [14] a examiné la performance thermique des briques en terre renforcées par des fibres de palmier dattier.

#### **I.4.1 Classification des isolants biosourcés :**

##### **I.4.1.1 Les isolants d'origine végétale :**

Les caractéristiques attrayantes et la disponibilité croissante des isolants d'origine végétale ont conduit à leur utilisation accrue dans le domaine de l'isolation. Parmi les matériaux isolants les plus couramment disponibles, on trouve la laine de bois, la laine de coton, la laine de lin, la laine de coco, la cellulose, la paille, le torchis, le liège expansé ainsi que le chanvre, sous forme de laines ou de bétons [15]. Cette section va se concentrer sur la description de certains des isolants les plus utilisés.

- **Fibre de bois :** Les panneaux en fibres de bois sont produits à partir de déchets de scieries tels que les écorces et les branches résineux qui ne contiennent aucun traitement chimique. Les fibres sont liées entre elles par la lignine qu'elles contiennent. Pour obtenir une épaisseur suffisante pour l'isolation, plusieurs panneaux sont collés ensemble à l'aide d'une colle synthétique. Leur conductivité thermique moyenne est comprise entre 0,040 et 0,050 W/(m.K) pour une masse volumique apparente variant entre 45 et 2000 kg/m<sup>3</sup>[16]. Les panneaux en fibres de bois sont des isolants thermiques et acoustiques efficaces ainsi que des régulateurs hygrométriques performants, contribuant ainsi à maintenir une atmosphère intérieure confortable. Ils peuvent être achetés sous forme de rouleaux, de panneaux ou en vrac [16].

- **Les panneaux de liège :** Le liège est un matériau naturel obtenu à partir de l'écorce du chêne-liège. Il est broyé et aggloméré à chaud avec sa résine naturelle, la subérine. Le liège offre des propriétés hydrofuges, une résistance aux insectes et à l'usure, ainsi que de bonnes caractéristiques acoustiques. Sa conductivité thermique varie de 0,037 à 0,040 W/(m.K) pour une densité apparente de 80 à 150 kg/m<sup>3</sup>. Il est recommandé de l'utiliser principalement en isolation extérieure dans des climats tempérés [16].
- **La laine de chanvre :** Les fibres de chanvre, obtenues à partir des tiges de chanvre, sont transformées en panneaux ou en rouleaux souples. Elles ont une densité de 25 à 35 kg/m<sup>3</sup> et une conductivité thermique d'environ 0,040 W/(m.K). La laine de chanvre présente également des propriétés régulatrices de l'humidité, des propriétés antifongiques et une résistance aux rongeurs [16].
- **La laine de lin :** La laine de lin est produite à partir de la fibre de lin oléagineux, qui est séparée des autres parties de la plante de lin. Elle est ensuite traitée chimiquement pour résister aux moisissures, aux insectes, au feu et aux rongeurs. Les fibres sont ensuite cardées et collées pour former des rouleaux ou des panneaux. La laine de lin est un régulateur hygrique efficace et a une conductivité thermique d'environ 0,037 W/(m.K), avec une densité de 20 à 25 kg/m<sup>3</sup> [16].
- **Les bottes de paille :** L'isolation en bottes de paille est une méthode de construction utilisée principalement dans les projets d'auto-construction de maisons à ossature bois. Les bottes de paille sont insérées directement dans la structure en bois, offrant une isolation efficace avec une conductivité thermique d'environ 0,065 W/(m.K) pour une densité d'environ 75 kg/m<sup>3</sup>. Cette méthode présente plusieurs avantages, tels que l'utilisation de matériaux renouvelables, une faible empreinte écologique et un coût compétitif [16].
- **La ouate de cellulose :** La ouate de cellulose est un matériau isolant obtenu à partir du recyclage de papier ou de tissus. Après le tri, le broyage et l'ajout d'additifs pour renforcer sa résistance, il est transformé en vrac ou en panneaux. La conductivité thermique de la ouate de cellulose varie généralement entre 0,038 et 0,055 W/(m.K) pour une densité apparente de 30 à 70 kg/m<sup>3</sup>[16].

#### I.4.1.2 Les isolants d'origine animale :

- **La laine de mouton :** la laine de mouton présente une bonne conductivité thermique d'environ 0,038 W/(m.K) pour une densité de 10 à 30 kg/m<sup>3</sup>. Elle a également une

capacité de régulation de l'humidité élevée, pouvant absorber jusqu'à un tiers de son poids sans se déformer [16].

- **Les plumes de canard :** Il s'agit d'un isolant récemment introduit sur le marché, principalement composé de plumes de canards (70 %), de laine de mouton (10 %) et de fibres textiles en polyester (20 %), qui garantissent la cohésion du matériau. Sa masse volumique moyenne est d'environ  $30 \text{ kg/m}^3$  et sa conductivité thermique moyenne est d'environ  $0,040 \text{ W/(m.K)}$  [16].

### I.5. Les bio-composites :

De nos jours, les matériaux composites à base de ressources renouvelables font l'objet d'une attention accrue en raison de leur importance économique, environnementale et thermique ainsi que de leurs applications diverses.

Un "bio-composite" est un matériau composite dans lequel au moins l'une des composantes, soit la matrice soit le renfort, est fabriquée à partir de ressources renouvelables, comme les fibres naturelles ou les bios polymères.

La recherche sur les bio-composites est principalement axée sur le développement de propriétés thermiques élevées. Toutefois, l'utilisation limitée des bio polymères en raison de leur stade de développement précoce, de la variabilité des propriétés des fibres et des défis associés au traitement des composites ont entravé leurs performances et limité leur capacité à rivaliser avec les matériaux composites synthétiques traditionnels.

Malgré ces défis, les bio-composites présentent des avantages évidents en termes de propriétés thermiques et acoustiques, ce qui a incité à de nouveaux efforts pour développer de nouveaux matériaux et améliorer les propriétés des bio-composites existants. Des progrès continus dans ce domaine peuvent conduire à une industrie de bio-composites performante, respectueuse de l'environnement et économiquement viable [17].

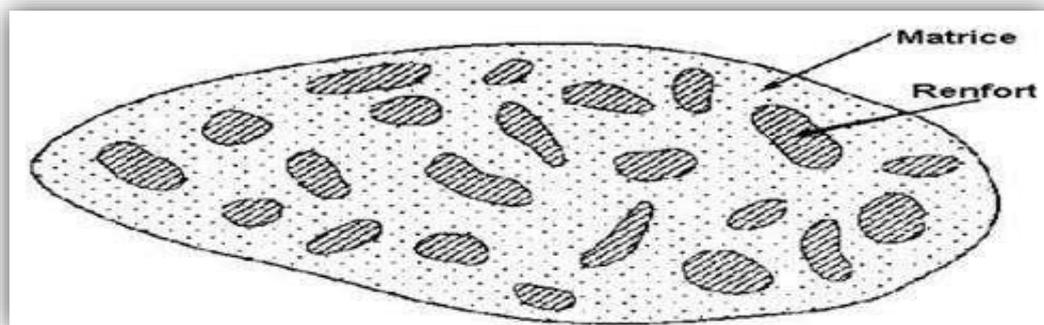


Figure I.2 : Schéma illustratif d'un matériau composite [18]

### I.5.1 Matrice :

La matrice joue un rôle crucial dans les matériaux composites en liant les fibres renforts ensemble, en répartissant les contraintes subies par le matériau, en fournissant une protection chimique à la structure et en aidant à donner la forme désirée au produit final [19].

Dans de nombreux cas, les matériaux composites sont composés d'une matrice en résine polymère. Il existe de nombreux types de résines polymères, chacun ayant des domaines d'utilisation spécifiques [20].

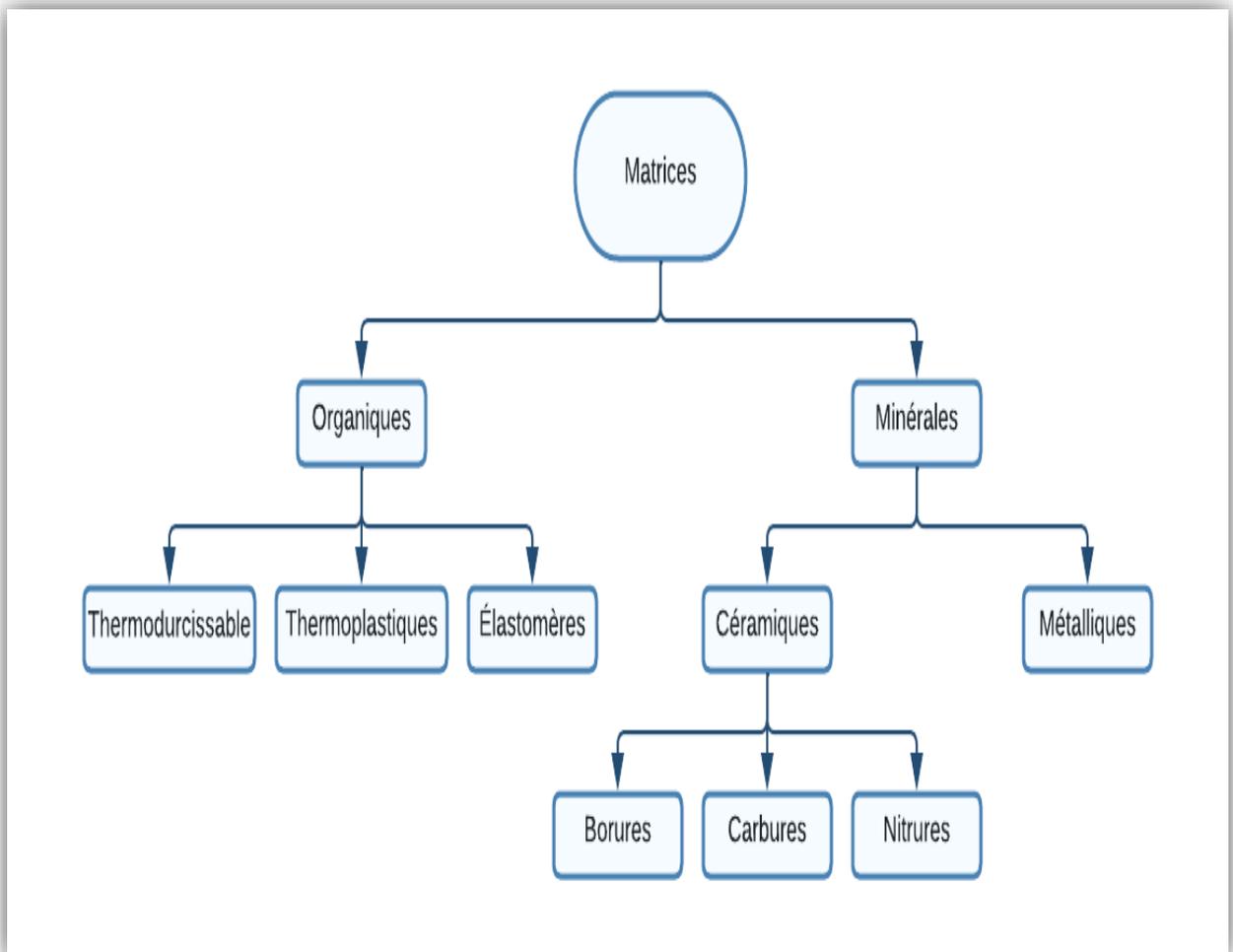


Figure I.3 : Les différentes familles de matrice [18].

### I.5.2 Renforts :

Les renforts sont essentiels pour les propriétés mécaniques des matériaux composites, et il existe de nombreux types de fibres disponibles sur le marché, chacune ayant un coût de revient différent pour la structure finale. Les renforts peuvent être constitués de différents matériaux sous forme de poudre, de fibres, de granules et même de fibres tissées longues [21].

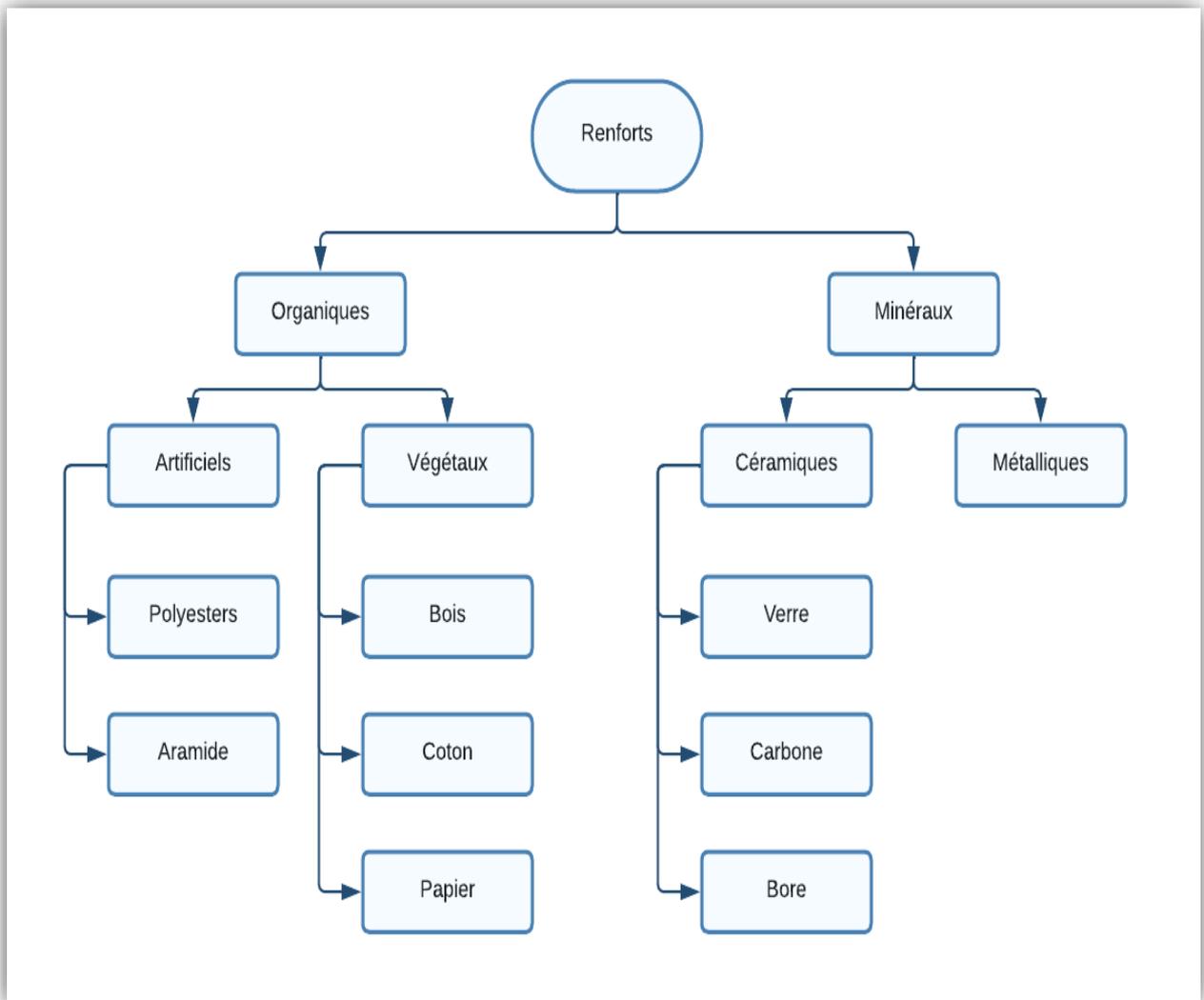


Figure I.4 : Les différentes familles de renforts [18].

## I.6. Les matériaux biosourcés dans l'habitat :

### I.6.1 Bois de palmier dattier :

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) est l'une des espèces de palmiers les plus cultivées par l'homme en raison de sa résistance à la chaleur, à la sécheresse et au froid. On le trouve généralement dans la bande aride afro-asiatique, qui s'étend de l'Afrique du Nord au Moyen-Orient, et plus précisément dans les oasis du Sahara [2,22]. D'après les données de 2015 fournies par le Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, les plantations de palmiers dattiers en Algérie couvrent une surface d'environ 167 000 hectares, avec un nombre estimé à plus de 18,6 millions d'unités [23]. En règle générale, les zones de culture de palmiers dattiers se trouvent au sud de l'Atlas saharien, couvrant 16 provinces en Algérie. Les provinces de Biskra et d'El Oued sont les deux premières régions phoenicoles, représentant respectivement 27,4 % et 22 % de la superficie totale, et respectivement 23,1 % et 22,4 % du nombre total de palmiers dattiers [23].

Le palmier dattier (Figure I.4) peut vivre jusqu'à 200 ans. Chaque année, dans des conditions de croissance normales, le palmier produit en moyenne 12 à 15 nouvelles feuilles (palmes) et il est possible de couper la même quantité dans le cadre de l'entretien du palmier [2,5]. Les opérations de nettoyage des palmiers dattiers consistent principalement à retirer les organes végétatifs qui ne sont plus fonctionnels, en particulier les palmes sèches. Le nombre de palmes peut varier de 50 à 200 chez un arbre adulte, avec une durée de vie de trois à sept ans, selon la variété et le mode de culture [23,24]. L'utilisation de fibres de bois de palmier dattier est un projet prometteur du point de vue économique et environnemental [2,5]. La définition de ce matériau naturel a fait l'objet de plusieurs recherches.



Figure I.5 : Palmeraie[23].

## **I.6.2 Propriétés de bois de palmier dattier :**

### **I.6.2.1 Propriétés thermophysiques :**

Agoudjil et al [5] ont examiné les caractéristiques thermophysiques du bois de palmier dattier à l'aide d'échantillons en forme de plaques carrées (Figure I.5).

D'après les résultats obtenus par les auteurs [22]:

- L'orientation des fibres a un effet négligeable sur la conductivité thermique et un faible effet sur la diffusivité thermique.

- La conductivité thermique moyenne des différents types de palmiers dattiers est de 0,083 W/(m.K), mesurée à la pression atmosphérique.
- La conductivité thermique du bois de palmier dattier est similaire à celle de nombreux matériaux isolants.
- La masse volumique de la grappe est inférieure à celle de la banane et du sisal.

D'après les résultats de l'analyse thermogravimétrique (qui mesure la perte de masse en fonction de la température) effectuée sur les fibres enveloppant la tige du palmier dattier, il a été constaté que la dégradation des fibres survient à environ 250°C [22]. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus avec d'autres types de fibres naturelles, tels que le sisal [25].

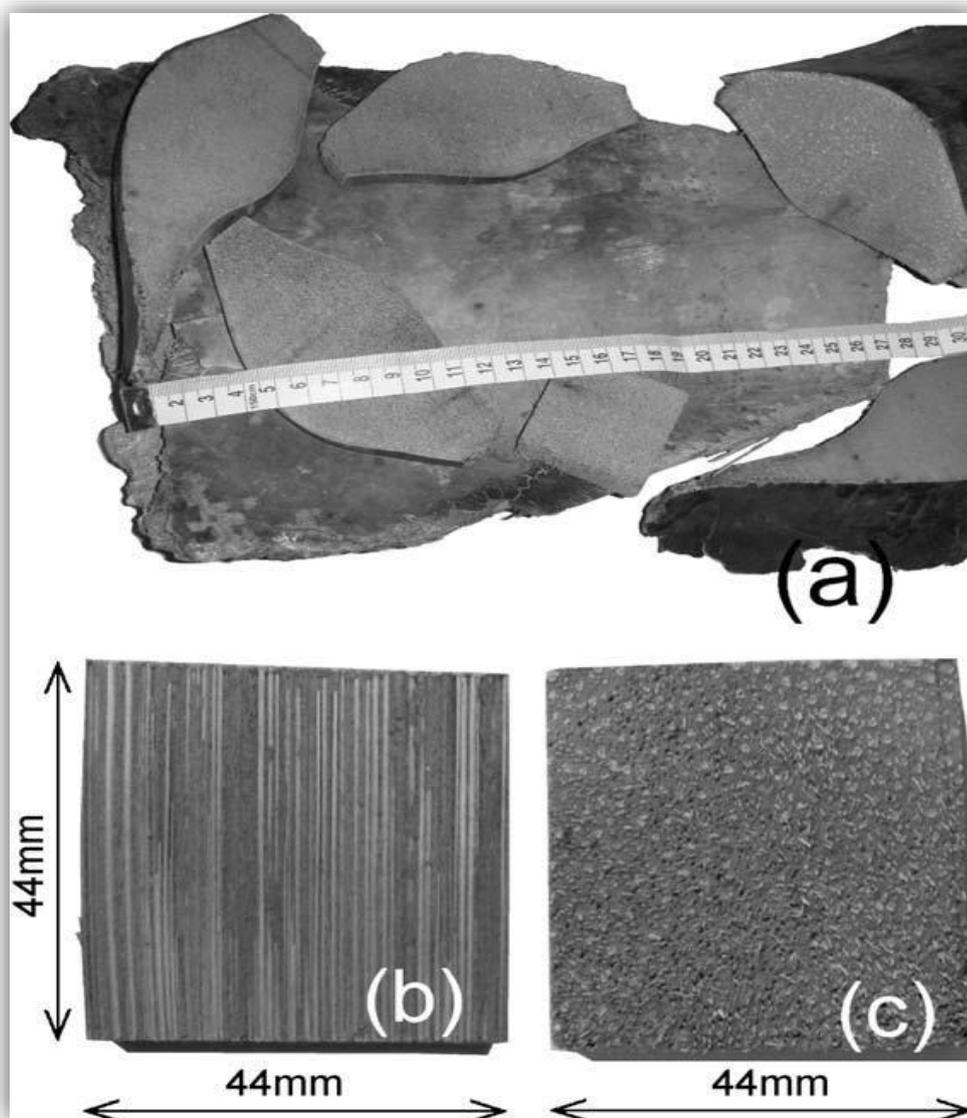


Figure I.6 : a. Base pétiolaire ; b et c. Echantillons avec différentes directions des fibres [5].

### I.6.2.2 Propriétés hydrophiliques :

Le Tableau I.1 présente les résultats de la comparaison de l'hydrophilie des fibres de palmier dattier par rapport à d'autres fibres naturelles. Les fibres naturelles ont une capacité d'absorption d'eau très élevée, pouvant absorber une masse d'eau supérieure à leur propre masse [26]. Cette forte capacité d'absorption d'eau est due à la présence d'un grand nombre de groupes hydroxyle (-OH) de cellulose dans les fibres naturelles, qui réagissent avec les molécules d'eau pour former des liaisons hydrogène [23,27].

Tableau I. 1: Absorption d'eau de certaines fibres naturelles [26, 28].

Fibre	Absorption à la saturation %
Palmier dattier	241
chanvre	158
sisal	190-250

Les fibres de palmier dattier ont une capacité d'absorption d'eau plus élevée que les fibres de chanvre, mais presque identique à celle du sisal, tel qu'indiqué dans le Tableau I.1. Cette variation de la capacité d'absorption d'eau des fibres naturelles peut être liée à la taille de leurs fibres.

## I.7. Composites à base de bois de palmier dattier :

### I.7.1 Composites à base de gypse :

Chikhi et al [29] ont créé des matériaux composites en utilisant des concentrations variées de fibres de bois de palmier dattier, dans le but de fabriquer un matériau composite nouveau avec des propriétés thermiques adaptées à l'isolation thermique des bâtiments, en utilisant des composants peu coûteux sur le plan économique.

#### I.7.1.1 Préparation des composites :

Des composites de gypse-fibres ont été créés en utilisant sept pourcentages différents de fibres de palmier dattier : 0%, 1%, 2%, 3%, 5%, 7%, 8%, et 10%. La méthode de préparation consistait en un mélange de poudre de gypse et d'eau, avec un ratio eau/gypse de 0,6, dans un mélangeur automatique à température ambiante et une humidité de l'air de 75% pendant 5 minutes. Ensuite, les fibres étaient ajoutées et mélangées pendant 5 minutes, avant que le mélange ne soit rapidement versé dans les moules.

#### I.7.1.2 Propriétés thermiques :

La charge de fibres de palmier dattier dans le gypse a un effet sur la conductivité thermique, qui diminue avec l'augmentation de cette charge (Figure I.6).

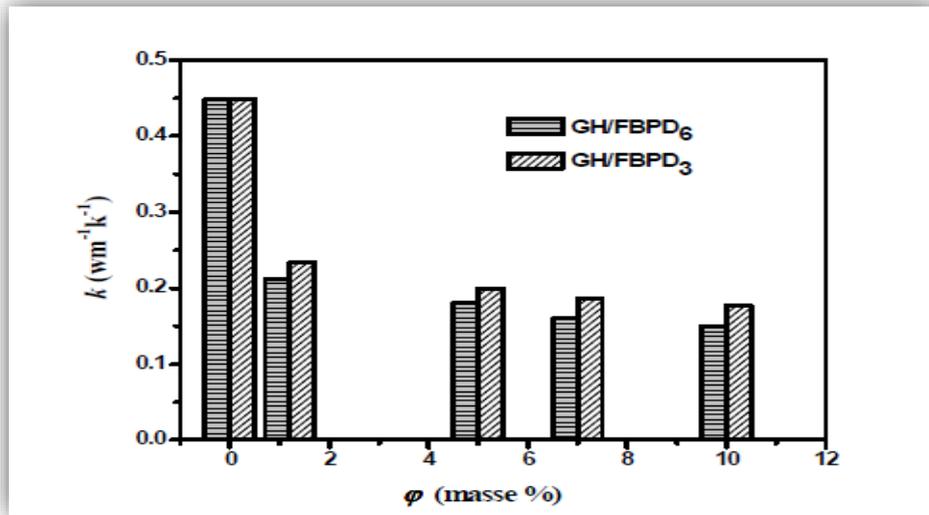


Figure I.6 : Conductivité thermique des composites gypse-fibres [30].

Les auteurs ont mis en évidence que l'ajout de 10% de fibres de palmier dattier entraîne une baisse de la conductivité thermique de 0,45 W/(m.K) à 0,15 W/(m.K), soit une réduction de 66%. De plus, la masse volumique des composites diminue à mesure que la concentration de fibres de palmier dattier augmente (Figure I.7). L'incorporation de 10% de fibres dans la matrice minérale entraîne une diminution d'environ 25% de la masse volumique du gypse.

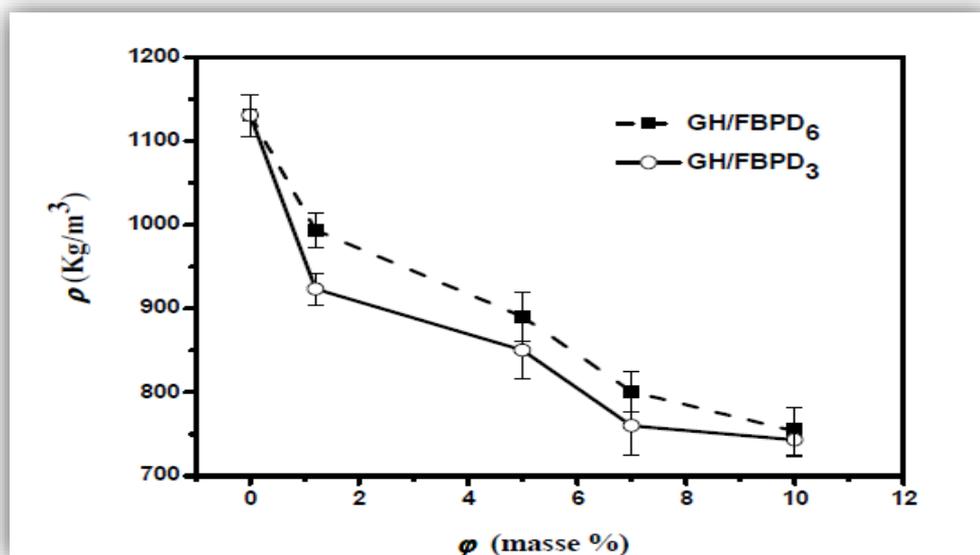


Figure I.7: Masse volumique sèche des composites à base de gypse [30].

### I.7.2 Composites à base cimentaire :

Benmansour et al [28] ont créé un matériau innovant, composé d'une matrice minérale à base de ciment et de fibres de palmier dattier. Leur étude avait pour but de déterminer si ce composite pouvait être utilisé comme matériau de construction pour l'isolation thermique.

### I.7.2.1 Préparation des composites :

Le processus de préparation des composites consiste à mélanger des fibres de palmier dattier, du ciment et du sable dans un mélangeur pendant trois minutes, puis à ajouter de l'eau progressivement jusqu'à obtenir un mélange homogène. Ensuite, les mélanges sont rapidement coulés dans les moules. Après démoulage, les échantillons peuvent être observés sur la Figure I.8.



Figure I.8 : Échantillons de composite fibres-matrice à base de ciment [2].

### I.7.2.2 Propriétés thermiques :

Selon les résultats présentés sur la Figure I.9, l'augmentation de la proportion de fibres de palmier dattier dans les composites est associée à une diminution de la conductivité thermique. Par ailleurs, pour des concentrations de fibres inférieures à 15%, les composites contenant des fibres fines ont une conductivité thermique plus faible que les composites contenant des fibres grossières. Cette constatation indique que la taille des fibres a un impact significatif sur la conductivité thermique des composites à faible pourcentage de fibres.

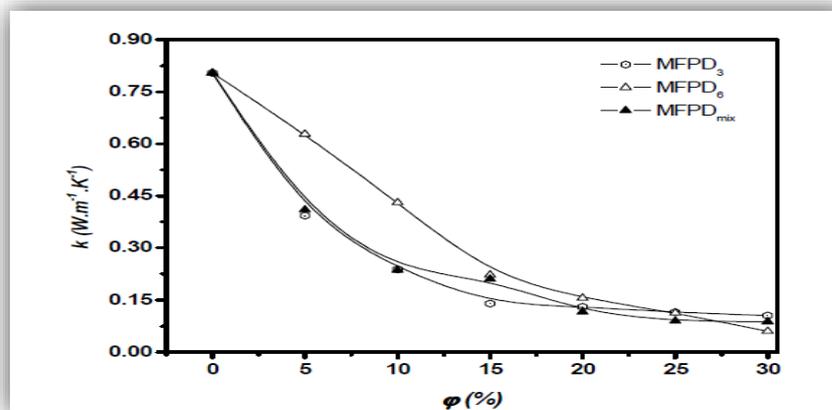


Figure I.9 : L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en fibres [2].

Selon les observations présentées sur la Figure I.10, il est constaté que la conductivité thermique des composites augmente en fonction de la masse volumique.

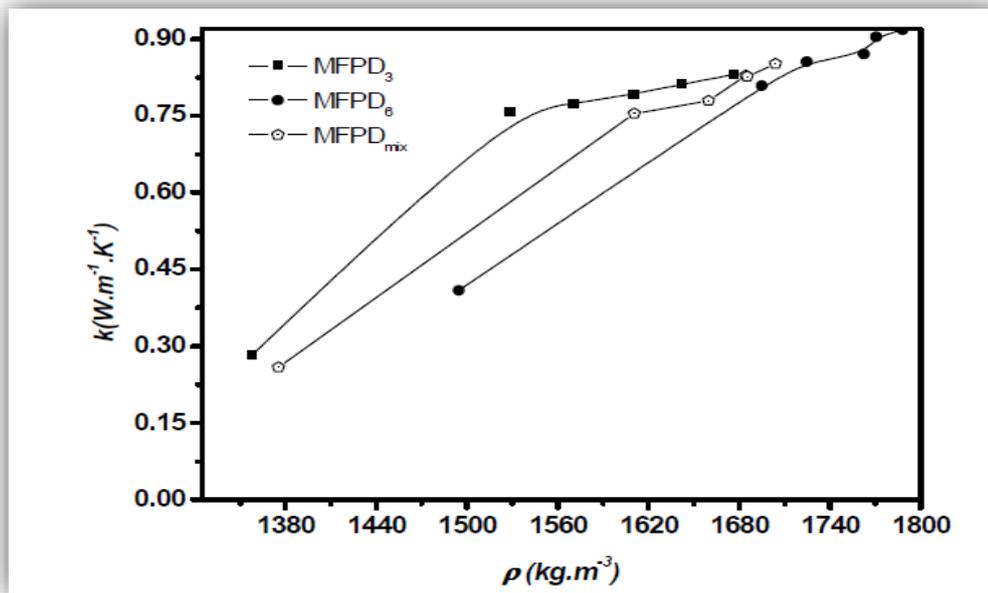


Figure I.10 : Conductivité thermique des composites en fonction de la masse volumique [2].

### I.7.3 Composites à base d'argile :

Les propriétés thermiques des composites ont fait l'objet d'une étude menée par Chaib et al [14]. Cette étude a consisté à développer des composites en incorporant des fibres de palmier dattier à de l'argile, puis à évaluer leur aptitude à être utilisés en tant que matériaux isolants. Les résultats de cette recherche sont donc destinés à fournir une base de données utile pour l'élaboration de solutions d'isolation thermique durables et respectueuses de l'environnement.

#### I.7.3.1 Préparation des composites :

Les briques sont préparées en suivant des étapes bien définies : tout d'abord, l'argile, le sable et les fibres sont pesés et l'argile est ensuite imbibée jusqu'à saturation pendant 24 heures avant l'ajout de l'eau de malaxage. Les ingrédients sont ensuite mélangés manuellement et versés dans les moules. Le séchage se fait naturellement à l'air libre pendant 24 heures, puis les briques sont cuites pendant 8 heures dans un four traditionnel à une température de 700°C.

#### I.7.3.2 Propriétés thermiques :

Selon les conclusions des auteurs, il est démontré que l'augmentation de la proportion de fibres et de sable dans le mélange entraîne une diminution de la conductivité thermique. De plus, une corrélation est observée entre la proportion croissante de fibres et de sable et la diminution de la

masse volumique du mélange. Par ailleurs, il est constaté que l'élévation de la proportion de fibres et de sable dans le mélange conduit à une réduction de la chaleur spécifique.

### **I.8. Revue de la littérature sur les avancées dans la création de composites à base de fibres végétales:**

- L'étude menée par Nicolas DUJARDIN [31] avait pour objectif de caractériser les propriétés thermophysiques de composites renforcés par des fibres de sisal, de banane et de feuilles d'ananas. Les résultats ont montré que l'ajout de fibres de banane dans une matrice de polypropylène a entraîné une diminution de la conductivité thermique et de l'effusivité thermique à mesure que la concentration de fibres augmentait. En revanche, l'utilisation de fibres de sisal en renfort d'une résine de polystyrène a entraîné une augmentation de la conductivité et de la diffusivité thermique avec l'augmentation du taux de fibre. L'auteur a également observé que les fibres de banane semblaient être plus isolantes que la matrice de polypropylène, avec une conductivité thermique de  $k < 0,24 \text{ W/(m.K)}$ , tandis que les fibres de sisal étaient plus conductrices que la résine de polystyrène, avec une conductivité thermique de  $k > 0,18 \text{ W/(m.K)}$ .
- Des études récentes ont largement porté sur le béton chanvre, qui est considéré comme un matériau biosourcé très important et prometteur pour l'efficacité énergétique des bâtiments. Parmi les travaux existants sur ce matériau, plusieurs études ont étudié la conductivité thermique du béton de chanvre à l'état sec et saturé, ainsi que son comportement hygrothermique. Par exemple, Lelièvre [32] a mené une étude expérimentale et numérique d'un mur en béton de chanvre recouvert de plusieurs couches d'enduit, tandis qu'Oumeziane [33] a mesuré la conductivité thermique du béton de chanvre à l'état sec et saturé dans une étude sur les transferts de chaleur et de masse à l'échelle d'une paroi en matériaux biosourcés. Les valeurs de conductivité thermique mesurées pour le béton de chanvre variaient selon les études, allant de  $0,0818 \text{ W/(m.K)}$  à  $0,117 \text{ W/(m.K)}$  à l'état sec, et de  $0,6 \text{ W/(m.K)}$  à l'état saturé.
- Dans ses recherches portant sur les propriétés mécaniques et thermiques d'un matériau à base de particules végétales, Cérézo [34] a également étudié le béton de chanvre. Les résultats obtenus sont les suivants : la conductivité thermique pour une masse volumique de  $155 \text{ Kg/m}^3$  est de  $0,058 \text{ W/(m.K)}$  pour le chanvre en vrac,  $0,102 \text{ W/(m.K)}$  pour une particule de chanvre seule avec une masse volumique de  $320 \text{ Kg/m}^3$ , et une plage de mesure de  $0,06$  à  $0,19 \text{ W/(m.K)}$  pour une masse volumique variant de  $200$  à  $840 \text{ Kg/m}^3$  pour le béton de chanvre.

- La recherche effectuée par MOUAICI MAJDA et MAKHLOUF HALIMA [35] visait à développer un matériau isolant d'origine biologique. L'étude a comparé les performances thermiques de différentes parois (intelligentes, intelligentes avec isolant à base de grignons d'olive, classiques et classiques avec isolant à base de grignons d'olive) dans un bureau. Les résultats de la simulation ont montré qu'en ajoutant un isolant à base de grignons d'olive, les variations de température dans les différentes zones du bureau étaient légèrement réduites par rapport aux parois intelligentes et classiques sans isolant. De plus, l'incorporation du matériau isolant étudié a permis de réduire la consommation d'énergie (chauffage et climatisation) tout en assurant un confort thermique pendant la période d'occupation du bureau.

### **I.9. Conclusion :**

Le choix des matériaux de construction est essentiel dans le cadre du développement durable de l'habitat. Cette étude bibliographique succincte présentée dans ce chapitre démontre que les constituants des composites utilisés dans cette recherche possèdent des propriétés appropriées pour leur utilisation en tant qu'isolant thermique.

## **Chapitre II :**

# **Méthodologie d'élaboration des matériaux**

## II.1. Introduction :

Ce chapitre présente la méthodologie d'élaboration de matériaux biocomposites isolants à partir de différentes parties du palmier-dattier et d'algues, en utilisant des concentrations variables de fibres. La caractérisation thermophysique de ces matériaux est réalisée au sein du laboratoire des matériaux de construction du Centre National de l'Étude et de la Recherche Intégrées du Bâtiment (CNERIB).

## II.2. Les matériaux utilisés :

### II.2.1 Les fibres de palmier dattier :

Depuis l'année 2018, les échantillons utilisés pour la réalisation des éprouvettes sont issus de différentes parties du palmier dattier, prélevées au sein d'une oasis située à In Salah. Cette sélection spécifique de l'année 2018 a été réalisée afin d'obtenir des échantillons représentatifs de la région et de garantir la cohérence des résultats obtenus. Les parties du palmier dattier utilisées comprennent les pétioles, les folioles, les agrafes, les roseaux secs et les noix. Ces échantillons ont été collectés en respectant les bonnes pratiques de prélèvement et de conservation, afin de préserver leur intégrité et de minimiser toute altération des propriétés intrinsèques des matériaux. L'utilisation de ces échantillons provenant d'une oasis à In Salah apporte une dimension locale et pertinente à cette étude, en tenant compte des spécificités de la région et en favorisant ainsi l'applicabilité des résultats dans des contextes similaires.

Le tableau suivant présente les différentes parties utilisées :

Tableau II. 1 : Photos réelles des différentes parties du palmier dattier utilisées.

Parties du palmier dattier	Images réelles
Pétiole	

**Foliole**



**Roseau sec**



**Agrafe**



**Noyaux**



### II.3. Matériels utilisés pour la préparation des éprouvettes :

- Un broyeur.
- Une balance électronique.
- Les coffrages en bois utilisés pour la préparation des éprouvettes respectent les dimensions exigées par l'instrument de mesure Ct-mètre, avec une longueur de 16 cm, une largeur de 8 cm et une hauteur de 4 cm.
- Deux tamis de différents diamètres : 0.01 cm et 0.5 cm.
- Papier de verre abrasif.
- Des seaux.



Figure II. 1: Le broyeur et la balance électronique .

### II.4. Méthodologie d'élaboration :

- La première étape consiste à broyer les différentes parties du palmier dattier afin d'obtenir une taille de particules appropriée.
- Ensuite, les échantillons sont passés à travers deux tamis de diamètres différents dans le but de les classer granulométriquement, permettant ainsi de séparer les particules en fonction de leur taille.
- Le taux de gâchage de l'eau est calculé en évaluant le rapport entre la quantité d'eau ajoutée et la quantité totale de matériau, afin de déterminer le dosage optimal.

- Les concentrations des fibres sont mesurées pour déterminer la quantité adéquate à utiliser dans le mélange, permettant ainsi d'obtenir les propriétés désirées.
- Pour assurer une répartition uniforme, les fibres sont ensuite mélangées avec la matrice (dans ce cas, le plâtre et l'eau) pendant une période de 2 minutes.
- Enfin, le mélange est rapidement versé dans un moule approprié pour lui donner la forme souhaitée, où il peut durcir et prendre sa structure finale.
- Après avoir démoulé les éprouvettes et les avoir laissées sécher à l'air libre pendant 5 jours, il est nécessaire de les lisser à l'aide d'un papier abrasif afin de les préparer en vue de la caractérisation thermophysique.

#### II.4.1 Le broyage mécanique et classification granulométrique :

Le tableau suivant présente les différents échantillons après le broyage et la classification granulométrique :

Tableau II. 2 Classification granulométrique des échantillons après broyage.

Echantillon	Particules fines	Particules grosses
Pétiole		
Foliolle		

**Roseau  
sec****Agrafe****Noyaux**

#### II.4.2 Choix du taux de gâchage :

Les travaux de thèse de Chikhi Mourad [30] ont mis en évidence l'importance du choix du taux de gâchage ( $e/p$  avec  $e$  : eau et  $p$  : poids de plâtre) lors de la préparation du plâtre. Les conditions suivantes, identifiées dans cette étude, doivent être prises en compte :

- Un rapport ( $e/p$ ) élevé entraîne généralement une diminution des résistances dans le plâtre durci, ce qui peut être souhaitable dans certains cas spécifiques.
- Le rapport ( $e/p$ ) a un impact sur l'ouvrabilité de la pâte de plâtre pendant sa prise. Un taux de gâchage élevé favorise une meilleure maniabilité et facilité de mise en forme.

- Pour garantir une répartition uniforme de la pâte dans les moules, il est nécessaire de veiller à ce qu'elle soit facile à travailler. Un taux de gâchage plus élevé favorise une meilleure répandabilité dans les moules.

Par le biais de multiples essais, il a été démontré que pour un rapport (e/p) de 0,5, la pâte obtenue était sèche et difficile à manipuler. En revanche, un rapport (e/p) de 0,6 a permis d'obtenir une pâte de meilleure qualité, plus facile à travailler et présentant une ouvrabilité améliorée.

Ces résultats, issus des recherches de Chikhi Mourad, fournissent des indications précieuses pour l'industrie en ce qui concerne le choix du taux de gâchage approprié. Dans le cadre de notre mémoire, nous avons décidé d'adopter le même taux de gâchage pour l'élaboration de nos éprouvettes, en nous basant sur les conclusions de cette étude.

#### II.4.3 Calcul des masses de fibres et de matrice dans les composites :

D'après la loi :

$$\varphi f (\%) = \frac{Mf}{Mf + Mm} \quad (\text{II.1}) [30]$$

On aboutira à :

$$Mf = Mm[\varphi f / (1 - \varphi f)] \quad (\text{II.2}) [30]$$

**Avec :**  $Mf$  et  $Mm$  sont respectivement les masses des fibres et de la matrice ;  $\varphi f$  est la fraction massique utilisée.

Pour un taux de gâchage de  $e/p = 0.6$ , les masses de fibres calculés sont regroupés dans le tableau II.3 :

Tableau II. 3 : Masses de fibres et de matrices correspondantes aux fractions massiques.

$\varphi f$ (% masse)	$Mf$ (g)	$Mm$ (g)
13	120	800
17	160	800

#### II.5. Confection des éprouvettes :

Les éprouvettes ont été confectionnées en utilisant diverses compositions de différentes parties du palmier dattier pour les groupes 1, 2 et 3, comprenant des particules de diamètres variés. La matrice utilisée pour les trois groupes était composée d'eau et de gypse.

Le tableau ci-après met en évidence l'aspect visuel des éprouvettes de chaque groupe après leur réalisation :

Tableau II. 4 : Apparence des éprouvettes par groupe après confection.

Groupe	Eprouvette
Groupe 01	
Groupe 02	
Groupe 03	

### II.5.1 Conditions de travail lors de la confection des éprouvettes :

Il est important de souligner que la préparation des échantillons s'est déroulée dans des conditions peu favorables. Tout d'abord, l'absence d'un malaxeur adéquat a entraîné un durcissement prématuré du plâtre en raison du malaxage manuel, malgré les efforts déployés pour accélérer le processus. De plus, le manque d'un tamisier approprié a rendu nécessaire la classification granulométrique manuelle en utilisant des tamis en bois. Ces contraintes techniques ont impacté la qualité et la précision de la préparation des échantillons.

### II.6. Caractérisation thermophysique :

Le test de conductivité thermique est effectué à l'aide d'un instrument appelé CT-mètre.

Le CT-mètre est un dispositif qui mesure la conductivité thermique d'un matériau en enregistrant les variations de température mesurées par un thermocouple situé à proximité d'un fil résistif.

La sonde, composée du fil résistif et du thermocouple intégrés dans un support isolant en kapton, est positionnée entre deux échantillons du matériau à caractériser. Le CT-mètre, utilise cette méthode en respectant les critères suivants :

- Plage de conductivité : de 0,02 à 5 (W/ m.K).
- Plage de température de mesure : de 20 à 80 °C.
- Dimensions des éprouvettes : au moins 80 × 40 mm, avec une épaisseur de quelques millimètres pour les isolants et de quelques centimètres pour les conducteurs.

Deux tests distincts ont été réalisés. Le premier essai portait sur la caractérisation des éprouvettes, tandis que le deuxième essai concernait les échantillons en poudre utilisés dans la confection des éprouvettes.



Figure II. 2 : Le CT-mètre utilisé pour les tests thermophysiques



Figure II. 3 : Mesure de la conductivité thermique des éprouvettes.



Figure II. 4 : Mesure de la conductivité thermique des échantillons en poudre.

## II.6.1 Résultats de la caractérisation thermophysique :

### II.6.1.1 Pour les éprouvettes :

- Température d'essai :  $T_0=24,33$  °C

Echantillon	Conductivité thermique $\lambda$ (W/m.k)	Chaleur spécifique (J/Kg.k)	Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )
<b>Groupe 01</b>	0.253	1020.2	1227.67
<b>Groupe 02</b>	0.149	800.6	931.49
<b>Groupe 03</b>	0.230	1008.4	1147.83

### II.6.1.2 Pour les échantillons en poudres :

- Température d'essai :  $T_0=21,00$  °C

Echantillon	Conductivité thermique $\lambda$ (W/m.k)	Chaleur spécifique (J/kg.k)
<b>Pétiole</b>	0.106	369.7
<b>Foliole</b>	0.336	1074.2
<b>Roseau sec</b>	0.365	968.2
<b>Agrafe</b>	0.183	795.9
<b>Noyaux</b>	0.195	853.8
<b>Plâtre</b>	0.234	1011.0

## II.6.2 Interprétation des résultats :

Les résultats des mesures de conductivité thermique pour les différents groupes de matériaux mettent en évidence des variations significatives en fonction de leur composition. Dans le groupe 01, constitué de 13% de fibres de palmier dattier et de 87% de matrice de plâtre, la conductivité thermique est de 0.253 W/m.k. En revanche, dans le groupe 02, qui contient également 17% de fibres de palmier dattier mais avec une plus grande proportion de fibres de

pétiole, la conductivité thermique est réduite à 0.149 W/m.k. La différence de conductivité thermique observée dans le groupe 03, par rapport au groupe 02 qui présente une composition similaire en termes de concentration de fibres de palmier dattier, peut être expliquée par la présence des folioles. Les folioles ayant une conductivité thermique élevée de 0.336 W/m.k, elles contribuent à une conductivité thermique plus élevée de 0.230 W/m.k dans le groupe 03.

En ce qui concerne la relation entre la conductivité thermique et la masse volumique, une tendance générale se dégage. Les matériaux plus légers, tels que ceux avec une masse volumique plus faible, ont tendance à présenter une conductivité thermique plus faible. Cela peut être observé dans le groupe 02, qui a la conductivité thermique la plus basse et la masse volumique la plus faible parmi les groupes mentionnés.

En résumé, les résultats montrent des différences significatives dans les propriétés thermiques des différents groupes de matériaux. La concentration des fibres de palmier dattier, la présence de fibres de pétiole et la composition des autres matériaux dans la matrice peuvent tous jouer un rôle dans les variations observées dans la conductivité thermique.

Lors de l'essai, plusieurs paramètres extérieurs indésirables et non traités ont influencé le comportement du matériau, ce qui explique les valeurs élevées de conductivité thermique observées. Ces paramètres comprennent :

- Absence de régulation de la température dans la salle de l'essai : Le fait de ne pas maintenir une température constante dans la salle où l'essai s'est déroulé a perturbé le comportement thermique du matériau. Les fluctuations de température peuvent entraîner des variations dans les valeurs de conductivité des échantillons identiques avec la même composition.
- Il est important de noter aussi que le séchage des éprouvettes n'était pas suffisant avant l'essai. La teneur en eau dans les matériaux peut avoir une influence significative sur la conductivité thermique. Une teneur en eau plus élevée peut entraîner une conductivité thermique plus élevée en raison de la conductivité thermique plus élevée de l'eau par rapport aux autres composants du matériau.

## **II.7. Conclusion :**

Il est clair que des améliorations sont nécessaires pour les résultats obtenus à partir des différentes expériences réalisées sur les éprouvettes. Il est primordial d'envisager des améliorations au niveau de la résistance à la compression et à la flexion, ainsi qu'en ce qui concerne la conductivité thermique, dans le but d'obtenir des résultats plus satisfaisants.

## **Chapitre III :**

# **Simulation thermique dynamique STD**

:

### III.1. Introduction :

Les régions arides de l'Algérie posent des défis spécifiques en termes de confort thermique, nécessitant des solutions adaptées pour assurer des conditions de vie agréables malgré les températures élevées.

Dans ce troisième chapitre, nous débuterons en exposant la région étudiée et notre cas d'étude particulier. Ensuite, nous entreprendrons une simulation thermique dynamique à l'aide du logiciel Pléiades version 5.23.4.4. L'objectif de cette simulation est d'évaluer l'intégration de nos nouveaux matériaux biocomposites dans notre étude de cas, en vue de déterminer leur impact sur l'amélioration du confort thermique.

### III.2. Présentation de la région étudiée :

#### III.2.1 Données géographiques :

**In Salah** est une ville du sud de l'Algérie située au cœur du Sahara, elle dépend administrativement de la wilaya d'In Salah créée en 2019. S'étend sur une superficie de 43938 km<sup>2</sup> 32518 habitants depuis le dernier recensement de la population.

La densité de population est de 0.7 habitants par km<sup>2</sup> sur la ville.

La ville est limitée par :

- La commune d'El-Menia au Nord.
- La commune d'In Ghar à l'Ouest.
- La commune de Foggara rezzou à l'Est.
- La commune d'In Ambule au Sud.

#### III.2.2 Données climatiques :

- Latitude : 27.23°N.
- Longitude : 2.50°E.
- Altitude : 268m.



Figure III. 1: In Salah en carte géographique [36]

### III.2.3 Classification de la ville d'in Salah :

Selon la classification thermique du DTR C3.2/4 :

Tableau III. 1: Classification thermique de la ville d'IN SALAH [37]

Classification thermique	Période d'hiver	Période d'été
In Salah	Zone D	Zone E

### III.2.4 Caractéristiques météorologiques de la ville d'In Salah :

Les caractéristiques météorologiques de la ville d'In Salah ont été obtenues en utilisant le logiciel Meteonorm version 8.02.

#### III.2.4.1 Rayonnement :

Nous observons que le mois de juillet présente le rayonnement global le plus élevé, tandis que le mois de juin présente un rayonnement diffus plus important.

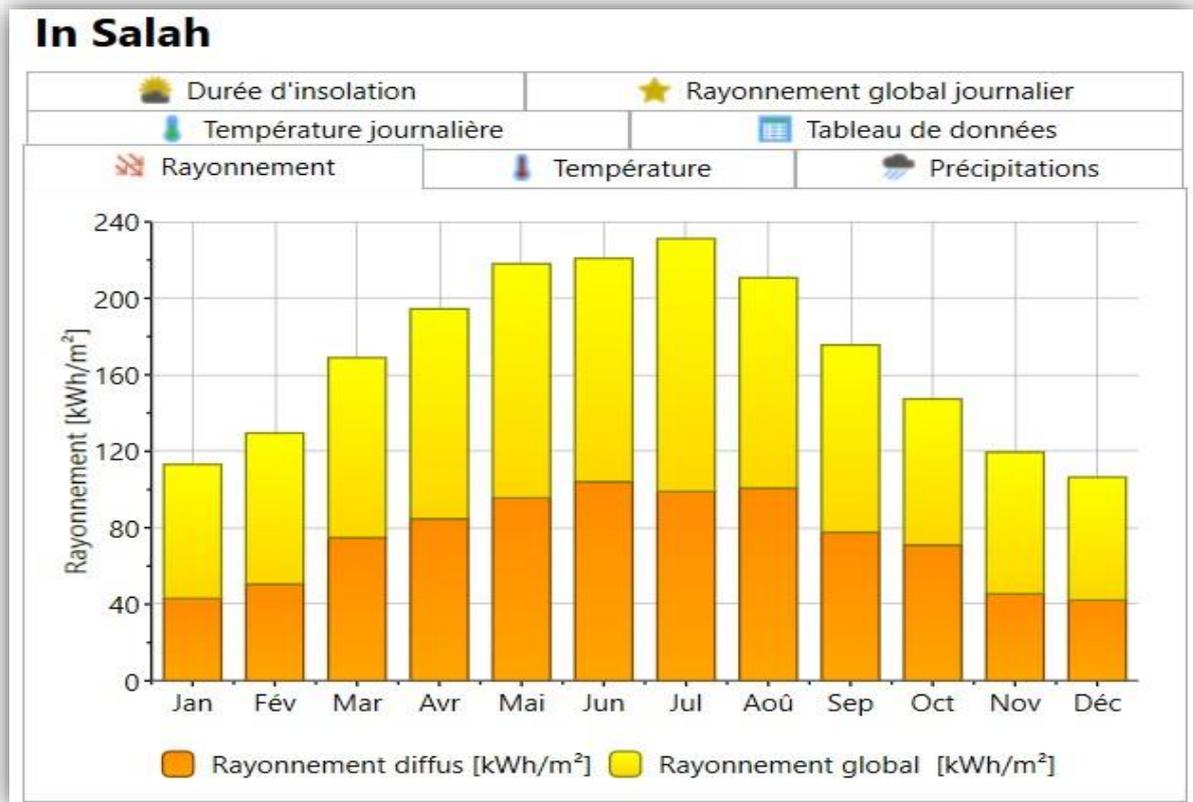


Figure III. 2 : Le rayonnement diffus et global de la ville d'In Salah [38]

### III.2.4.2 Rayonnement global journalier :

En analysant la figure ci-dessous, il est observé que le rayonnement global varie autour de 4.5 kWh/m<sup>2</sup> pendant la période hivernale, tandis qu'il peut atteindre jusqu'à 7.9 kWh/m<sup>2</sup> au cours de l'été.

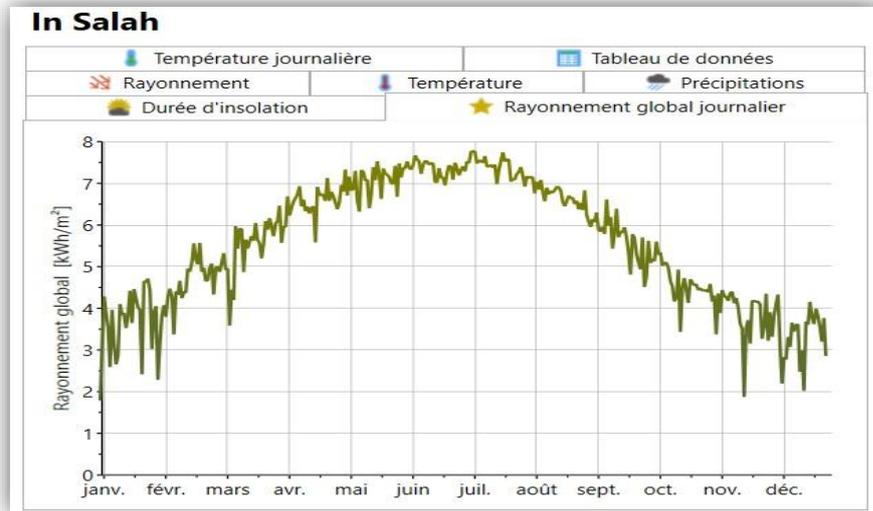


Figure III. 3 : Rayonnement global journalier de la ville d'In Salah [38]

### III.2.4.3 L'ensoleillement :

La région d'In Salah se distingue par une exposition solaire intense. Le pic d'insolation est enregistré au mois de juillet, tandis que les mois de janvier et de décembre connaissent les niveaux les plus bas d'insolation.

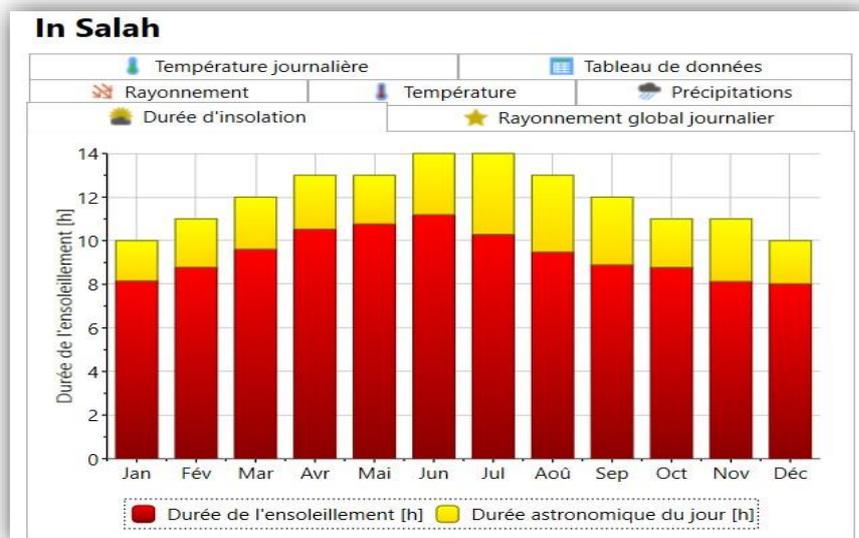


Figure III. 4 : Durée d'insolation de la ville d'In Salah [38]

### III.2.4.4 Température :

La chaleur est l'élément clé du climat et d'après la figure suivante, nous pouvons observer que la région d'In Salah se caractérise par des températures extrêmement élevées. Le mois le plus chaud est juillet.

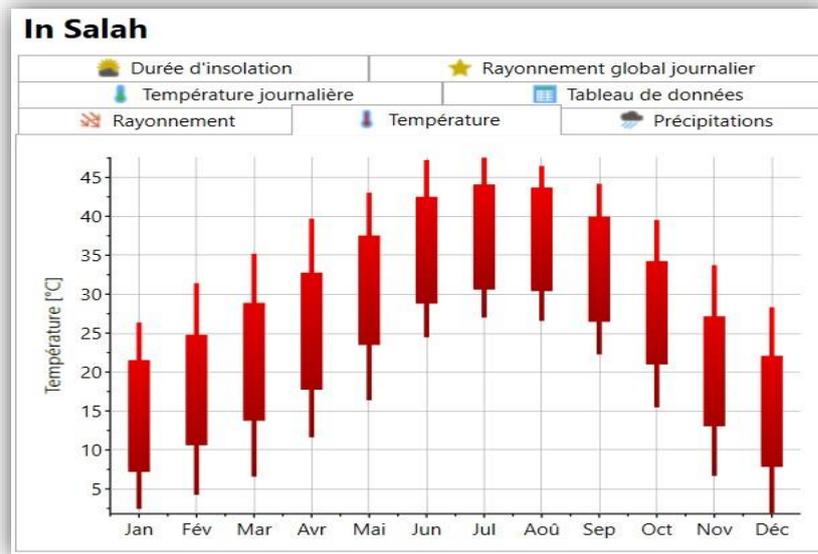


Figure III. 5 : Les températures de la ville d'In Salah [38].

### III.2.4.5 Température journalière :

La figure ci-dessous met en évidence un écart de température moyen de 10°C au cours d'une journée.

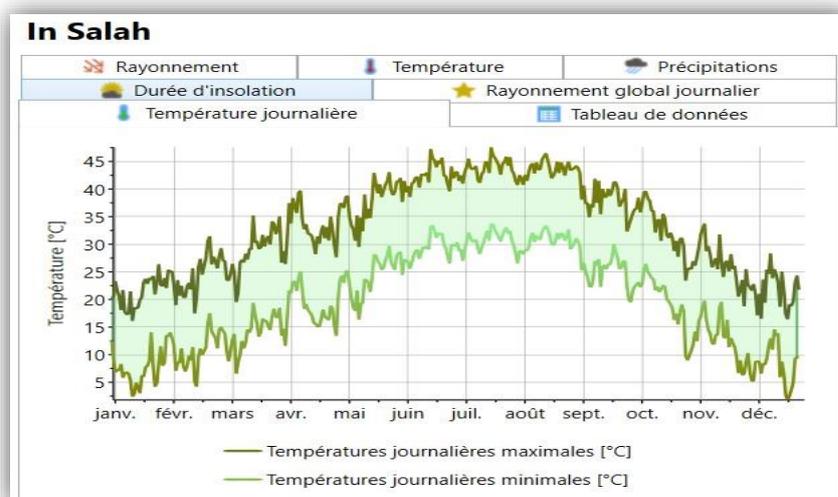


Figure III. 6 : Température journalière de la ville d'In Salah [38]

### III.3. Présentation du modèle de construction étudié :

Notre étude porte sur un cas particulier, qui représente une typologie moderne extravertie de logements contemporains adaptés dans la région d'In Saleh. Cette typologie moderne adaptée dans la région d'In Saleh est similaire à celle adaptée dans le Nord du pays.

Ce projet fait partie d'un programme de logement public locatif comprenant 100 logements sociaux. Il est situé à l'extrémité Sud de la région d'In Saleh. Le logement choisi est de Type F3, avec une surface habitable de 60 m<sup>2</sup> et un volume habitable de 180 m<sup>3</sup>. Il comprend un séjour, une chambre parentale et une chambre d'enfants. Les murs sont construits en parpaing, la toiture est en hourdis, et les portes sont en bois avec des fenêtres à simple vitrage [39].

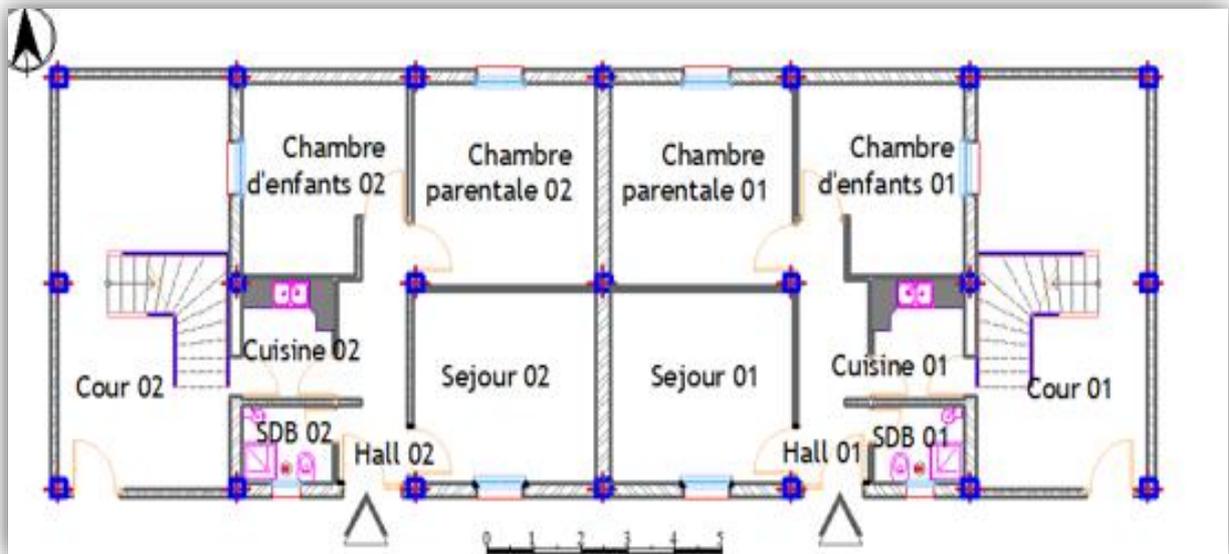


Figure III. 7 : Plan d'assemblage du cas d'étude [39].

Tableau III. 2: Représentations visuelles du cas d'étude [39].

<b>Les différentes vues</b>	<b>Représentation visuelle</b>
<b>Vue sur Façade Sud</b>	
<b>Vue sur la cour</b>	
<b>Vue sur différents espaces</b>	

Pour notre étude, nous avons pris en compte le cas initial de ce projet, malgré le fait que la plupart des maisons réalisées dans le cadre de celui-ci ont été modifiées par leurs propriétaires.

### III.3.1 Caractéristiques des éléments constructifs :

Tableau III. 3: Liste des matériaux utilisés sur les logements étudiés [39].

N°	Désignation	Extérieur À L'intérieur	Composition	Epaisseur (m)	Conductivité thermique (W/ m.K)
01	Mur extérieur	Elément 1	Enduit extérieur	0.02	1.15
		Elément 2	Parpaing	0.2	1.053
		Elément 3	Enduit plâtre	0.02	0.35
02	Mur intérieur	Elément 1	Enduit plâtre	0.02	0.35
		Elément 2	Parpaing	0.1	1.111
		Elément 3	Enduit plâtre	0.02	0.35
03	Plancher haut	Elément 1	Carrelage	0.02	1.7
		Elément 2	Mortier	0.05	1.15
		Elément 3	Béton lourd	0.04	1.75
		Elément 4	Hourdis de 16	0.16	1.231
		Elément 5	Enduit de plâtre	0.02	0.35
04	Plancher bas	Elément 1	Béton lourd	0.15	1.75
		Elément 2	Mortier	0.04	1.15
		Elément 3	Carrelage	0.02	1.7

## III.4. La simulation thermique dynamique (STD) :

### III.4.1 Interfaces des logiciels :

#### III.4.1.1 Pléiades :

Pléiades, développé par IZUBA énergies, est un logiciel complet d'écoconception de bâtiments. Il évalue la performance énergétique et environnementale avec des outils tels que la

simulation thermique, la vérification réglementaire, le dimensionnement des équipements et l'analyse du cycle de vie. Son interface conviviale facilite la saisie rapide grâce à un modèleur graphique et à l'importation de maquettes numériques. Pléiades intègre également des fonctionnalités innovantes basées sur les dernières avancées scientifiques [40].

#### III.4.1.2 Pléiades MODELEUR :

Pléiades Modeleur est l'outil graphique de saisie de Pléiades. Il permet de décrire un bâtiment ou un quartier à partir d'un plan, de paramétrer les caractéristiques et de lancer les calculs nécessaires. Cette fonctionnalité inclut des automatisations telles que les compositions et les ponts thermiques, vous faisant gagner du temps. La visualisation 3D vous aide à vérifier la cohérence des données saisies et à dimensionner les protections solaires [40].

#### III.4.1.3 Pléiades BIBLIOTHÈQUE :

La bibliothèque de Pléiades est une base de données regroupant les éléments clés du bâtiment : matériaux, menuiseries, ponts thermiques et équipements. Elle comprend également des informations sur l'utilisation du bâtiment (scénarios) et son environnement immédiat [40].

#### III.4.1.4 Pléiades RÉSULTATS :

La gestion et l'analyse des résultats de calcul sont simplifiées avec des tableaux, graphiques et rapports personnalisables. Ces outils présentent clairement les données, favorisant une meilleure compréhension et interprétation approfondie des résultats. [40].

#### III.4.1.5 METEONORM 8.02 :

Meteonorm 8.02 permet un accès mondial aux séries chronologiques d'irradiation solaire et de température. L'archive contient des valeurs horaires actualisées de 2010 à aujourd'hui et est régulièrement mise à jour. Les utilisateurs peuvent télécharger ces séries temporelles depuis le logiciel Meteonorm [40].

### III.4.2 Etapes de simulation :

Le schéma organisationnel ci-dessous illustre les différentes phases de la simulation thermique dynamique STD :

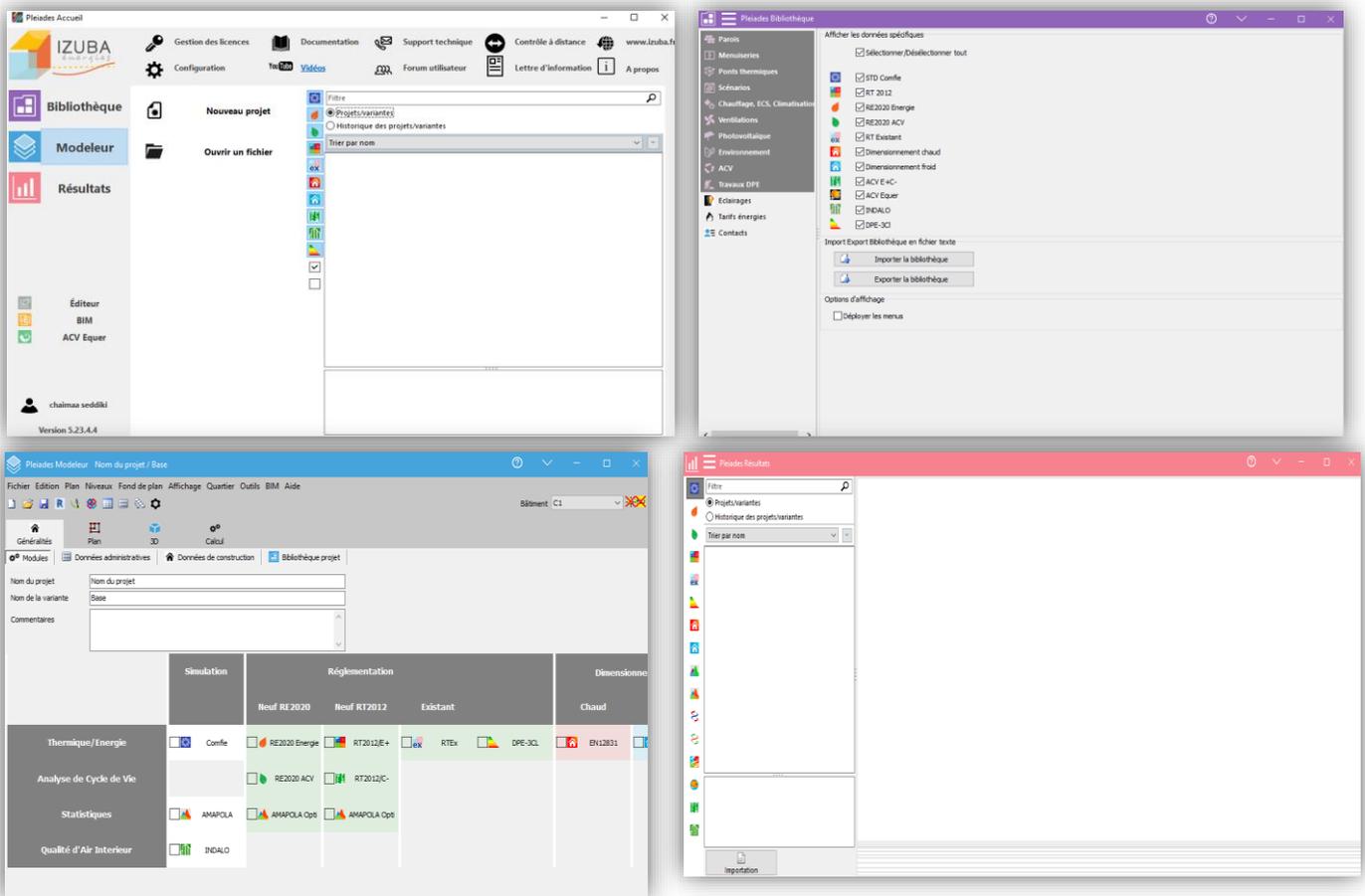


Figure III. 8 : Les différentes interfaces des outils de Pléiades version 5.23.4.4.

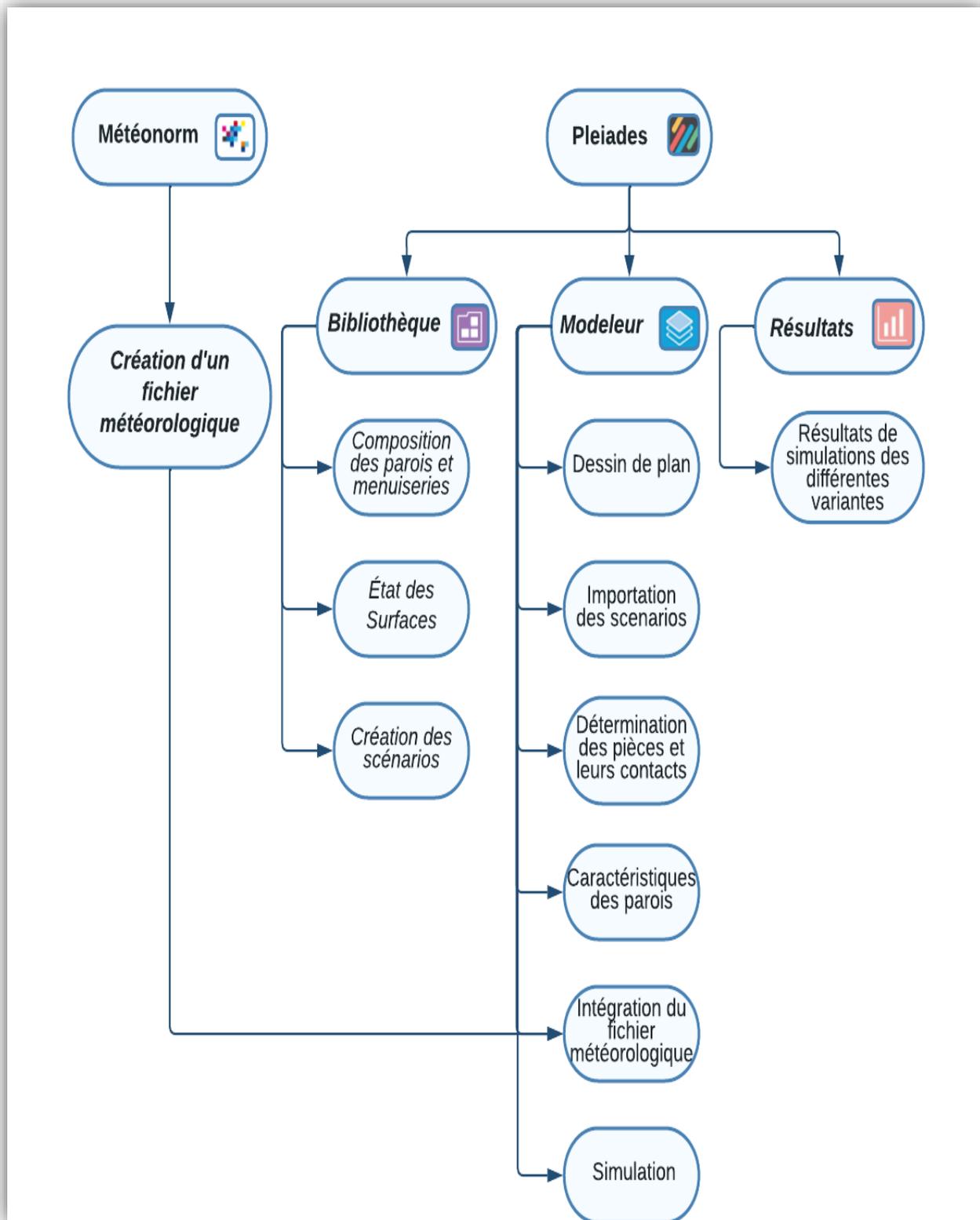


Figure III. 9: Procédure d’injection des données sur pléiade et simulation.

### III.4.2.1 Création d'un fichier météorologique :

Sous Meteonorm 8.02 :

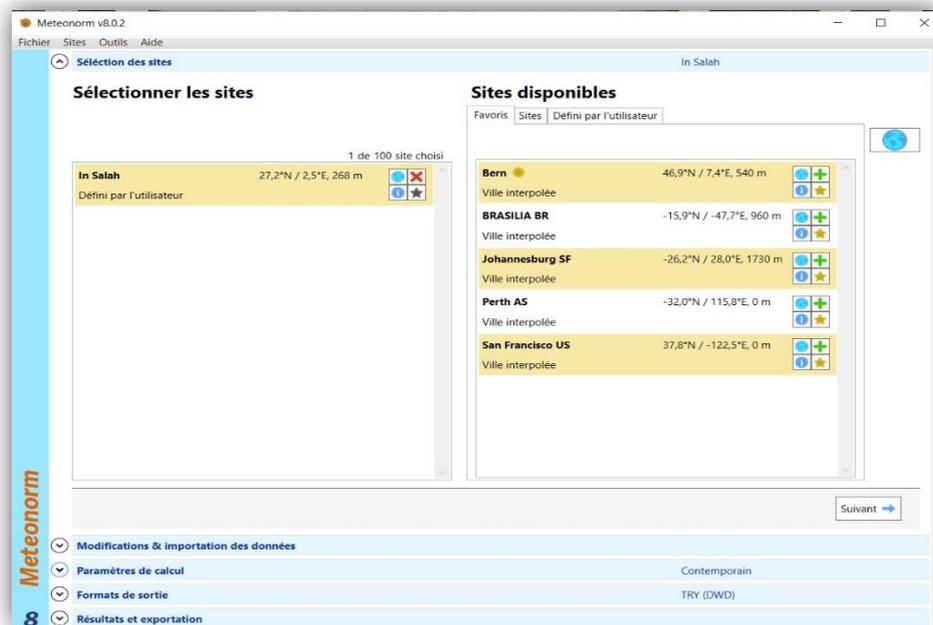


Figure III. 10 : Création du fichier météorologique.

### III.4.2.2 Création d'un matériau :

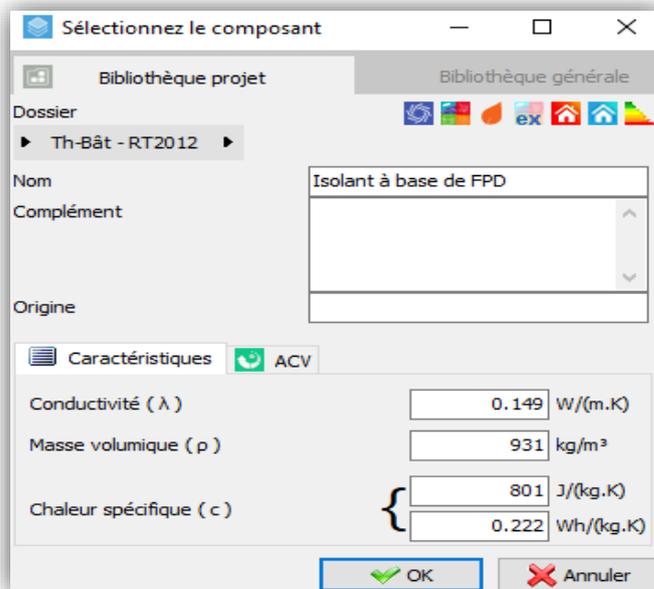


Figure III. 11 Les caractéristiques du matériau à base de fibres de palmier dattier.



Figure III. 12 : Éprouvette du groupe 02.

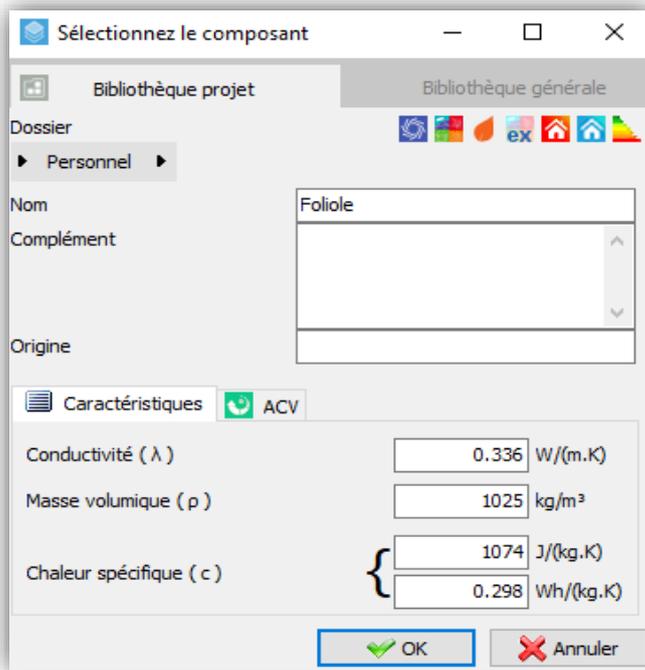


Figure III. 13 : Les caractéristiques des folioles de palmier dattier.



Figure III. 14 : les folioles de palmier dattier.

### III.4.2.3 Création des éléments constructifs :

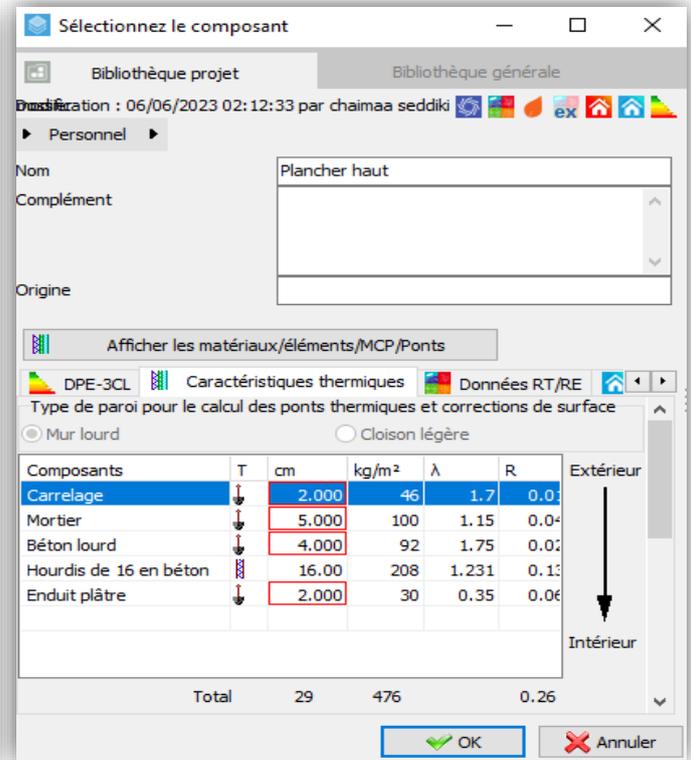
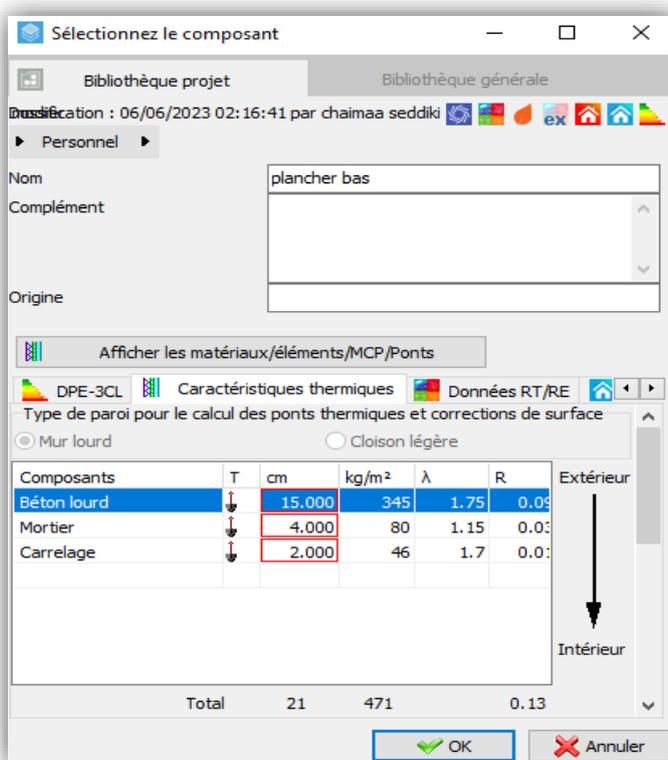


Figure III. 15 : La composition du Plancher-bas et Plancher-haut.

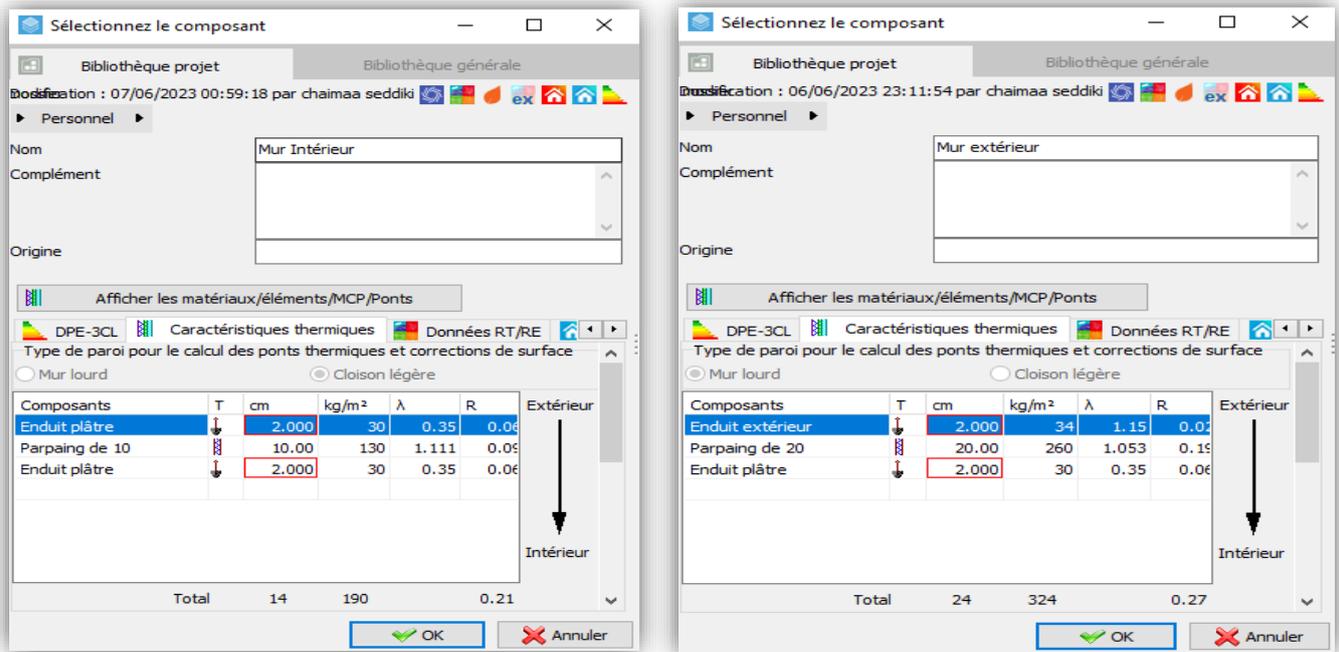


Figure III. 16 : La composition du mur intérieur et extérieur.

### III.4.2.4 Définition des paramètres constructifs dans le Modeleur :

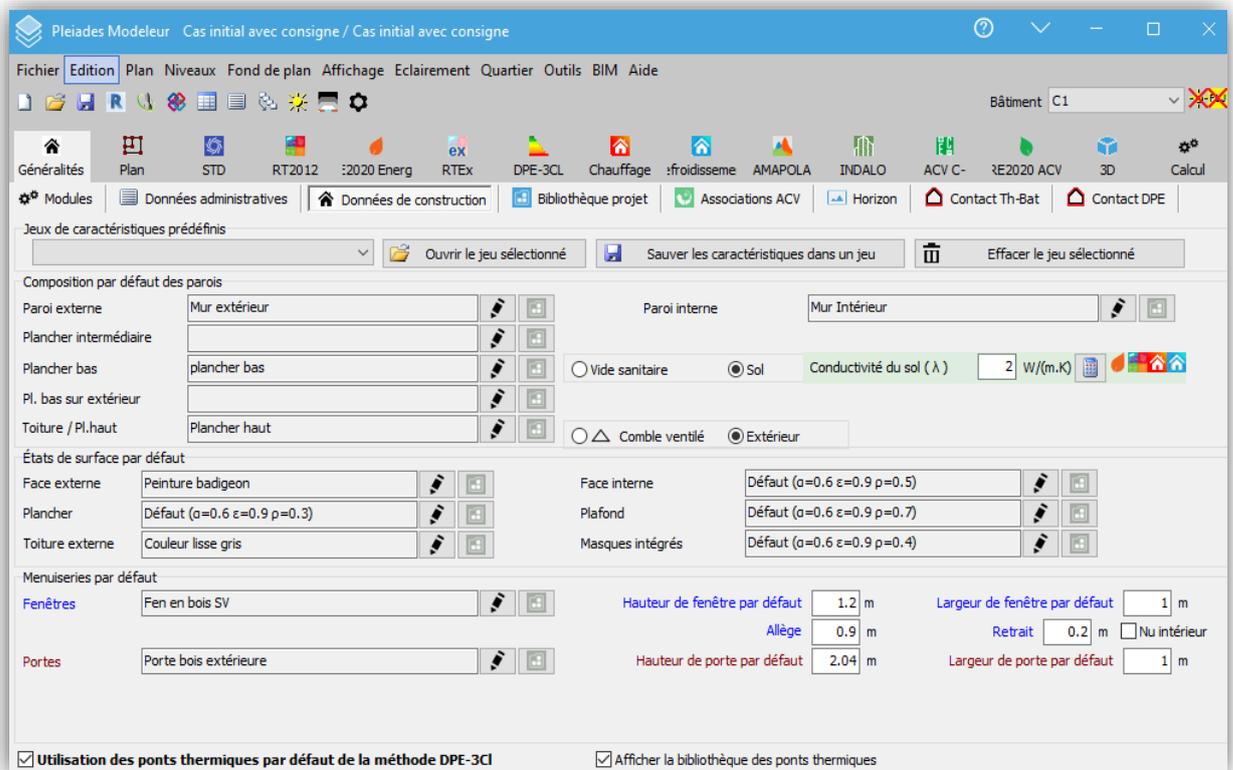


Figure III. 17 : Insertion des éléments constructifs dans le Modeleur.

### III.4.2.5 Dessin du plan :

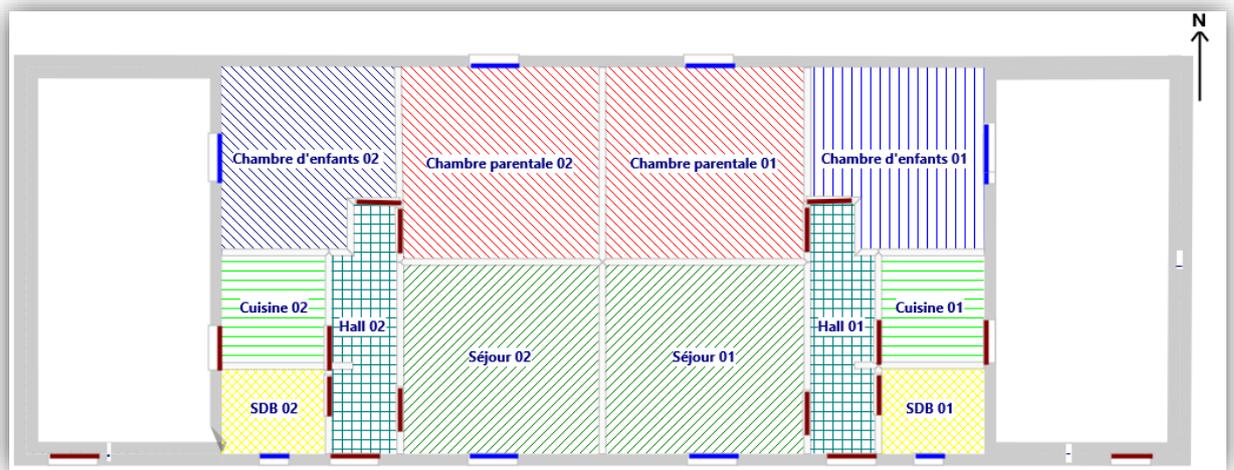


Figure III. 18 : Le plan de logement étudié réalisé avec pléiades Modeleur.

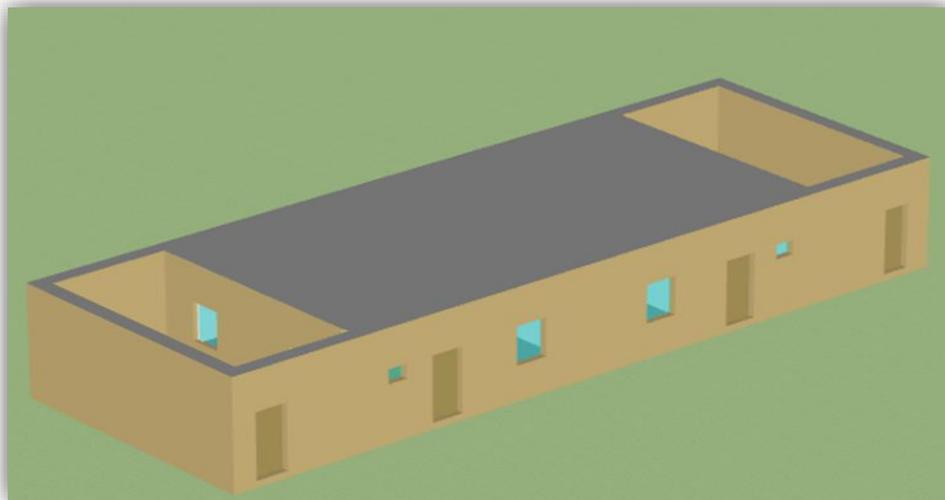


Figure III. 19 : Le plan du logement en 3D dans pléiades Modeleur

### III.4.2.6 Définition des scénarios dans le Modeleur Pléiades :

Dans le cadre de cette étude nous avons intégrés les scénarios de fonctionnement suivant : **scénario d'occupation, scénario de température, scénario de ventilation, scénario de puissance dissipée et le scénario d'occultation.**

**III.4.2.6.1 Scénarios d’occupation :**

La puissance dissipée et l’humidité dégagée par chaque occupant peuvent être spécifiées dans l’interface de lancement de la simulation. Par défaut, ces valeurs sont respectivement 80 W sensible et 0.055 kg eau/h.

**a) Scénario d’occupation proposé pour la chambre parentale :**

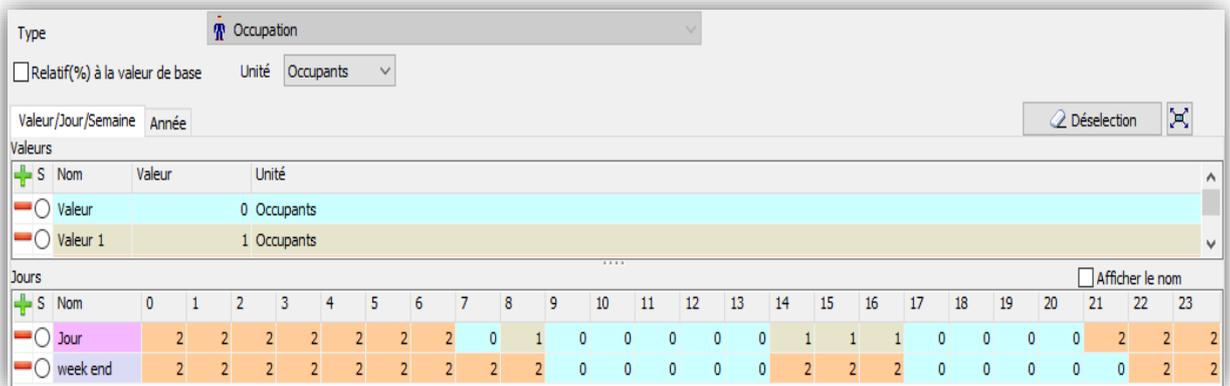


Figure III. 20 : Scénario d’occupation pour la chambre parentale.

**b) Scénario d’occupation proposé pour la chambre d’enfants :**

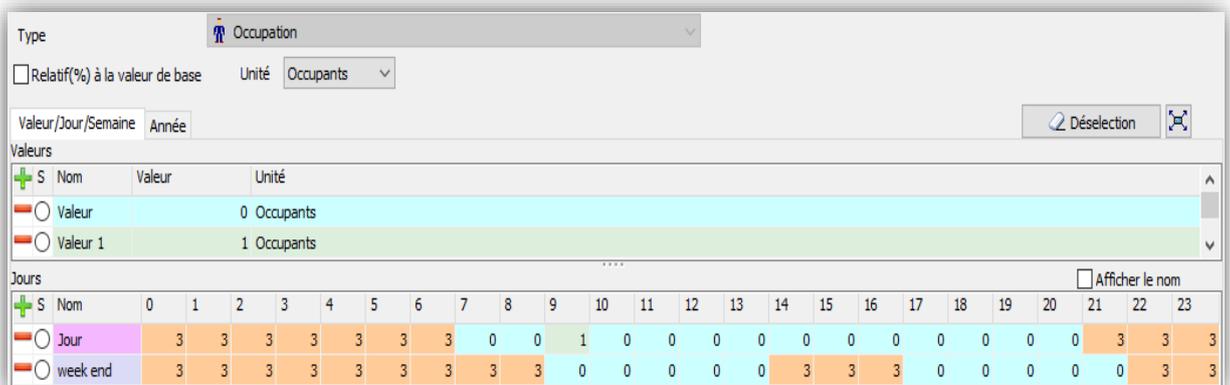


Figure III. 21 : Scénario d’occupation pour la chambre d’enfants.

c) **Scénario d'occupation proposé pour le séjour :**

Type		Occupation																											
<input type="checkbox"/> Relatif(%) à la valeur de base		Unité: Occupants																											
Valeur/Jour/Semaine		Année																											
Valeurs																													
+	S	Nom	Valeur																								Unité		
-		Valeur	0 Occupants																										
-		Valeur 1	1 Occupants																										
Jours																													
+	S	Nom	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Unité		
-		Jour	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	5	5	4	0	0	0	0	
-		week end	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	5	0	0	0	0	5	5	5	4	0	0	0	

Figure III. 22 : Scénario d'occupation pour le séjour .

d) **Scénario d'occupation proposé pour la cuisine :**

Type		Occupation																											
<input type="checkbox"/> Relatif(%) à la valeur de base		Unité: Occupants																											
Valeur/Jour/Semaine		Année																											
Valeurs																													
+	S	Nom	Valeur																								Unité		
-		Valeur	0 Occupants																										
-		Valeur 1	1 Occupants																										
Jours																													
+	S	Nom	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Unité		
-		Jour	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	1	1	5	0	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0	0	
-		week end	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1	1	5	0	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0	0	

Figure III. 23 : Scénario d'occupation pour la cuisine.

### III.4.2.6.2 Scénarios de puissance dissipée :

a) **Scénarios de puissance dissipée proposé pour la chambre parentale :**

- Une lampe (33 watts) .
- Une télévision (100 watts).
- Un Démodulateur (100 watts).

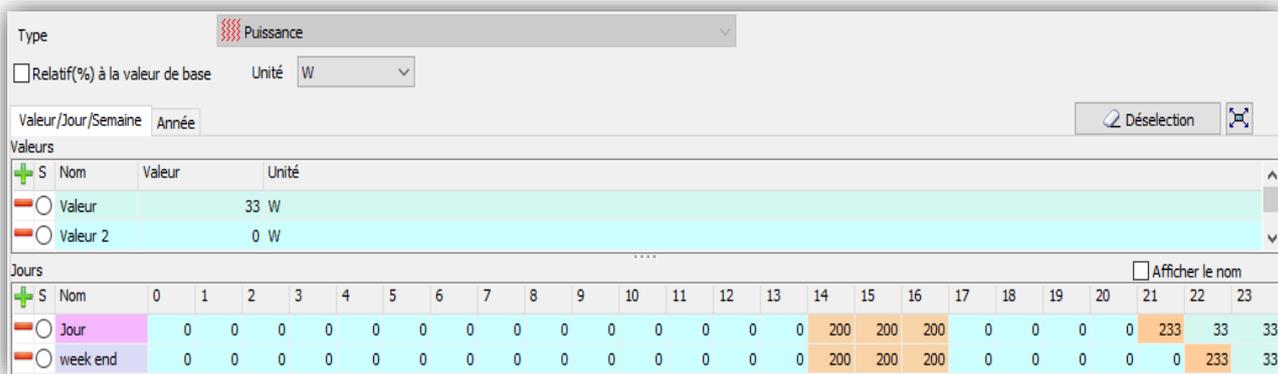


Figure III. 24 : Scénario de la puissance dissipée de la chambre parentale.

**b) Scénarios de puissance dissipée proposé pour la chambre d'enfants :**

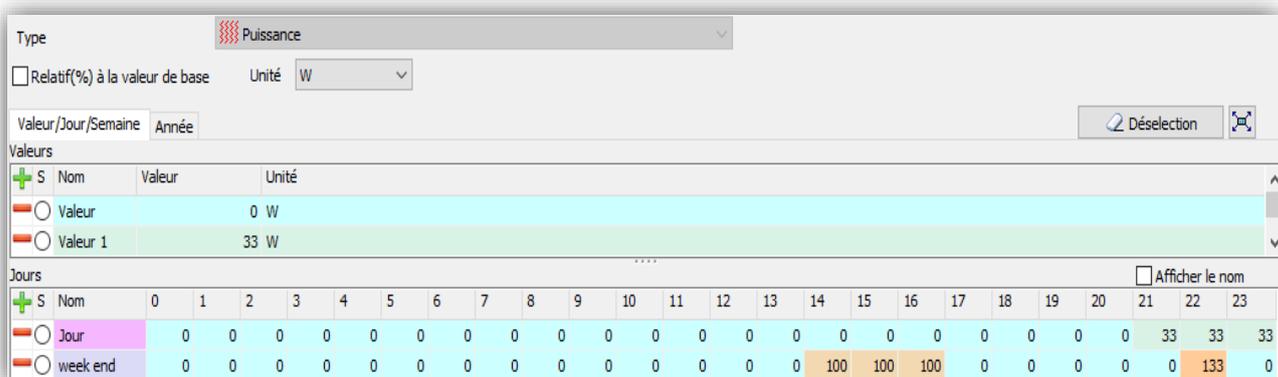


Figure III. 25 : Scénario de la puissance dissipée de la chambre d'enfants.

**c) Scénarios de puissance dissipée proposé pour le séjour :**

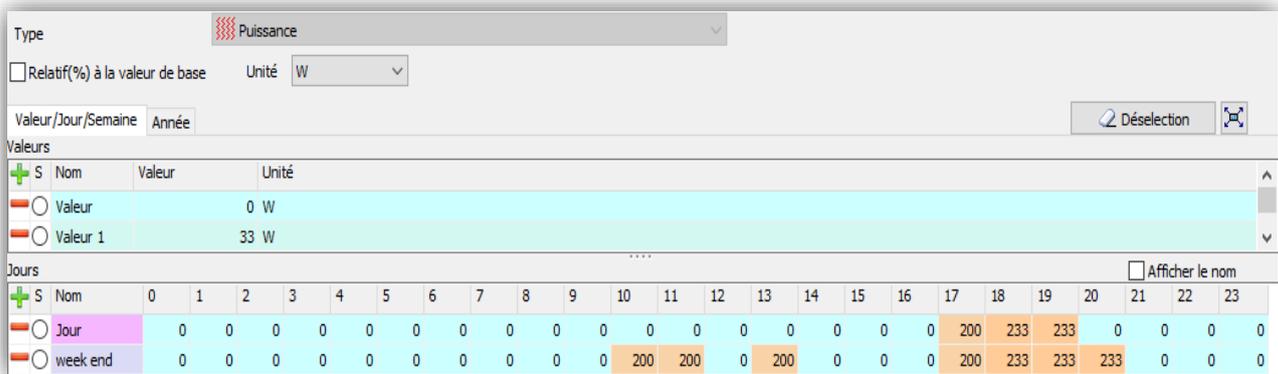


Figure III. 26 : Scénario de la puissance dissipée du séjour.

**d) Scénarios de puissance dissipée proposé pour la cuisine :**

- Une lampe (33 watts).
- Un réfrigérateur (70 watts).
- Four à gaz (300 watts)

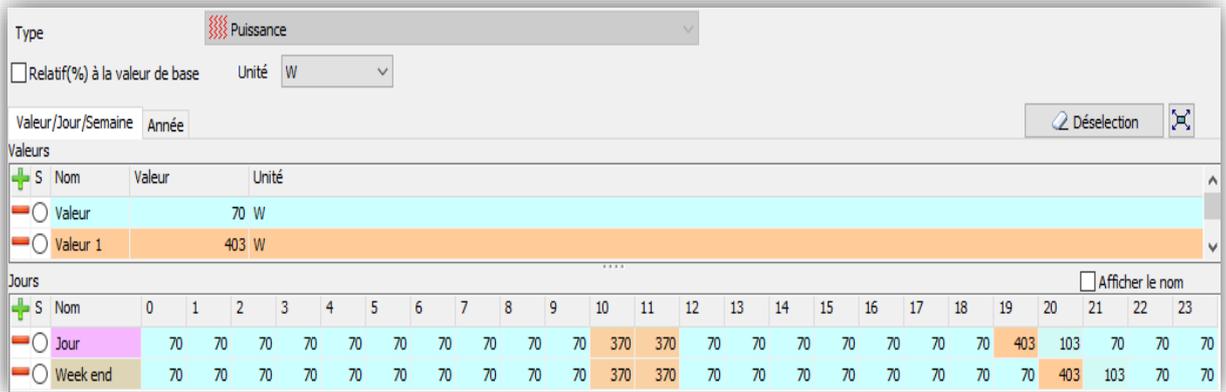


Figure III. 27 : Scénario de la puissance dissipée de la cuisine.

**III.4.2.6.3 Scénarios de ventilation :**

**a) Scénario de ventilation avec consigne de thermostat :**

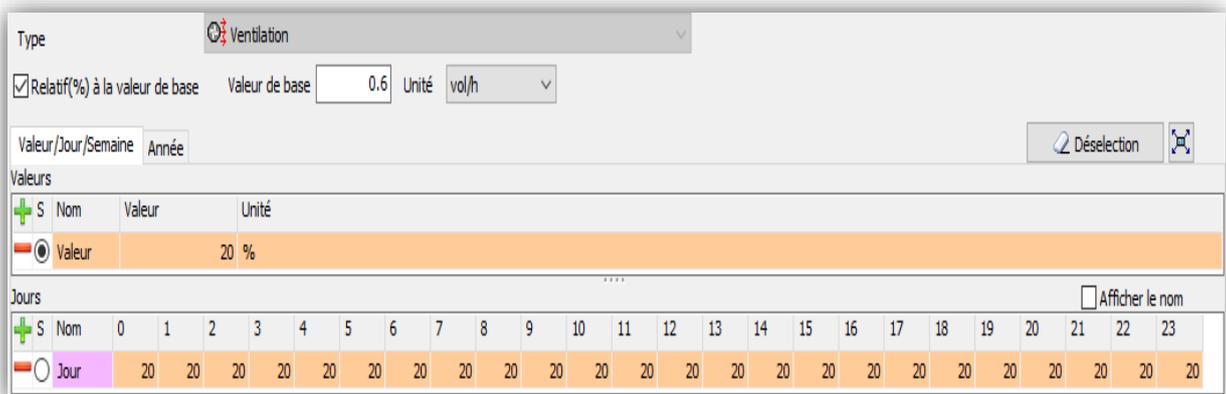


Figure III. 28 : Scénario d’infiltration pour la simulation avec consigne.

**b) Scénarios de ventilation proposé pour les chambres et le séjour :**

- Sans consigne de thermostat.

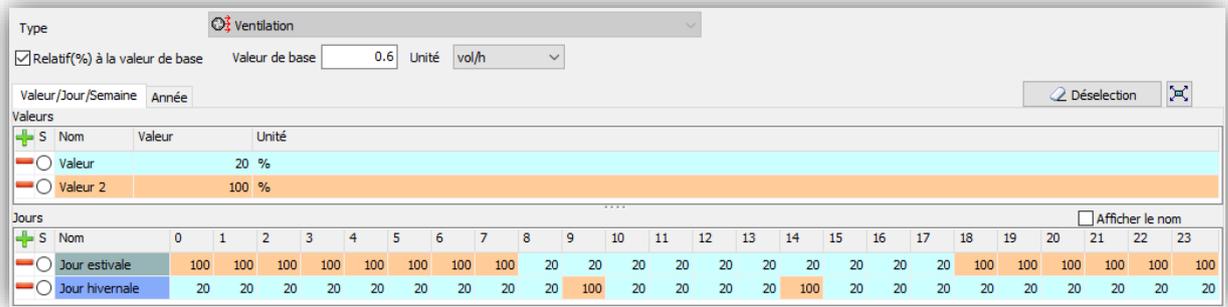


Figure III. 29 : Scénarios de ventilation pour la simulation sans consigne (les chambres + le séjour).

**c) Scénarios de ventilation proposé pour la cuisine :**

- Sans consigne de thermostat.

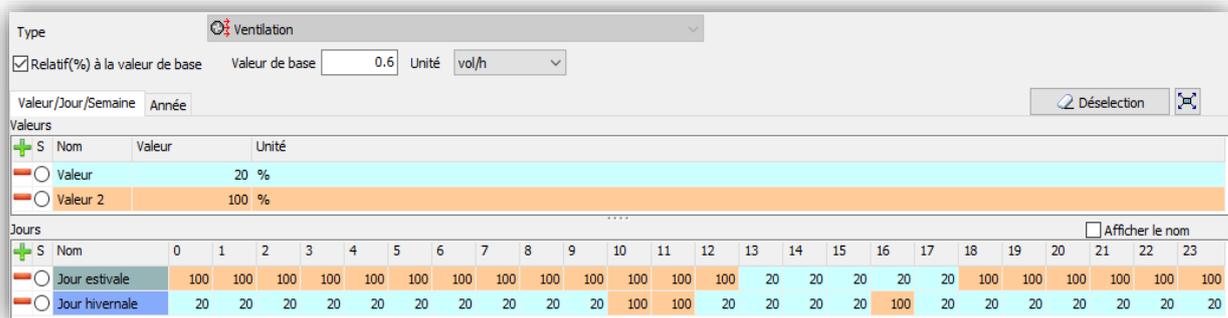


Figure III. 30 : Scénarios de ventilation pour la simulation sans consigne (la cuisine).

**III.4.2.6.4 Scénarios d’occultation :**

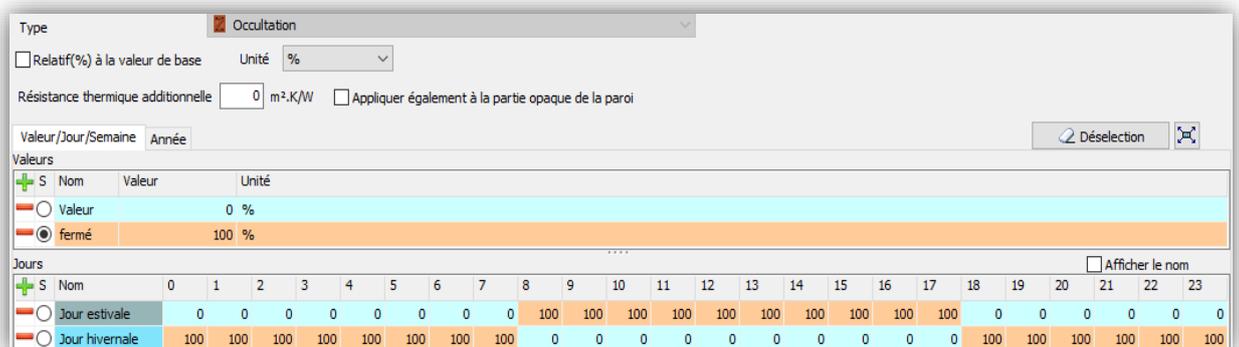


Figure III. 31: scénarios d'occultation hivernale et estivale .

### III.4.2.6.5 Scénarios de consigne de thermostat :

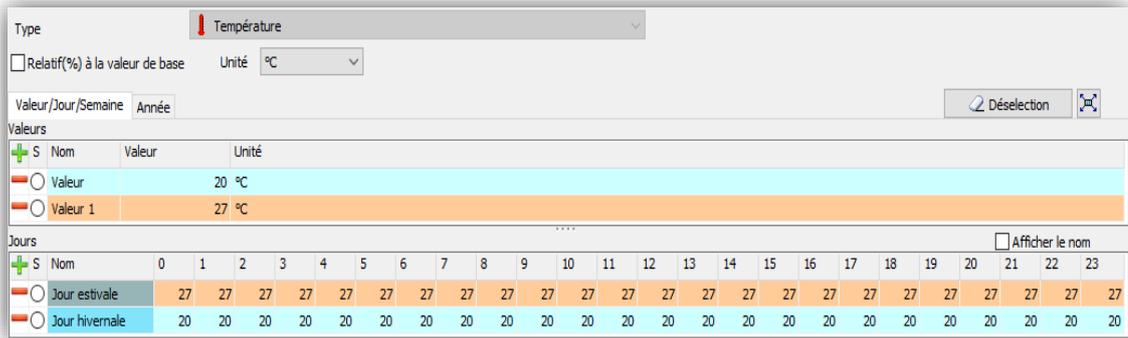


Figure III. 32: Scénarios de consigne de thermostat de climatisation et de chauffage.

### III.4.2.7 Méthodologie d'incorporation des nouveaux matériaux :

Le diagramme présenté ci-dessous illustre notre méthodologie d'approche pour l'intégration des nouveaux matériaux dans notre étude de cas :

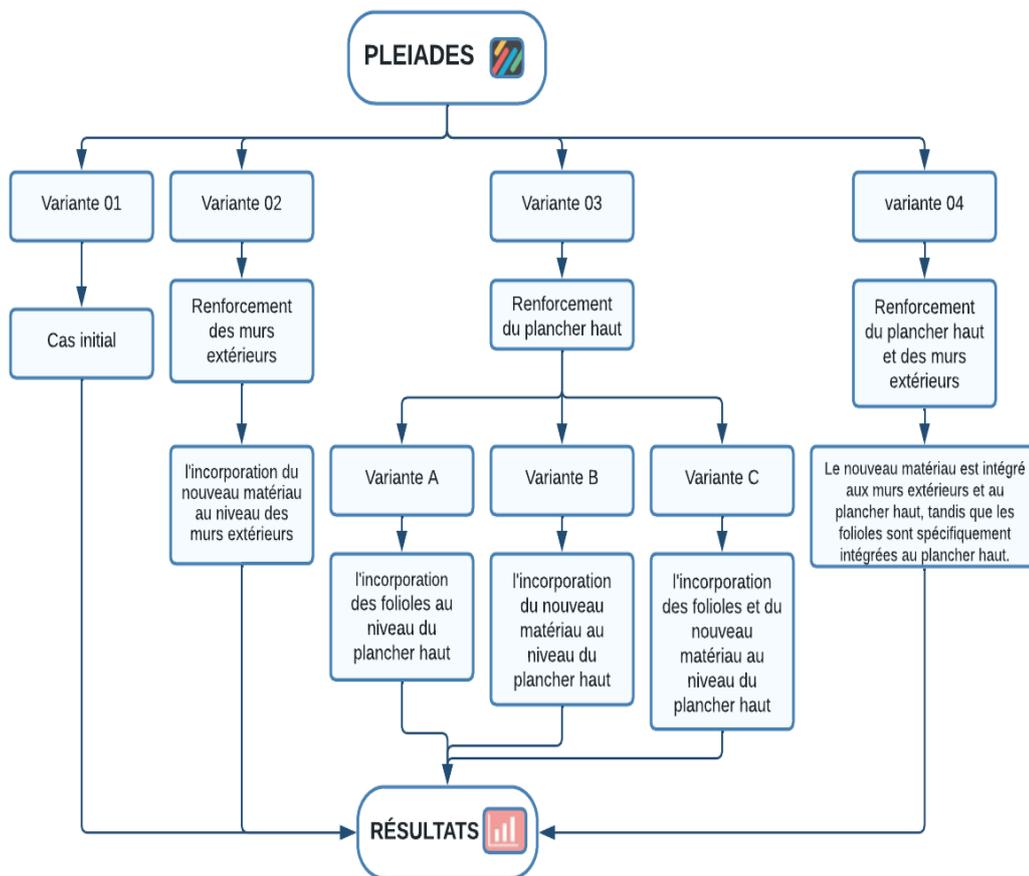


Figure III. 33: Schéma de la démarche méthodologique pour l'intégration des nouveaux matériaux.

### III.4.2.7.1 Création des différentes compositions :

a) **Variante 02** : renforcement des murs extérieurs (intégration du nouveau matériau)

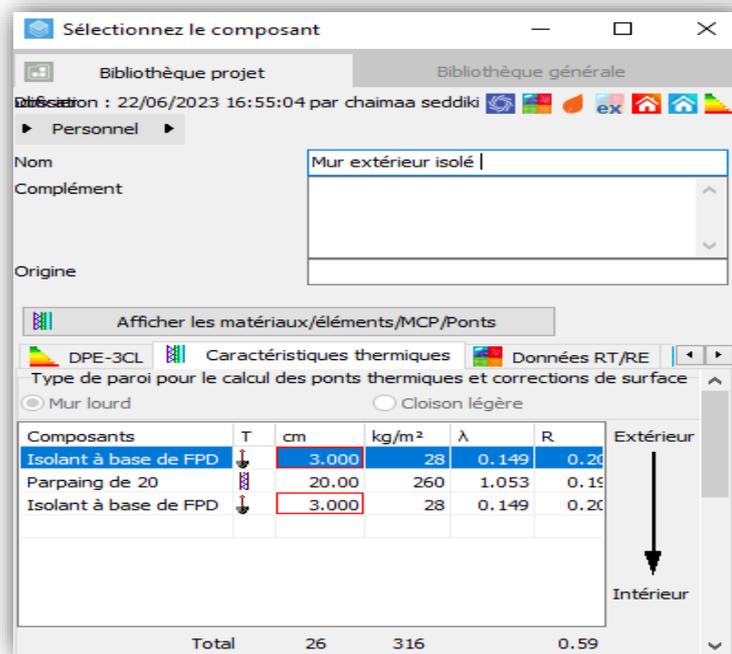


Figure III. 34: composition du mur extérieur de la variante 02.

b) **Variante 03** : renforcement du plancher haut

1. **Variante A** : intégration des folioles au niveau du plancher haut

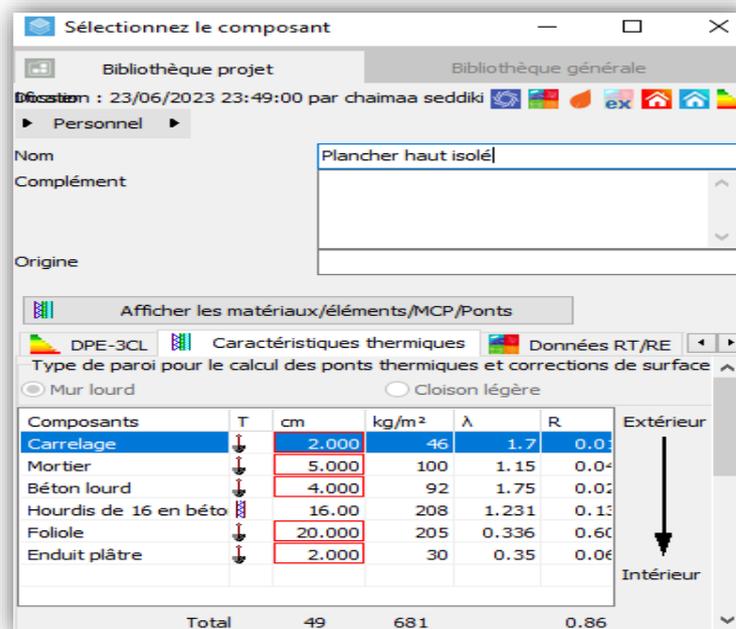


Figure III. 35 : composition du plancher haut de la variante A.

2. Variante B : intégration du nouveau matériau au niveau du plancher haut

Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R	
Carrelage	↓	2.000	46	1.7	0.00	Extérieur ↓ Intérieur
Mortier	↓	5.000	100	1.15	0.00	
Béton lourd	↓	4.000	92	1.75	0.00	
Hourdis de 16 en béton	↓	16.00	208	1.231	0.13	
Isolant à base de FPD	↓	3.000	28	0.149	0.20	
<b>Total</b>		<b>30</b>	<b>474</b>		<b>0.4</b>	

Figure III. 36: Composition du plancher haut de la variante B.

3. Variante C : intégration des folioles et du nouveau matériau au niveau du plancher haut

Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R	
Carrelage	↓	2.000	46	1.7	0.00	Extérieur ↓ Intérieur
Mortier	↓	5.000	100	1.15	0.00	
Béton lourd	↓	4.000	92	1.75	0.00	
Hourdis de 16 en béton	↓	16.00	208	1.231	0.13	
Foliole	↓	20.000	205	0.336	0.60	
Isolant à base de FPD	↓	3.000	28	0.149	0.20	
<b>Total</b>		<b>50</b>	<b>679</b>		<b>1</b>	

Figure III. 37: Composition du plancher haut de la variante C.

c) **Variante 04** : Renforcement du plancher haut et des murs extérieurs

- Au niveau du plancher haut : intégration des folioles et du nouveau matériau (**voir figure III.37**)
- Au niveau des murs extérieurs : intégration du nouveau matériau (**voir figure III.34**)

#### **III.4.2.8 Lancement des différentes simulations :**

Avant de procéder au lancement de chaque simulation, il est crucial de s'assurer d'intégrer les scénarios requis à celle-ci.

### **III.5. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons abordé la zone géographique sélectionnée pour notre étude ainsi que notre cas spécifique. Ensuite, nous avons décrit les différents logiciels utilisés pour mener à bien notre simulation thermique dynamique, en détaillant les étapes clés de cette simulation. Une fois les simulations lancées, nous avons obtenu des résultats qui seront présentés dans le chapitre suivant.

## **Chapitre IV :**

# **ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS**

### IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous exposerons les résultats obtenus à partir de diverses simulations, tout en fournissant leur interprétation.

### IV.2. Les simulations sans consigne de thermostat :

#### IV.2.1 Les simulations en période estivale :

##### IV.2.1.1 Variante 01 :

cas initial

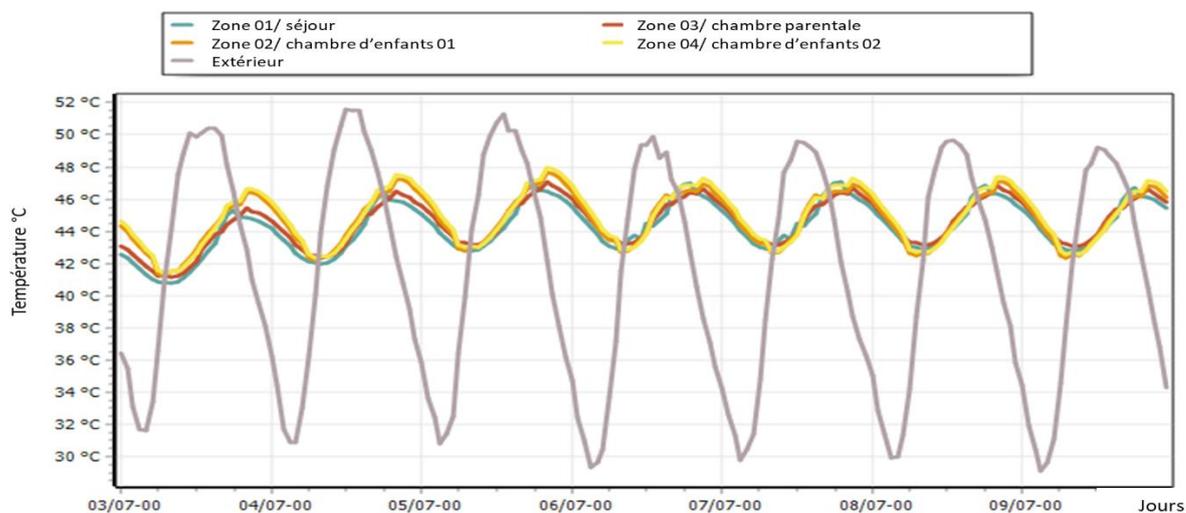


Figure IV. 1 : Évolution des températures pendant la semaine la plus chaude pour la variante 01.

##### IV.2.1.2 Variante 02 :

Renforcement des murs extérieurs (intégration du nouveau matériau)

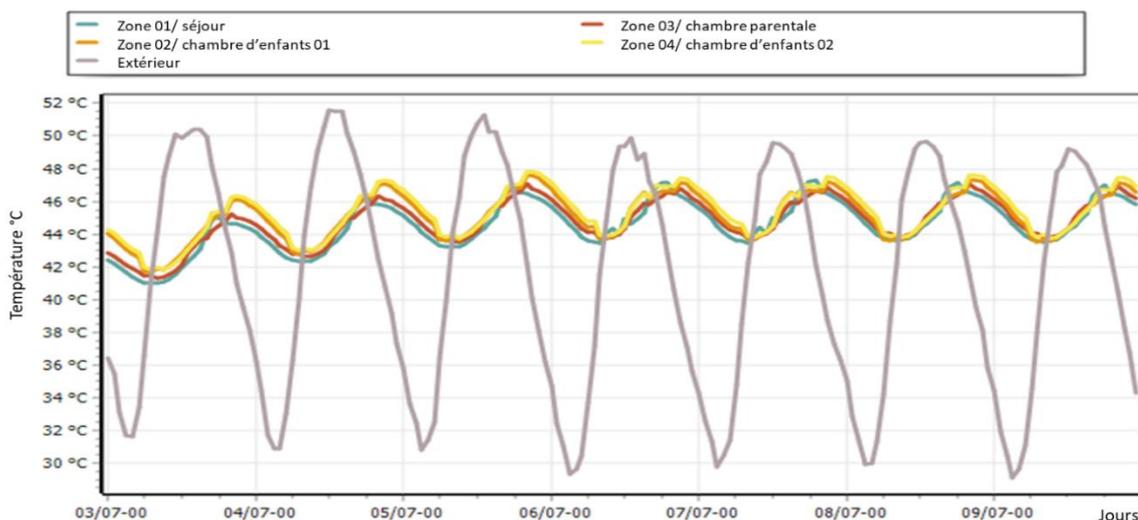


Figure IV. 2 : Évolution des températures pendant la semaine la plus chaude pour la variante 02.

**IV.2.1.3 Variante 03-A :**

renforcement du plancher haut (intégration des folioles)

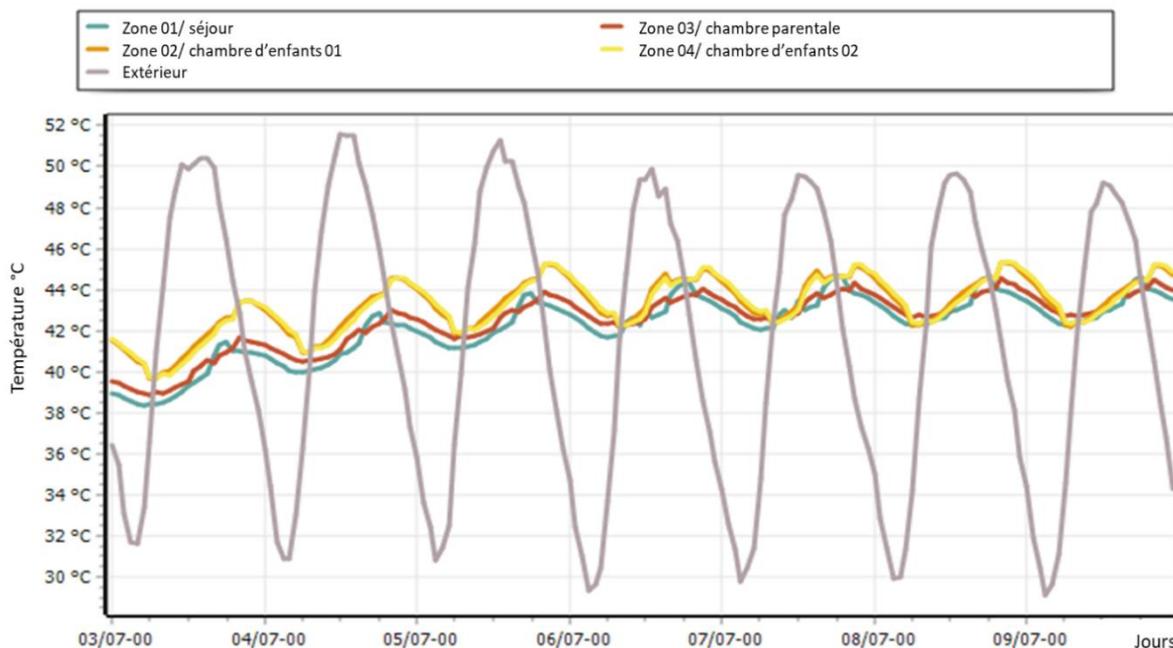


Figure IV. 3: Évolution des températures pendant la semaine la plus chaude pour la variante 03-A.

**IV.2.1.4 Variante 03-B :**

Renforcement du plancher haut (intégration du nouveau matériau)

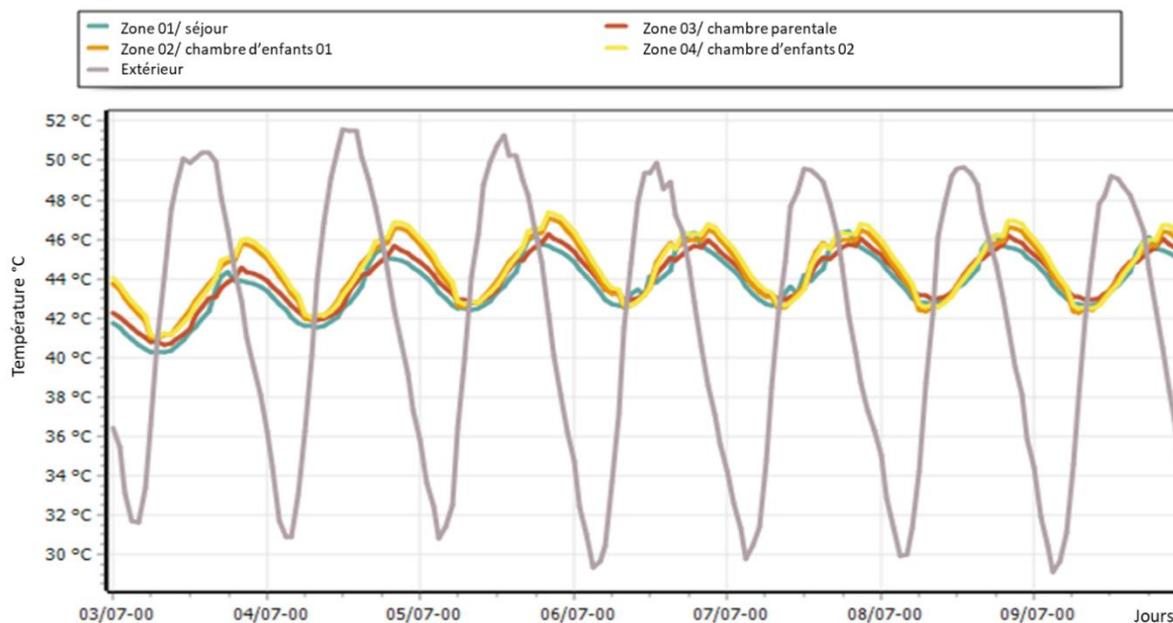


Figure IV. 4 : Évolution des températures pendant la semaine la plus chaude pour la variante 03-B.

**IV.2.1.5 Variante 03-C :**

Renforcement du plancher haut (intégration des folioles et du nouveau matériau)

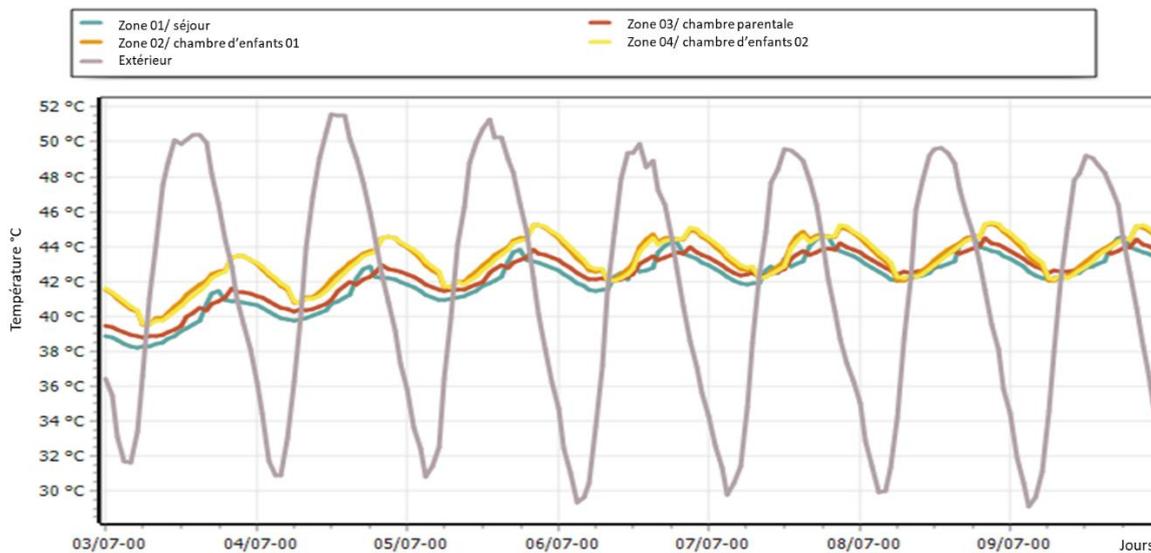


Figure IV. 5: Évolution des températures pendant la semaine la plus chaude pour la variante 03-C

**IV.2.1.6 Variante 04 :**

Renforcement du plancher haut et des murs extérieurs

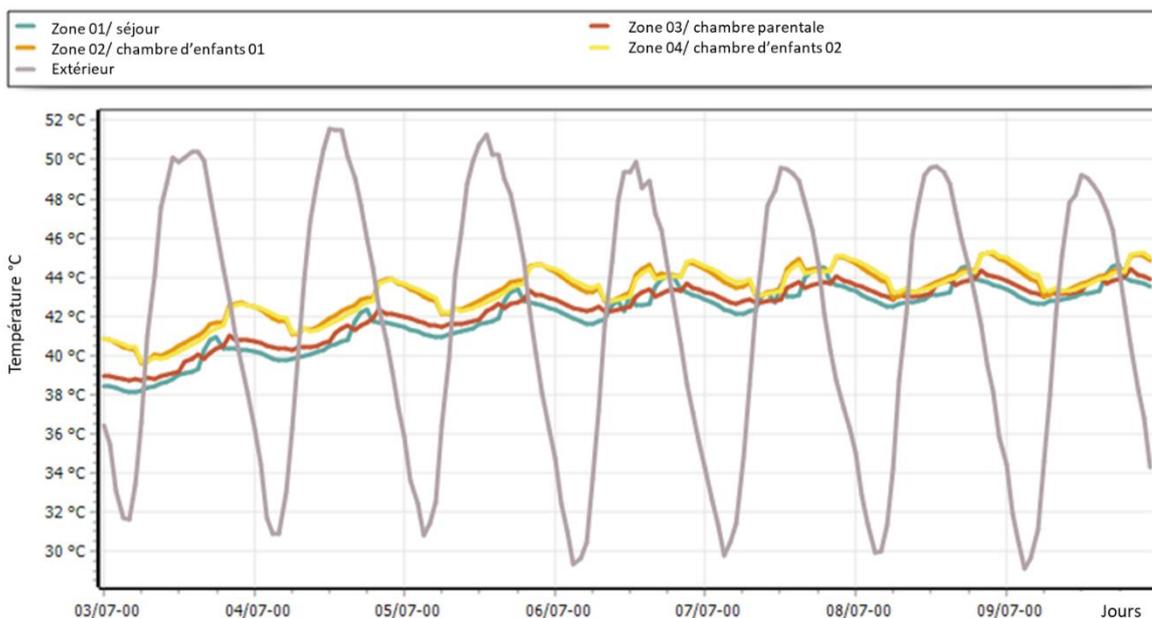


Figure IV. 6: Évolution des températures pendant la semaine la plus chaude pour la variante 04.

**❖ Interprétation :**

D'après les résultats obtenus, nous avons remarqué une fluctuation de la température extérieure allant de 29°C à 51,6°C. Dans le cas initial (variante 01), la variation de température extérieure était comprise entre 41°C et 48°C, avec un écart de 3,7°C par rapport à la température extérieure. Nous avons également constaté que les chambres d'enfants 01 et 02 présentaient des températures élevées, oscillant entre 41°C et 48°C, par rapport à la zone des chambres parentales et des séjours. Cette différence est due à l'orientation spécifique des chambres d'enfants 1 et 2, respectivement vers le nord-est et le nord-ouest. Les températures élevées observées dans les différentes zones de la variante 01 sont attribuables à l'usage de parpaings et de hourdis dans les éléments constructifs. Ces matériaux se caractérisent par leur faible inertie thermique. De plus, ces températures élevées sont également dues à l'absence d'isolation dans la construction.

En revanche, nous avons observé des températures similaires (variant entre 41 °C et 47 °C) dans la zone des chambres parentales orientées au nord et les séjours orientés au sud, malgré le fait qu'ils aient une surface d'échange identique. Cette similarité de température peut être attribuée à la compacité de l'habitation étudiée, qui favorise une meilleure circulation thermique entre ces pièces et limite les variations de température (**voir figure IV.1**)

Dans la variante 02, nous avons observé que l'intégration du nouveau matériau dans les murs extérieurs a permis de stabiliser les températures intérieures. Par conséquent, ces températures sont restées constantes par rapport au cas initial (**voir figure IV.7**)

Dans le cas de la variante 03-B, nous avons remarqué qu'en intégrant le nouveau matériau au niveau du plancher haut, une différence de **0,6°C** par rapport au cas initial a été observée. De plus, par rapport à la température extérieure, une différence de **4,2°C** a été constatée (**voir figure IV.4**).

Cependant, selon les résultats des variantes 03-A, 03-C et 04, nous avons constaté une baisse de **2,6°C** par rapport à la température du cas initial (**voir figures IV.3, IV.5 et IV.6**), ainsi qu'une différence de **6,2°C** par rapport à la température extérieure.

### IV.2.2 Les simulations en période hivernale :

#### IV.2.2.1 Variante 01 :

cas initial

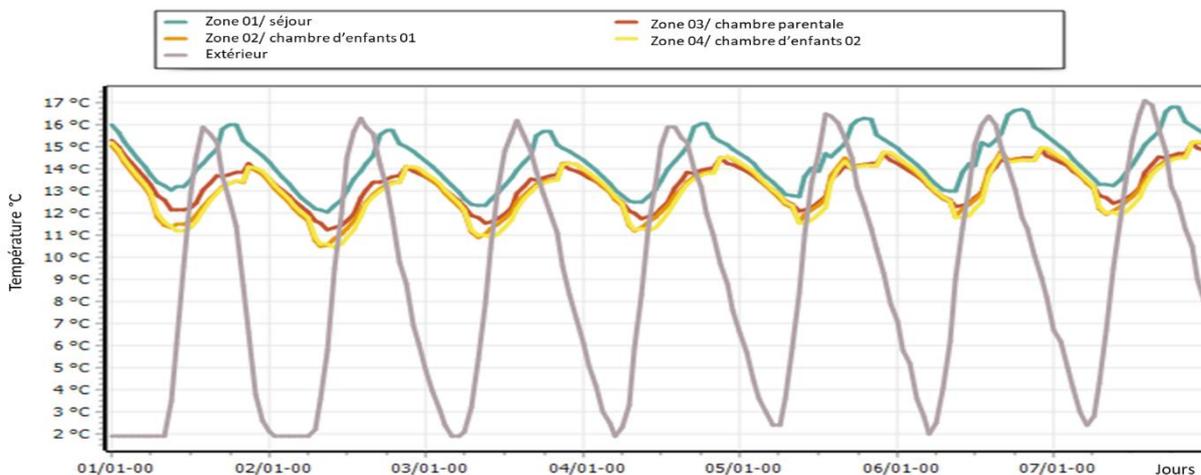


Figure IV. 7: Évolution des températures pendant la semaine la plus froide pour la variante 01.

#### IV.2.2.2 Variante 02 :

Renforcement des murs extérieurs (intégration du nouveau matériau)

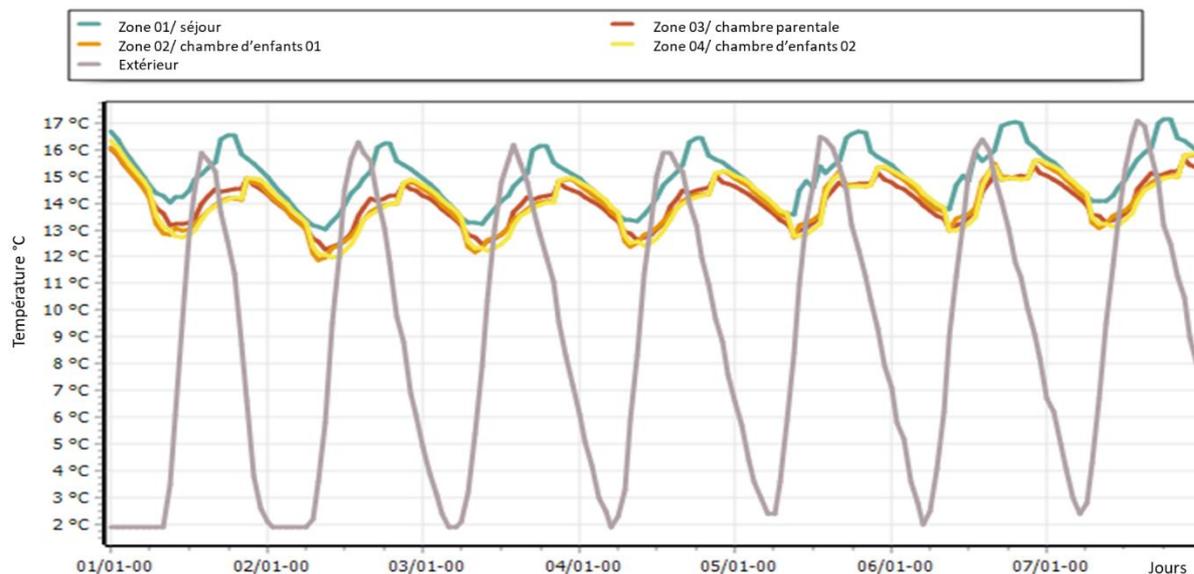


Figure IV. 8: Évolution des températures pendant la semaine la plus froide pour la variante 02.

**IV.2.2.3 Variante 03-A :**

Renforcement du plancher haut (intégration des folioles)

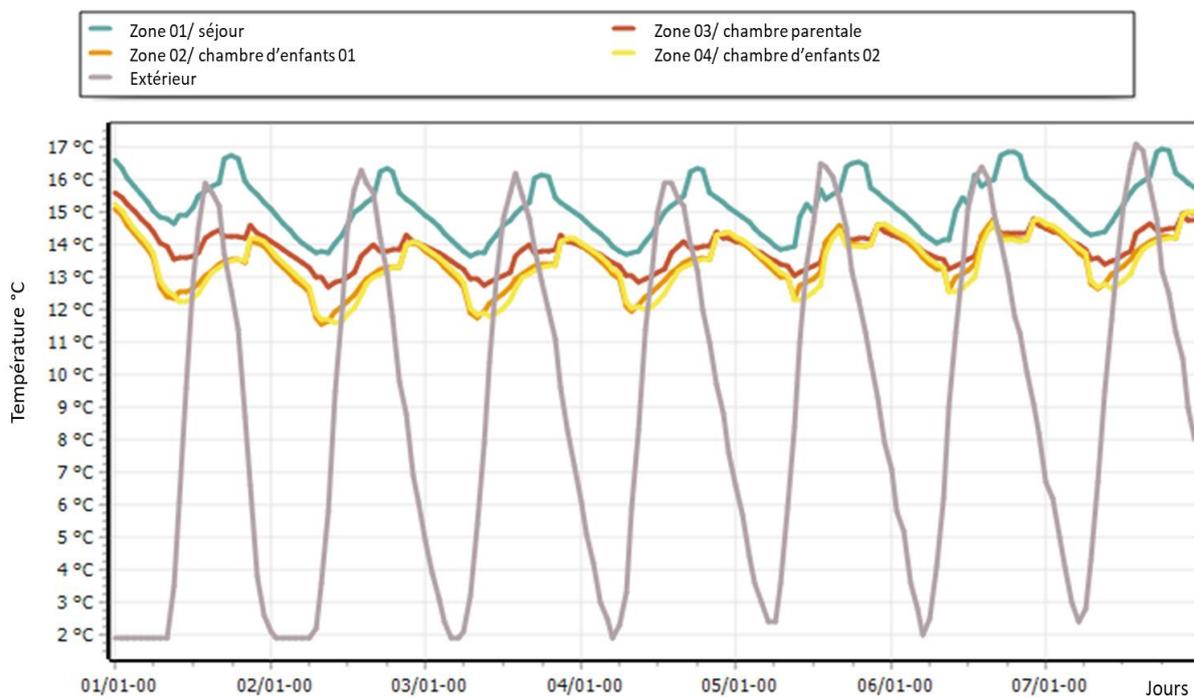


Figure IV. 9 : Évolution des températures pendant la semaine la plus froide pour la variante 03-A.

**IV.2.2.4 Variante 03-B :**

Renforcement du plancher haut (intégration du nouveau matériau)

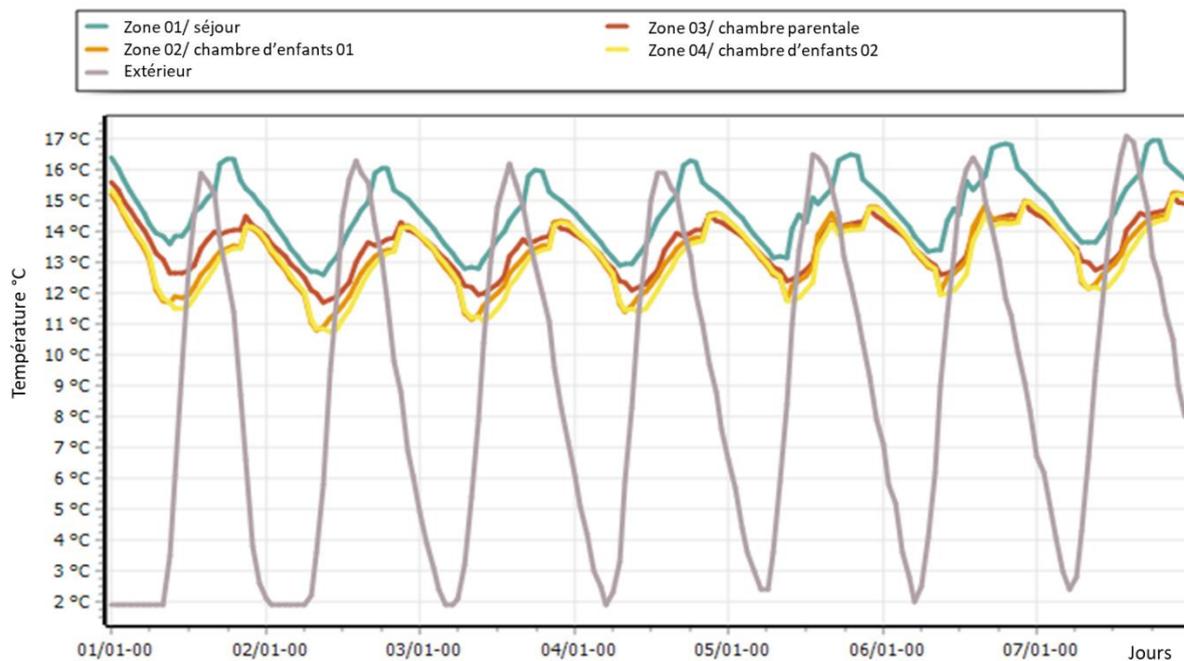


Figure IV. 10: Évolution des températures pendant la semaine la plus froide pour la variante 03-B.

**IV.2.2.5 Variante 03-C :**

Renforcement du plancher haut (intégration des folioles et du nouveau matériau)

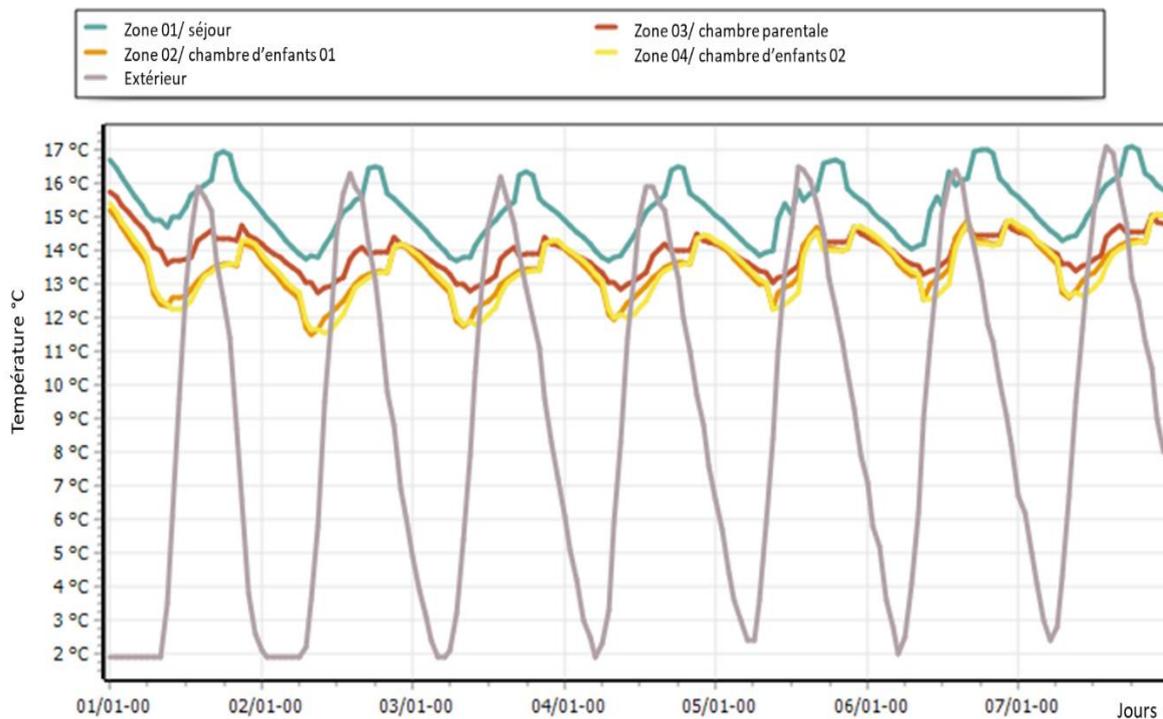


Figure IV. 11: Évolution des températures pendant la semaine la plus froide pour la variante 03-C.

**IV.2.2.6 Variante 04 :**

Renforcement du plancher haut et des murs extérieurs

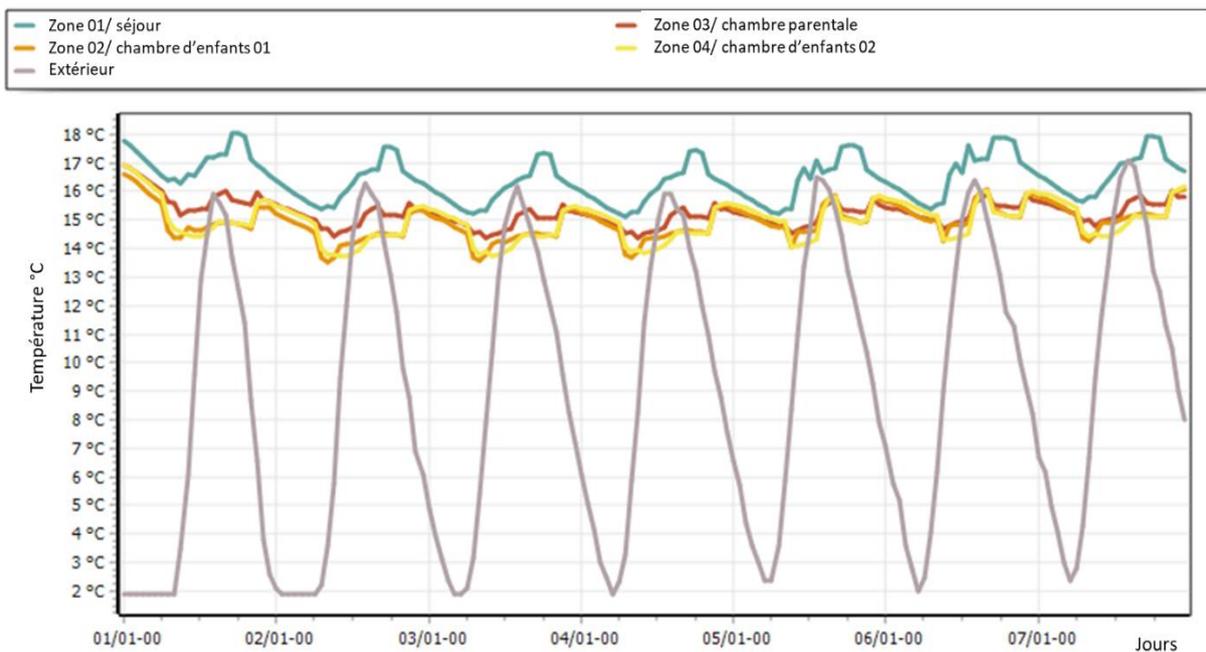


Figure IV. 12: Évolution des températures pendant la semaine la plus froide pour la variante 04.

### ❖ Interprétation :

D'après les résultats obtenus, les températures extérieures ont varié entre 2°C et 16,4°C. le cas initial (variante 01) les températures intérieures se sont situées entre 10°C et 17°C, avec un écart de 8°C par rapport à la température extérieure. Nous avons également constaté que la zone des séjours présente des températures plus élevées que les autres zones de confort. Les températures dans la zone des séjours variaient entre 12°C et 17°C, tandis que dans les autres zones de confort, elles se situaient entre 10°C et 15°C. Cette différence de température s'explique par l'orientation sud des séjours, ce qui entraîne une exposition plus importante aux apports solaires par rapport aux autres espaces (**voir figure IV.7**).

De plus, d'après les résultats obtenus pour les variantes 02, 03-A et 03-C, nous avons observé une augmentation de 2°C par rapport au cas initial (**voir figures IV.8, IV.9 et IV.11**), avec une différence de 10°C par rapport à la température extérieure.

Pour la variante 03-B, nous avons constaté que l'intégration du nouveau matériau au niveau du plancher haut a maintenu les températures stables par rapport au cas initial (**voir figure IV.10**)

Toutefois, dans le cas de la variante 04, nous avons observé une augmentation de 4°C par rapport au cas initial, ainsi qu'une différence de 12°C par rapport à la température extérieure.

### ❖ Synthèse :

D'après les résultats obtenus lors des simulations sans consigne estivales et hivernales, nous avons observé que le renforcement du plancher haut par l'incorporation des folioles et du nouveau matériau a conduit à une amélioration du confort thermique estival, se traduisant par une réduction de la température intérieure de 2,6°C par rapport au cas initial ainsi qu'une différence de 6,2°C par rapport à la température extérieure. En ce qui concerne la simulation en période hivernale, nous avons constaté que le renforcement des murs extérieurs (grâce à l'intégration du nouveau matériau) et du plancher haut (par l'intégration des folioles et du nouveau matériau) a amélioré le confort thermique hivernal en augmentant la température de 4°C par rapport au cas initial, ainsi qu'une différence de 12°C par rapport à la température extérieure.

### IV.3. Les simulations avec consigne de thermostat:

#### IV.3.1 Les simulations en période estivale :

L'histogramme ci-dessous représente les résultats obtenus après le lancement des simulations avec consigne de thermostat pour les différentes variantes pendant la semaine la plus chaude :

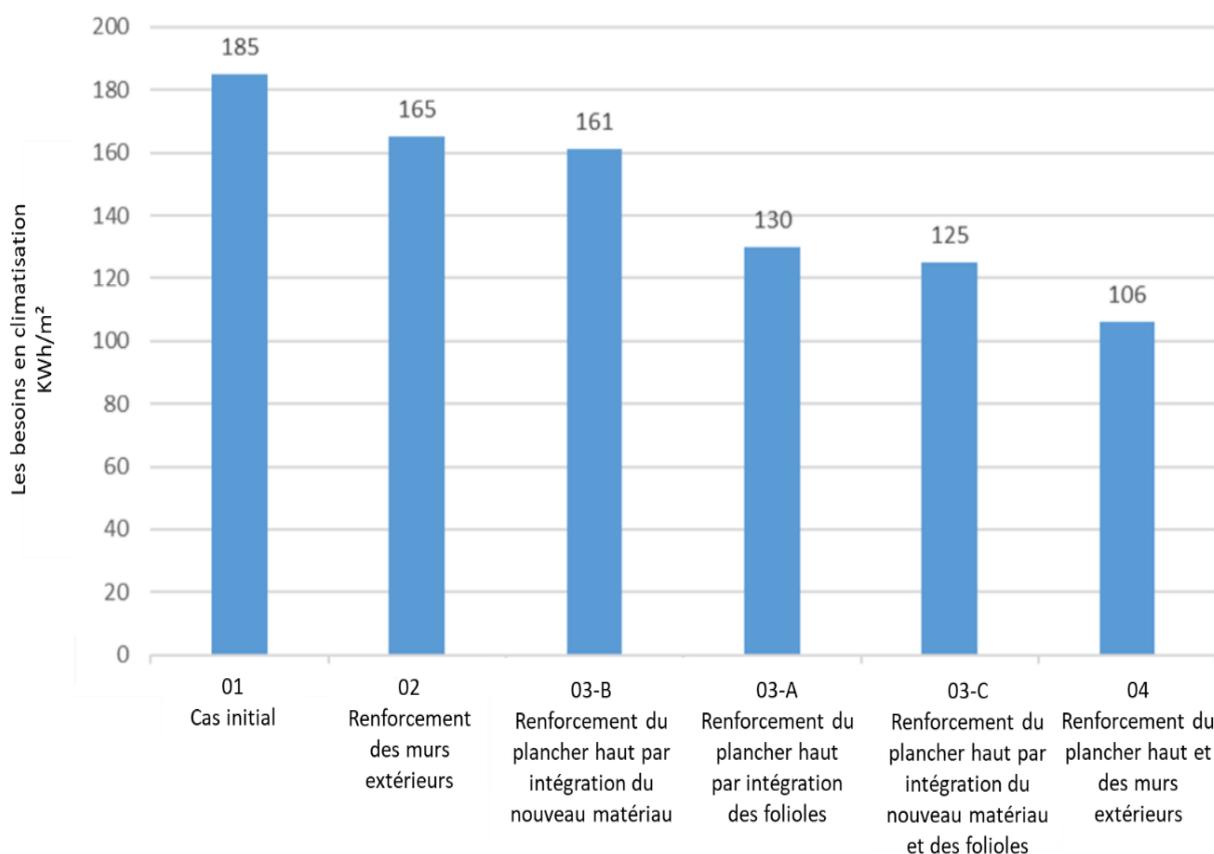


Figure IV. 13: Comparaison des besoins en climatisation pour les différentes variantes.

#### ❖ Interprétation :

Les simulations estivales avec consigne de thermostat ont démontré une diminution des besoins en climatisation. Les valeurs estimées étaient de 185 KWh/m<sup>2</sup> pour la variante 01 (cas initial), réduites à 165 KWh/m<sup>2</sup> pour la variante 02 et à 161 KWh/m<sup>2</sup> pour la variante 03-B. Cette amélioration est attribuée à l'incorporation du nouveau matériau au niveau du plancher haut et des murs extérieurs. De plus, les variantes 03-A, 03-C et 04 ont également présenté une réduction des besoins en climatisation, avec des valeurs respectives de 130 KWh/m<sup>2</sup>, 125 KWh/m<sup>2</sup> et **106 KWh/m<sup>2</sup>**. Cette diminution est le résultat de l'intégration des folioles et du nouveau matériau au niveau du plancher haut et des murs extérieurs.

### IV.3.2 Les simulations en période hivernale :

L'histogramme ci-dessous représente les résultats obtenus après le lancement des simulations avec consigne de thermostat pour les différentes variantes pendant la semaine la plus froide :

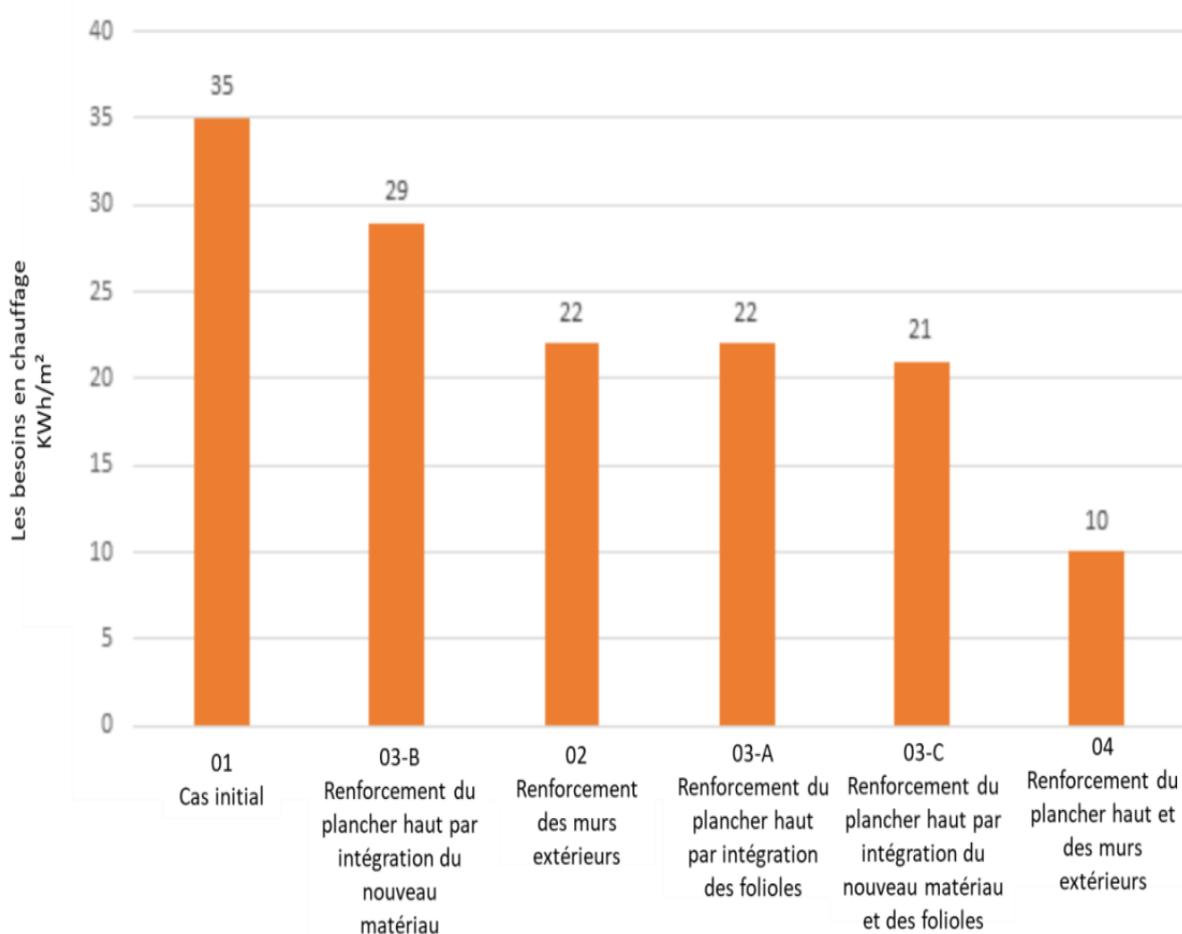


Figure IV. 14: Comparaison des besoins en chauffage pour les différentes variantes.

#### ❖ Interprétation :

Les simulations hivernales avec consigne de thermostat ont révélé une diminution des besoins en chauffage. Les estimations initiales indiquaient 35 KWh/m<sup>2</sup> pour la variante 01 (cas initial), tandis que la variante 03-B a atteint 29 KWh/m<sup>2</sup>. Cette amélioration est attribuée à l'incorporation d'un nouveau matériau au niveau du plancher haut. De plus, les variantes 02, 03-A, 03-C et 04 ont également présenté une réduction des besoins en chauffage, avec des valeurs respectives de 22 KWh/m<sup>2</sup>, 22 KWh/m<sup>2</sup>, 21 KWh/m<sup>2</sup> et **10 KWh/m<sup>2</sup>**. Cette diminution est due à l'intégration des folioles et du nouveau matériau au niveau du plancher haut et des murs extérieurs.

Tableau IV. 1: Comparaison des taux de réduction des besoins en climatisation et en chauffage des différentes variantes par rapport au cas initial

	Variante 02	Variante 03-A	Variante 03-B	Variante 03-C	Variante 04
<b>Taux de réduction des besoins en climatisation</b>	11%	30%	13%	32%	43%
<b>Taux de réduction des besoins en chauffage</b>	36%	37%	16%	40%	72%

Tableau IV. 2: Besoins en climatisation et chauffage par variantes (en kWh)

	Variante 01	Variante 02	Variante 03-A	Variante 03-B	Variante 03-C	Variante 04
<b>Besoins en climatisation (KWh)</b>	15897	14216	11200	13852	10777	9075
<b>Besoins en chauffage (KWh)</b>	2986	1922	1867	2518	1794	833

#### ❖ Synthèse :

En analysant les tableaux précédents, il est évident que l'incorporation des folioles, qui n'avait pas été exploitée dans les recherches antérieures et qui constitue l'originalité de ce travail, ainsi que l'utilisation d'un nouveau matériau pour le plancher haut et les murs extérieurs, ont entraîné des réductions significatives des besoins en climatisation, passant de 15 897 kWh à **9 075 kWh**, et en chauffage, passant de 2 986 kWh à **833 kWh**. Les taux de réduction ont atteint jusqu'à **43%** pour la climatisation et **72%** pour le chauffage par rapport au cas initial. Ces résultats démontrent l'efficacité de ces modifications dans la diminution des besoins énergétiques liés à la climatisation et au chauffage.

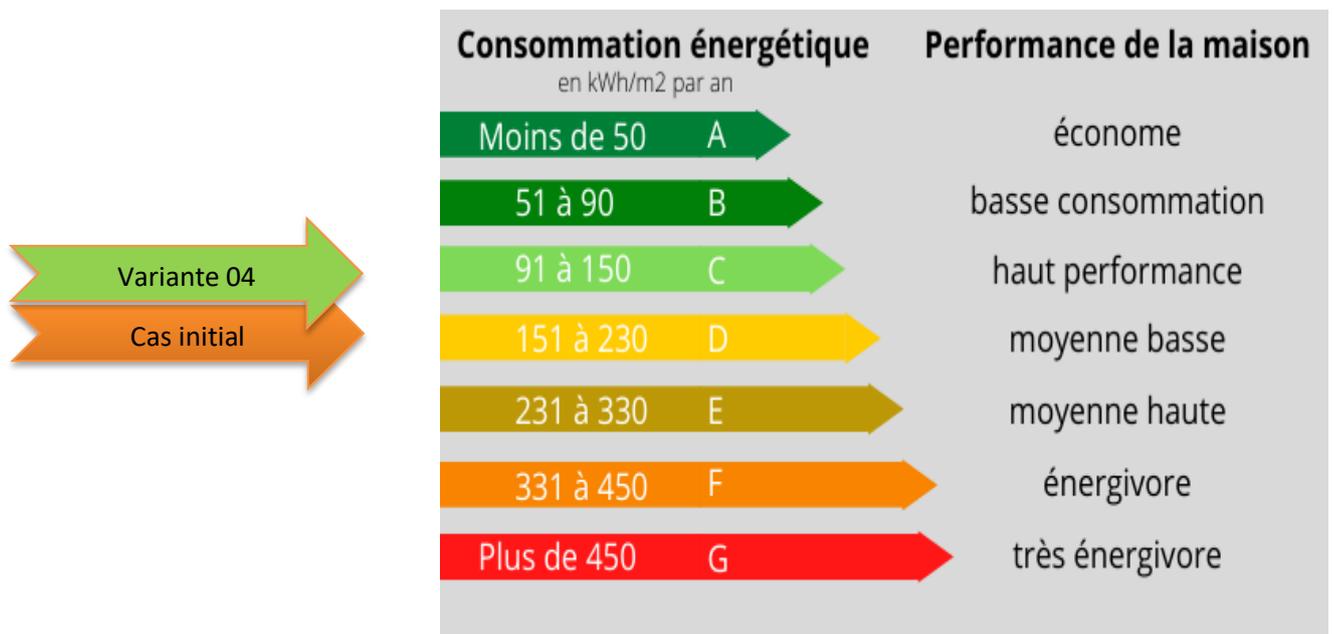


Figure IV. 15: Comparaison de l'indice de performance énergétique entre le cas initial et la variante 04.

#### IV.4. Conclusion :

En conclusion, l'intégration du nouveau matériau à base de déchet de palmier dattier et des folioles a apporté une amélioration considérable au niveau du confort thermique dans notre cas d'étude. Cela s'est traduit par une diminution significative des besoins en climatisation et en chauffage (avec une réduction totale de 48% par rapport au cas initial), ainsi qu'une stabilité accrue des températures intérieures. Ces résultats soulignent l'importance des choix de matériaux innovants pour favoriser une efficacité énergétique optimale et un confort thermique optimal lors de la conception des bâtiments.

## Conclusion générale

## Conclusion générale

L'Algérie dispose d'une quantité importante de déchets de palmier dattier, et la demande croissante en énergie due à l'augmentation de la population pose un défi énergétique quotidien. Pour répondre à cette problématique et à ce contexte énergétique, nous avons proposé la valorisation de ces déchets par l'élaboration d'un nouveau matériau biocomposite à base de déchets de palmier dattier. Une caractérisation thermophysique a été réalisée au sein du laboratoire du Centre National de l'Étude et de la Recherche Intégrée du Bâtiment (CNERIB), par la suite, des simulations thermiques dynamiques ont été réalisées à l'aide du logiciel PLEIADES (version 5.23.4.4) pour évaluer le comportement de ce nouveau matériau, en proposant également l'intégration des folioles dans le plancher haut, dans le cadre d'un cas d'étude situé à In Salah.

Les résultats de la caractérisation thermophysique ont révélé que le matériau du groupe 02 (fabriqué à partir de pétioles, de roseaux secs, d'agrafes de palmier dattier et d'une matrice à base d'eau et de plâtre) présentait la plus faible conductivité thermique, mesurée à  $0.149 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Cette faible conductivité était attribuée à sa teneur élevée en pétioles qui présentaient une conductivité thermique de  $0.106 \text{ W/m}\cdot\text{k}$ . En revanche, le groupe 01 présentait une conductivité thermique de  $0.253 \text{ W/m}\cdot\text{k}$ , tandis que le groupe 03 affichait une conductivité thermique légèrement inférieure, à  $0.23 \text{ W/m}\cdot\text{k}$ . Concernant les échantillons en poudre, les folioles présentaient une conductivité thermique de  $0.336 \text{ W/m}\cdot\text{k}$ . Sur la base de ces résultats, nous avons choisi d'intégrer le groupe 02 et les folioles dans les différents éléments constructifs de notre cas d'étude (le plancher haut et les murs extérieurs).

En intégrant les folioles du palmier dattier dans notre étude, qui n'avait pas été exploré dans les recherches antérieures, nous mettons en lumière l'importance de considérer les ressources sous-utilisées pour promouvoir l'efficacité énergétique des bâtiments. Cette approche novatrice ouvre de nouvelles perspectives, incitant à une réflexion plus approfondie sur l'utilisation des ressources naturelles inexploitées dans la conception et la construction de bâtiments durables et écoénergétiques.

Les résultats de la simulation ont clairement démontré les avantages de l'intégration du nouveau matériau et des folioles dans les différents éléments constructifs. Cette intégration a permis de réduire considérablement les besoins en climatisation et en chauffage, avec une diminution totale de 48% par rapport au cas initial. Plus précisément, les besoins en climatisation ont été réduits de 15897 kWh à 9075 kWh, soit une réduction de 43%, tandis que les besoins en chauffage ont été réduits de 2986 kWh à 833 kWh, soit une réduction de 72%. Dans le cas de la simulation sans consigne de thermostat, les écarts par rapport au cas initial pour la période estivale

et hivernale sont respectivement de 2.6°C et 4°C, et par rapport à la température extérieure, ils sont de 6.2°C et 12°C. Les résultats obtenus mettent en évidence l'importance cruciale de l'incorporation de matériaux locaux dans nos projets de construction. Cette approche permet non seulement de maîtriser les coûts, mais aussi de réaliser d'importantes économies d'énergie. De plus, sur le plan environnemental, ces matériaux se révèlent bénéfiques.

Cependant, bien que les résultats obtenus en termes de performances thermiques soient satisfaisants, il est essentiel de poursuivre les travaux afin de prendre en compte l'aspect mécanique de ce matériau, en développant un modèle adapté aux habitations en région aride. Il est nécessaire de se pencher sur cet aspect afin de garantir la durabilité et la résistance du matériau dans des conditions environnementales spécifiques.

En conclusion, la valorisation des déchets de palmier dattier par la création d'un nouveau matériau biocomposite offre une solution prometteuse pour réduire l'impact énergétique et environnemental de la construction. L'utilisation de ressources locales et la mise en œuvre de technologies durables sont des axes importants à explorer pour une gestion efficace des déchets et une utilisation optimale de l'énergie dans nos futurs projets de construction en Algérie.

## Références bibliographiques

- [1] "Programme de développement de l'efficacité énergétique à l'horizon 2030," APRUE, Ministère de l'Energie et des Mines, Algérie, 2015.
- [2] N. Benmansour, *Développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat*, Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, 2015.
- [3] M. Abdessamed, *Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforcés de Fibres Végétales de Palmier Dattier*, Thèse de Magister, Université de Kasdi Merbah - Ouargla, 2006.
- [4] Y. Lamia, *Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss)*, Thèse de Magister, Université de Ferhat Abbas-Sétif, 2011.
- [5] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, and M. Fois, *Renewable materials to reduce building heatloss: Characterization of date palm wood*, *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 491-497, 2011.
- [6] [https://e-rse.net/definition/](https://e-rse.net/definition/construction-durable-definition-benefices-labels) construction durable-définition-benefices-labels.
- [7] MM.fragos and Trouillez, *Le guide de l'isolation: Fine Media*, Paris, 2012. [contacte@finemedia.fr](mailto:contacte@finemedia.fr).
- [8] P. Meukam, "Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments," Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2004, pp.157.
- [9] J.-P. Oliva, *L'isolation écologique: conception, matériaux, mise en oeuvre: terre vivante*, mens, france,2001,2007.
- [10] BRANCHU, M. et C. BRANCHU. 2012, *Isolation thermique et acoustique : Rouleaux, panneaux, cloisons, murs et planchers, tuyauteries, survitrages* Ed. 1, Eyrolles, ISBN 978-2-212-13429-2. URL <http://univ.scholarvox.com.passerelle.univ-rennes1.fr/book/88812576>.
- [11] AFNOR. 1983, «NF P75-101 - Isolants thermiques destinés au bâtiment - Définition », URL <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-p75-101/isolants-thermiques-destines-au-batiment-definition/article/692898/fa018774>
- [12] ADIL. 2010, *Guide isolation thermique ... une maison plus hermétique, c'est logique!*, Énergie en région Centre. URL <http://www.centre.ademe.fr/mediatheque/publications/energie>.
- [13] L. Liu, H. Li, A. Lazzaretto, G. Manente, C. Tong, Q. Liu, and N. Li, "The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 912-932, 2017.
- [14] H. Chaib, A.Kriker, A.Mekhermeche, *Thermal study of earth bricks reinforced by date palm fibers*, *Energy Procedia* vol 74, pp.919 – 925, 2015
- [15] J.-P. Oliva, *L'isolation écologique: conception, matériaux, mise en oeuvre: terre vivante*, mens, france,2001,2007.
- [16] TECHNIQUE DE L'INGÉNIEUR. 2012, «Éco-matériaux et isolation», *Techniques de l'Ingénieur*,vol. TBA2125, p. 55. URL <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-isoler-et-revetir-les-facades-43811210/eco-materiaux-et-isolation-tba2125/>.

- [17] Cutter, A.G; Development and characterization of renewable resource-structural composite materials, 2008, UC San Diego.
- [18] OUANECHÉ SAMIRA 2014 « Etude et élaboration de nouveaux matériaux composites isolants » université MOULOUD MAMMÉRI Tizi-Ouzou
- [19] Centre d'Animation Régional en Matériaux Avancez CARMA., (2016). « Glossaire des matériaux composites »
- [20] Gorent. L. (2008). « Généralités sur les matériaux composites », pp 48.
- [21] Joël, S. (2007). « Potentiel d'utilisation des fibres de papier dans la conception de composites bois polymères par une technologie d'extrusion ». Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, pp 165.
- [22] K. Abdelouahed, *Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2005.
- [23] B.Haba, *Etude in-situ des performances énergétiques et mécaniques des matériaux biosourcés et locaux*, Thèse de doctorat, Université El-Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, 2017. [24] G. Peyron, *Cultiver le palmier-dattier : Guide illustré de formation*. Montpellier, France: CIRAD, 2000.
- [25] A. Al-Khanbashi, K. Al-Kaabi, and A. Hammami, *Date Palm Fibers as Polymeric Matrix Reinforcement: Fiber Characterization*, Polymer Composites, vol. 26, pp. 486- 497, 2005.
- [26] C. Magniont, *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agro ressources*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, 2010.
- [27] C.W. Nguong, S.N.B. Lee, and D. Sujan, *A Review on Natural Fibre*, Reinforced Polymer Composites, 2013.
- [28] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche, and A. Boudenne, *Thermal and mechanical performance of natural mortar einforced with date palm fibers for use as insulatingmaterials in building*, Energy and Buildings, vol. 81, pp. 98-104, 2014.
- [29] M. Chikhi, B. Agoudjil, A. boudenne, and A. Gherabli, *Experimental investigation of new biocomposite with lowcost for thermal insulation*, Energy and Buildings, vol. 66, pp. 267-273, 2013.
- [30] M. Chikhi, *Méetrologie et modélisation des transferts dans les composites naturels à faible coût pour l'isolation thermique dans les panneaux solaires*, Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, 2013.
- .
- [31] N. Dujardin, « UN MATERIAU BIOSOURCE DE CHOIX : LES FIBRES NATURELLES. CARACTÉRISATIONS ET APPLICATIONS », in *25èmes Journées Scientifiques de l'Environnement - L'économie verte en question*, Créteil, France, févr. 2014, vol. JSE-2014, no 01.
- [32] D. Lelièvre, « Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés », p. 184, 2015.
- [33] Y. A. Oumeziane, « Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique: application aux parois en béton de chanvre », p. 354.

- [34] C. Véronique, « Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique », p. 248.
- [35] M.Majda , M.Halima « ÉLABORATION D'UN MATÉRIAU ISOLANT À BASE DE GRIGNON D'OLIVE ET DE PAPIER » université de blida 01 , Blida, Algérie 2019.
- [36] : <https://www.google.com/maps>
- [37] : Réglementation thermique du bâtiment « Document technique réglementaire DTR C3.2/4 » CNERIB , 2017.
- [38] : <https://meteonorm.com/>
- [39] : S. OUKACI « Application des anciens procédés dans l'habitat contemporain » Thèse de doctorat, Université de SAAD DAHLEB 01 de BLIDA, Algérie, 2023.
- [40] : Logiciel Pléiades (izuba.fr)

