



HAL
open science

Stockage d'énergie thermique dans des enveloppes hygroscopiques à base de matériaux biosourcés

Farjallah Alassaad

► **To cite this version:**

Farjallah Alassaad. Stockage d'énergie thermique dans des enveloppes hygroscopiques à base de matériaux biosourcés. Génie civil. Normandie Université, 2022. Français. NNT : 2022NORMC242 . tel-03936285

HAL Id: tel-03936285

<https://theses.hal.science/tel-03936285>

Submitted on 12 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Normandie Université

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité GENIE CIVIL

Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie

Stockage d'énergie thermique dans des enveloppes hygroscopiques à base de matériaux biosourcés

Présentée et soutenue par
FARJALLAH ALASSAAD

Thèse soutenue le 24/10/2022
devant le jury composé de

MME FLORENCE COLLET	Maître de conférences HDR, UNIVERSITE RENNES 1	Rapporteur du jury
MME MIREN ETXEBERRIA	Professeur associé, Université de BARCELONE - ESPAGNE	Rapporteur du jury
M. GILLES ESCADEILLAS	Professeur des universités, Institut National Sciences Appliquées	Membre du jury
M. KARIM TOUATI	Maître de conférences, Ecole sup.d'ingénieurs ESITC Caen	Membre du jury
M. STEVE GOODHEW	Professeur, University of PLYMOUTH	Président du jury
M. NASSIM SEBAIBI	Maître de conférences HDR, Ecole sup.d'ingénieurs ESITC Caen	Directeur de thèse
M. DANIEL LEVACHER	Professeur émérite, Université de Caen Normandie	Co-directeur de thèse

Thèse dirigée par **NASSIM SEBAIBI (Ecole Supérieure d'Ingénieurs des Travaux de la Construction)** et **DANIEL LEVACHER (Morphodynamique continentale et côtière)**



Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent à mon directeur de thèse M. Nassim SEBAIBI, responsable scientifique à l'ESITC Caen, et à mon co-directeur de thèse M. Daniel LEVACHER, professeur au laboratoire M2C. Je tiens à les remercier tout d'abord pour la qualité de leur encadrement scientifique, leur disponibilité, mais aussi pour leurs qualités humaines qui m'ont permis d'apprécier grandement ces trois années passées au sein du laboratoire de l'ESITC Caen.

Je tiens à exprimer ma gratitude à mon tuteur M. Karim TOUATI, qui a été mon encadrant quotidien, très présent tout au long de la thèse pour me former, me guider, me booster, etc. Merci de m'avoir enseigné et soutenu pour progresser non seulement dans le domaine de la recherche mais aussi sur le plan personnel. Merci pour votre gentillesse et votre disponibilité, ainsi que pour votre soutien dans les moments difficiles de la thèse.

Je tiens également à remercier les membres du jury, Mme Florence COLLET, Mme Miren ETXEBERRIA, M. Gilles ESCADEILLAS et M. Steve GOODHEW, pour avoir accepté et pris le temps d'évaluer ce manuscrit et ce travail de thèse. Leurs remarques et la discussion lors de la soutenance permettent réellement d'envisager de nombreuses suites à cette thèse.

Je tiens également à remercier M. Yassine EL MENDILI, responsable de l'axe de recherche "Efficacité et Caractérisation" à l'ESITC Caen. Il a toujours su m'écouter, et son soutien permanent m'a été très précieux.

Merci également à tous les enseignants, membres du personnel de l'ESITC Caen qui ont partagé leurs expériences avec moi, Hamzé KARAKY, Amal BOURGUIBA, Fouzia KHADRAOUI, Mohammed-Hicham BENZAAMA, Fouad BOUKHELF, Mohammed ZELLOUFI, Aurélie FABIEN, et Malo LEGUERN.

Enfin, une énorme pensée pour mes amis du laboratoire, Abdelrahman MOHAMAD, Manal BOUASRIA, Bechara HADDAD, Marine GEORGES, Houssam AFFAN, Manon ARRETEAU, Athmane AZIL, Mohamed-Ali HAMDAOUI, Daniel LIRA, Abdelaziz HASNAOUI, Meriem GUESSOUM, Baraa AL SAHMARANY, Lally GARRIGUE, Benjamin DELESTRE, Fatima-Zahraa KACHKOUCH, Ilyas ELNAHAL et Walid DEBOUCHA avec qui j'ai beaucoup échangé, rigolé, débattu, les pauses café resteront mémorables. Ce fut un réel plaisir de travailler avec vous au quotidien.

Un merci particulier à ma famille et mes amis pour leur soutien et pour avoir été présents le jour de la soutenance, c'était une réelle motivation de les avoir à mes côtés.

إِلَى أَعَزِّ النَّاسِ

سِرُّ نَجَاحِي وَنُورُ دِرْبِي

نَبْعُ الْمَحَبَّةِ وَالْحَنَانِ

عِزُّوَتِي وَسَنْدِي

شُكْرًا مِنَ الْقَلْبِ

A ma famille, le secret de mon succès et la source de l'amour

Sommaire

Introduction générale	9
Chapitre 1 : Etude bibliographique	13
1.1. Contexte	13
1.2. Techniques de construction en terre	13
1.2.1. Pisé	15
1.2.2. Adobe	16
1.2.3. Blocs de terre comprimée	17
1.2.4. Bauge.....	17
1.2.5. Terre allégée.....	19
1.3. Stockage de l'énergie thermique	22
1.4. Matériaux à changement de phase.....	25
1.4.1. Application et produit de construction	27
1.5. Introduction des PCM dans les matrices cimentaires.....	28
1.5.1. Effet de l'incorporation de PCM sur le comportement physico-mécanique et au jeune âge des matrices cimentaires.....	28
1.5.2. Effet thermique de l'ajout de PCM dans la matrice cimentaire.....	31
1.5.2.1. Chaleur spécifique	31
1.5.2.2. Conductivité thermique	31
1.5.2.3. Application hivernale et estivale	32
1.5.3. Durabilité et comportement à long terme, au feu et au gel/dégel	33
1.5.3.1. Effet de la température et réaction au feu.....	33
1.5.3.2. Gel/dégel et attaque ionique	34
1.6. PCM et matériaux à base de terre.....	36
1.6.1. Incorporation de PCM dans les sous-couches de chaussées.....	36
1.6.2. Incorporation de PCM dans des matériaux de construction à base de terre	37
1.6.2.1. L'incorporation de PCM dans le pisé	37
1.6.2.2. L'incorporation de PCM dans la bauge.....	38
1.6.2.3. L'incorporation de PCM dans les enduits en terre	41
1.7. Bilan de l'état de l'art.....	42
CHAPITRE 2 : Matériaux et méthodes	47
2.1. Caractérisation des matériaux	47
2.1.1. Sols	47
2.1.1.1. Caractérisation géotechnique.....	47
2.1.1.2. Caractérisation chimique et minéralogique	49
2.1.2. Fibres végétales : pailles de lin et pailles de roseau.....	52
2.1.3. Matériaux à changement de phase (PCM).....	53

2.2.	Méthodologie de préparation des échantillons	56
2.2.1.	Préparation et traitement des matières premières	56
2.2.2.	Préparation des échantillons	57
2.3.	Technique de caractérisation des échantillons	58
2.3.1.	Propriétés hygroscopiques	58
2.3.1.1.	Isotherme de sorption/désorption	58
2.3.1.2.	Perméabilité à la vapeur d'eau.....	59
2.3.2.	Propriétés thermiques	61
2.3.2.1.	Conductivité thermique	61
2.3.2.2.	Capacité thermique massique	62
2.3.3.	Propriétés physico-mécaniques	63
2.3.3.1.	Propriétés physiques	63
2.3.3.2.	Résistance à la compression non confinée.....	64
2.3.4.	Dispositif d'étude de la réponse thermique d'un matériau avec des conditions aux limites variables	65
2.4.	Conclusion	66
Chapitre 3 : Effet de l'incorporation de PCM sur les propriétés de la terre allégée		69
3.1.	Introduction	69
3.2.	Propriétés physico-mécaniques	69
3.2.1.	Porosité.....	69
3.2.2.	Résistance à la compression	70
3.3.	Propriétés hygroscopiques.....	71
3.3.1.	Isotherme de sorption /désorption	71
3.3.2.	Perméabilité à la vapeur d'eau.....	74
3.4.	Propriétés thermiques	75
3.4.1.	Conductivité thermique	75
3.4.2.	Capacité thermique massique	77
3.5.	Réponse thermique à des conditions aux limites variables	78
3.6.	Conclusion.....	80
Chapitre 4 : Effet de l'incorporation de PCM sur les propriétés de la bauge		85
4.1.	Introduction	85
4.2.	Propriétés physico-mécaniques	85
4.2.1.	Porosité et masse volumique apparente.....	85
4.2.2.	Résistance à la compression	87
4.3.	Propriétés hygroscopiques.....	88
4.3.1.	Isotherme de sorption/désorption	88
4.3.2.	Perméabilité à la vapeur d'eau.....	89

4.4.	Propriétés thermiques	90
4.4.1.	Conductivité thermique	90
4.4.2.	Capacité thermique massique	91
4.5.	Réponse thermique à des conditions aux limites variables	93
4.6.	Conclusion.....	94
Chapitre 5 : Simulation de l'impact de l'incorporation de PCM dans les façades d'un logement à usage d'habitation sur la consommation d'énergie et le confort des occupants		99
5.1.	Introduction	99
5.2.	Mode de résolution.....	99
5.3.	Modèle de simulation	100
5.4.	Confort thermique, hygrothermique et simulation énergétique	102
5.4.1.	Confort thermique adaptatif.....	102
5.4.2.	Confort hygrothermique : Diagramme de Givoni.....	104
5.4.3.	Simulation énergétique.....	104
5.5.	Effet de l'incorporation de PCM dans une maison individuelle en terre allégée	105
5.5.1.	Confort thermique adaptatif dans une maison individuelle	105
5.5.2.	Confort hygrothermique (diagramme de Givoni) dans une maison individuelle en terre allégée	107
5.5.3.	Consommation d'énergie d'une maison individuelle en terre allégée	110
5.5.4.	Température optimale de changement de phase.....	111
5.6.	Effet de l'incorporation de PCM dans une maison individuelle en bauge	112
5.6.1.	Confort thermique adaptatif dans une maison individuelle	112
5.6.2.	Le confort hygrothermique (diagramme de Givoni) dans une maison individuelle en bauge	114
5.6.3.	Consommation d'énergie d'une maison individuelle en bauge	117
5.6.4.	Température optimale de changement de phase.....	118
5.7.	Effet des données d'entrée sur les résultats de simulation	118
5.8.	Conclusion.....	120
Conclusion générale et perspectives		123
Références.....		127
Liste des figures.....		137
Liste des tableaux		140
Résumé		141
Abstract		143

Introduction générale

Le secteur du bâtiment représente environ 40 % de la consommation mondiale d'énergie, une grande partie de cette consommation étant consacrée au chauffage [1]. En France, le secteur du bâtiment est responsable d'environ 45 % de la consommation totale d'énergie et d'environ 23 % des émissions de gaz à effet de serre. Le chauffage contribue, à lui seul, à environ 60 % de la consommation totale d'énergie d'un logement [2,3]. Pour faire face aux défis climatiques, les institutions qui régissent le fonctionnement des marchés énergétiques (gaz et électricité) incitent à rechercher une valorisation maximale de l'énergie produite ou disponible à un moment donné. En effet, il existe souvent un déphasage entre la production ou la disponibilité de la chaleur et les besoins des utilisateurs.

Dans le cadre de la transition énergétique, plusieurs vecteurs d'optimisation et d'économie énergétiques sont explorés pour réduire la consommation d'énergie et l'empreinte carbone des bâtiments sans dégradation du confort des occupants.

Parmi les solutions les plus étudiées, nous pouvons citer l'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments. Les travaux entrepris dans ce sens ont entraîné le développement de systèmes constructifs permettant des performances énergétiques très intéressantes. Il existe maintenant plusieurs exemples de bâtiments à énergie nette zéro [4]. Même pour les bâtiments existants, la rénovation peut permettre de réaliser des économies d'énergie [5–7] ainsi que des économies de coûts [8]. Des économies d'énergie supplémentaires peuvent être réalisées en réduisant l'énergie intrinsèque des matériaux de construction [9–11], notamment par l'utilisation accrue de matériaux biosourcés [12]. La technique de construction en terre (adobe, torchis, terre allégée, etc.) est une des nouvelles et anciennes solutions innovantes visant à limiter la consommation d'énergie par l'utilisation de matériaux biosourcés et géosourcés.

Par ailleurs, le stockage de la chaleur dans les bâtiments s'avère être une piste très prometteuse pour rationaliser la gestion de l'énergie à l'échelle du bâtiment, du quartier ou de la ville [3]. Dans ce sens, le stockage d'énergie thermique permettra d'augmenter la part des énergies renouvelables (solaire, éolienne, etc.) utilisées dans le bâtiment. En effet, il est souvent reproché à ces énergies le fait qu'elles soient intermittentes. La combinaison d'un système de stockage à ces énergies peut apporter une réponse efficace à ce problème.

Ainsi, plusieurs projets ont été initiés ces derniers temps en Europe et dans le monde. Nous pouvons citer quelques exemples, à savoir :

- Le projet européen NRG-STORAGE (Integrated porous cementitious Nanocomposites in non-Residential building envelopes for Green active/passive energy STORAGE, 2020-2024, www.nrg-storage.eu) [13] vise à lancer un nouveau système d'isolation qui remplace les matériaux d'isolation conventionnels par une mousse cimentaire multifonctionnelle à stockage et économie d'énergie (NRG-Foam).
- Le projet européen PowerSkin+ (Highly advanced modular integration of insulation, energising and storage systems for non-residential buildings, 2019-2023, <https://www.powerskinplus.eu/>) [14] combine une isolation améliorée et une technologie d'énergie renouvelable basée sur le photovoltaïque dans des solutions modulaires pour la modernisation des murs-rideaux existants.
- Le projet entre l'Europe et le Japon PoroPCM Project (Functional Porous Cementitious Nanocomposites for Heat Storage in Buildings Using Phase Change Materials, 2019-2022, <http://concert-japan.eu/>, <https://starfos.tacr.cz/en/project/8119001>) [15] porte sur le développement d'un nano-composite cimentaire poreux multifonctionnel à changement de phase pouvant être utilisé pour stocker de grandes quantités d'énergie thermique dans la couche d'isolation des bâtiments.

L'objectif du présent travail est l'investigation de l'impact de l'amélioration de la masse thermique sur la consommation d'énergie et le confort hygrothermique dans des bâtiments qui seraient construits avec des mélanges terre-paille. Les matériaux en terre crue réduisent l'empreinte environnementale des bâtiments tout en assurant un confort thermique à leurs occupants. Ainsi, des matériaux à changement de phase vont être incorporés dans deux mélanges à base de terre rencontrés dans la construction : la bauge et la terre allégée.

Ainsi, le présent manuscrit comporte cinq chapitres qui se définissent comme suit :

Le chapitre 1 rapporte l'état actuel des connaissances concernant les techniques de construction en terre et les systèmes de stockage thermique notamment les matériaux à changement de phase et leur utilisation dans le secteur de la construction.

Le chapitre 2 est consacré aux différents moyens expérimentaux utilisés au cours de la thèse. Il y est aussi décrit les caractéristiques des matériaux utilisés.

Le chapitre 3 présente les résultats expérimentaux obtenus avec de la terre allégée modifiée par l'incorporation d'un matériau à changement de phase (PCM). Le comportement hygroscopique et thermique de ce type de matériau est détaillé.

Le chapitre 4 porte sur le comportement de mélanges bauge-PCM. L'effet de l'incorporation d'un PCM sur le comportement hygroscopique, thermique et mécanique d'un mélange de bauge est analysé et discuté.

Le chapitre 5 propose une simulation numérique visant à quantifier la contribution énergétique de l'utilisation des PCM dans les parois externes de bâtiments qui seraient construits en bauge ou en terre allégée. De plus, le confort thermique et hygrothermique des occupants de ces bâtiments est abordé dans ce chapitre.

Chapitre **1** **Etude bibliographique**

Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.1. Contexte

Le secteur du bâtiment est l'un des principaux consommateurs d'énergie avec un taux de 40 % dans le monde et de 45 % en France [1]. Également, ce secteur participe aux émissions de gaz à effet de serre. Les systèmes de chauffage représentent l'essentiel de la consommation dans ce secteur [2,3]. Pour relever les défis climatiques, les autorités gouvernementales adoptent des réglementations visant à réduire la consommation d'énergie. En tant que grand consommateur, le secteur du bâtiment est concerné par ces réglementations. Ainsi des études ont été initiées pour améliorer le comportement du bâtiment, réduire sa consommation en énergie et son empreinte carbone.

Ces recherches sont axées sur l'amélioration des systèmes de chauffage et de climatisation ainsi que sur l'amélioration du comportement des enveloppes pour limiter les besoins en énergie (chauffage/refroidissement) et aboutir à des bâtiments à consommation zéro [4]. Grâce à ces études, de nouvelles techniques émergent comme le béton mousse, les matériaux biosourcés, les systèmes de stockage d'énergie, etc. et d'anciennes techniques sont réexaminées comme la construction en terre.

Parmi les réglementations gouvernementales en France, on cite la réglementation thermique 2012, appelée RT 2012. Son objectif est de limiter la consommation énergétique des bâtiments et de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre [16]. Cette réglementation définit les exigences de performance énergétique des bâtiments neufs et favorise le traitement des ponts thermiques et de la perméabilité à l'air dans les bâtiments neufs.

Les actions gouvernementales évoluent. La réglementation environnementale 2020, RE 2020, correspond à la nouvelle réglementation qui remplace la RT 2012 pour les bâtiments neufs [17]. Les objectifs de la RE 2020 sont comme suit : donner la priorité à la sobriété énergétique et à la décarbonation de l'énergie, diminuer l'impact carbone de la construction des bâtiments, garantir le confort en cas de forte chaleur.

La RE 2020 comprend plusieurs indicateurs concernant plusieurs segments dont l'énergie, *i.e.* *Bbio* (besoins bioclimatiques), *Cep* (consommations en énergie primaire : Evaluation des consommations d'énergie primaire du bâtiment pour des fonctionnements définies tel que : chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, éclairage, ventilation et auxiliaire, etc.) et *Cep,nr* (consommation en énergie primaire non renouvelable). Des indicateurs relatifs aux émissions de gaz à effet de serre sont également définis, *i.e.* *Icénergie* (impact des consommations d'énergie) et *Icconstruction* (impact carbone matériaux & équipement & chantier). De plus, l'indicateur DH (degrés-heures : nombre d'heures d'inconfort en été) est consacré au confort d'été. A chaque indicateur correspond une valeur seuil servant à vérifier le respect de la RE 2020 par la construction. Pour une construction utilisant des matériaux biosourcés, incluant du PCM, les indicateurs *Icconstruction* et *Icénergie* pourraient se trouver considérablement réduits par rapport à une construction conventionnelle.

1.2. Techniques de construction en terre

En raison des nombreuses réglementations, de son faible impact sur l'environnement et de sa disponibilité, la terre suscite à nouveau l'intérêt des chercheurs en tant que matériau de construction, bien que la terre ait été très utilisée dans le passé. Les nombreuses solutions de construction en terre ont été systématisées par la définition d'un schéma comprenant dix-huit systèmes anciens et modernes, répartis en trois grandes familles [18,19]. Ce schéma synthétise les solutions possibles pour les techniques de construction utilisant la terre comme matière première. Parmi les trois grandes familles de construction en terre, figurent ainsi les usages de la terre sous forme (voir Figure 1):

- monolithique et porteuse,
- de maçonnerie porteuse,
- de remplissage ou de protection d'une structure porteuse.

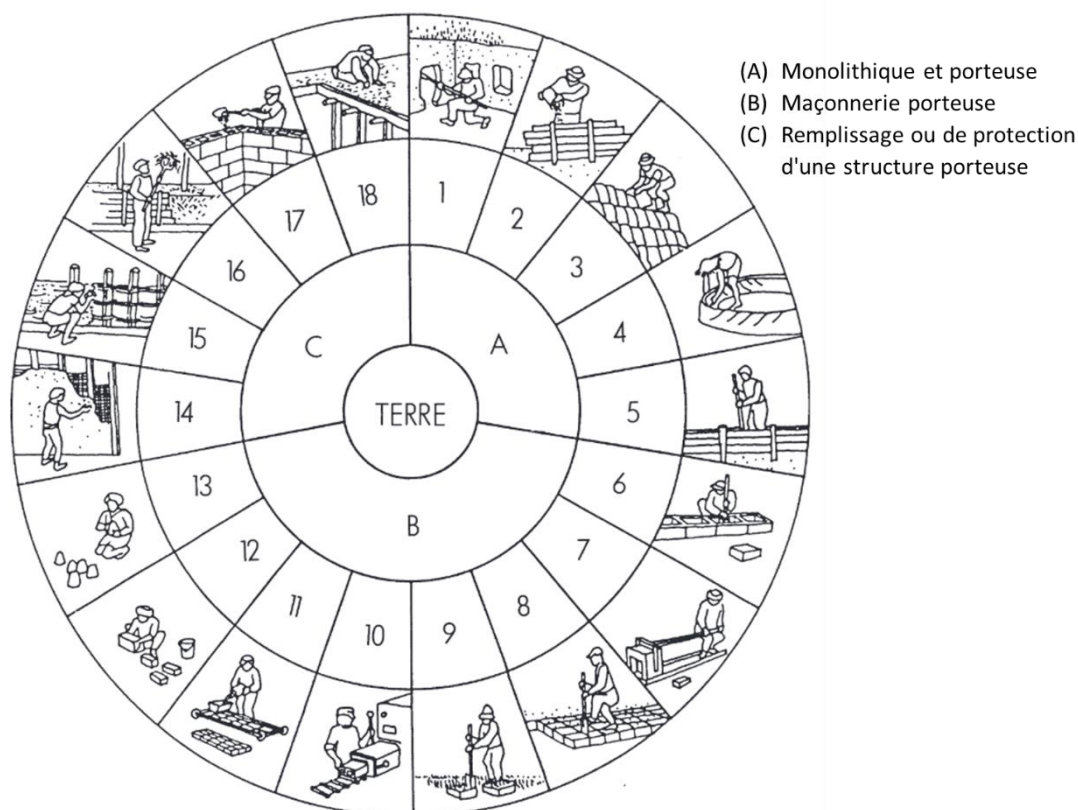


Figure 1: Classification des principales techniques de construction en terre, selon le mode d'utilisation, [20].

Des agrégats et des fibres végétales ont été incorporés dans une matrice de terre dans le but d'améliorer les performances depuis des milliers d'années, mais de récentes études et recherches ont été de nouveau entreprises sur ces terres fibrées [18,21–40]. Différentes compositions sont proposées par les chercheurs, chacun d'entre eux adapte un type de fibre, un type de sol et fait varier les quantités mises en œuvre afin de comprendre l'effet des constituants sur les caractéristiques d'un matériau biosourcé telles que la conductivité thermique ou le comportement hygroscopique.

Les résultats relatifs à la conductivité thermique des différents matériaux à base de terre montrent leur capacité isolante. Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau résiste au transfert de la chaleur donc plus il est isolant. Sur la base de résultats observés à partir de différents essais réalisés [21–40], les mélanges terre-paille peuvent logiquement être utilisés dans l'enveloppe d'un bâtiment pour assurer un niveau d'isolation et d'inertie thermique relativement élevé, mais aussi pour atténuer les fluctuations de l'humidité de la pièce par rapport aux méthodes de construction conventionnelles.

Le type de fibre n'est pas le seul facteur qui peut affecter les mélanges terre-paille. Des études ont été menées à ce sujet afin de déterminer la nature des composants des mélanges la plus appropriée pour l'utilisation prévue [26,34,35]. Différents sols de nature différente (argileuse, limoneuse, sableuse etc.) ont été examinés avec différents types de fibres (paille de blé, paille de lin, chènevotte, roseau, fibres de chanvre, fibres de lin) afin de trouver la meilleure combinaison pour répondre aux exigences structurelles et/ou d'isolation [26,29]. En conclusion de ces études, des formulations optimales, précisant la nature de la terre et de la fibre ainsi que leur dosage, pour des usages structurels et isolants sont proposées [26].

Dans ce qui précède [26], une différence de résultats pour la bauge a été observée entre deux travaux de laboratoire différents avec les mêmes formulations. Cette différence est en partie attribuée à l'effet de la procédure de mise en œuvre et du conditionnement des échantillons dans les laboratoires. La réponse à cette observation est apportée par les travaux de Colinart et al. (2020) [33] dont l'objet était axé sur les propriétés hygrothermiques des matériaux de construction en terre allégée constitués de chènevotte de chanvre et de terre crue. Des expériences ont été menées avec 3 types de chènevotte et 6 terres crues (argileuse, limoneuse et sableuse) et sur 15 mélanges en vue d'évaluer la variabilité des matériaux sur les performances hygrothermiques. En outre, l'attention a été également portée sur les protocoles et les méthodes de confection, sur la répétabilité des mesures et sur l'influence de la température et de l'humidité relative de conditionnement. Comme attendu, les différentes méthodes de caractérisation conduisent à des résultats différents. Notamment les protocoles de conditionnement initiaux ne sont pas strictement identiques *i.e. le séchage à 40°C, à 70°C ou à 105°C*. De ces travaux, aucune conclusion ne peut être tirée quant à la meilleure méthode à retenir.

La qualité de l'air intérieur, comme la pollution de l'air, sont influencées par le taux d'humidité relative (HR) de l'air dans un bâtiment. L'humidité relative dans les espaces clos peut avoir un impact important sur la santé des occupants [41]. Les micro-organismes recherchent des niveaux d'humidité relative élevés pour proliférer, et l'émission de composés organiques volatils provenant des matériaux augmente dans ces conditions [42]. À l'inverse, une humidité relative sèche sur une période prolongée peut nuire aux muqueuses et accroître les risques d'être soumis à des infections virales [43]. Il y a maintenant un accord sur le fait qu'une humidité relative entre 40 et 60 % est l'intervalle optimal pour une meilleure qualité de l'air intérieur. La Figure 2 montre les multiples risques de chaque zone d'humidité relative [41].

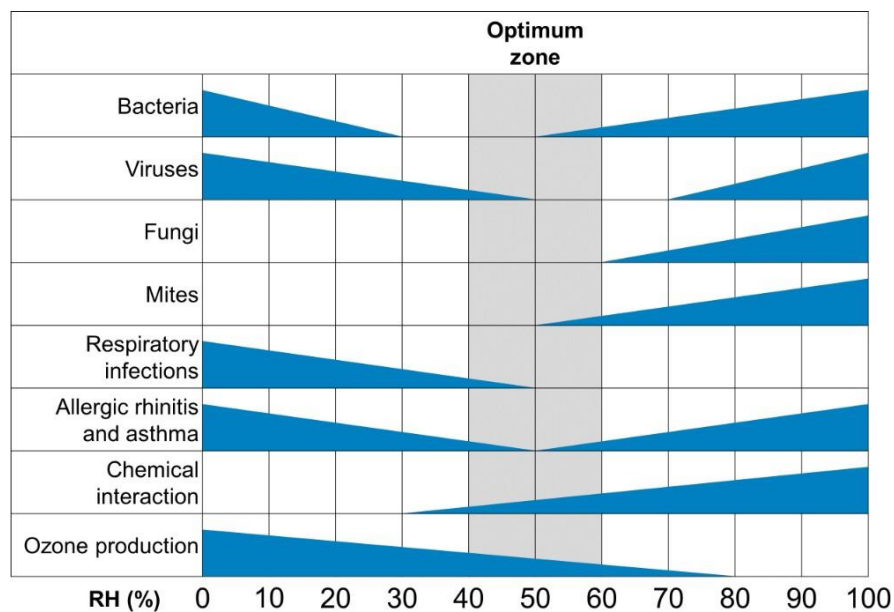


Figure 2: Plages d'humidité relative optimales pour minimiser ses effets nocifs sur la santé [41].

Dès qu'un sol approprié était disponible, les habitants développaient des pratiques locales de construction en terre. Cela a donné naissance à différentes techniques de construction, telles que le pisé, l'adobe, les blocs de terre comprimée, la bauge, la terre allégée.

1.2.1. Pisé

Le pisé est une technique de construction qui existe depuis des milliers d'années. Sa première utilisation documentée remonte aux Romains, qui l'ont ensuite introduite en France et en Angleterre. Les murs pisés sont construits par compactage (battage) du sol humide placé entre des panneaux de coffrages temporaires. Il est compacté à l'aide d'une pilonneuse pour acquérir sa résistance mécanique. Une fois séché, il en résulte un mur monolithique dense et dur, voir Figure 3. La pratique de cette technique ancestrale s'adapte à toutes les formes architecturales, qu'elles soient modernes ou traditionnelles.

C'est un matériau à base de terre, cependant certains sols ne s'y prêtent pas. Le pisé, pour offrir une bonne résistance mécanique, impose des granulats de différentes tailles selon des proportions bien définies. Le choix de la terre est celui d'un sol faiblement argileux, pour éviter la fissuration, et cette terre est dépourvue de fibres.



Figure 3: Démarche de construction en pisé [44].

Ces dernières années, le pisé est devenu populaire auprès des architectes soucieux de l'environnement et de ceux qui recherchent un élément d'exotisme. D'autant plus que ce matériau de construction est considéré comme un matériau vernaculaire écologique.

1.2.2. Adobe

La construction en adobe est une technique ancienne répandue dans les Amériques et au Moyen-Orient. Les plus anciennes structures sur terre, datant d'au moins 8300 avant J.-C., sont en adobe, de même que certains bâtiments vieux d'environ 900 ans, qui sont toujours utilisés. "Adobe" est le nom espagnol dérivé de l'arabe plus ancien "al-tob", datant de l'occupation mauresque de l'Espagne.

Aujourd'hui, la construction en briques d'adobe s'est partiellement adaptée aux changements économiques, sociaux et techniques. Cette technique a fait l'objet de nombreuses recherches, ce qui a permis d'appliquer des solutions d'ingénierie rationnelles aux structures en briques d'adobe. Depuis 1998, cette technique est prise en compte dans les normes de construction en terre de la Nouvelle-Zélande.

Dans les pays où la demande est importante, les briques d'adobe sont produites mécaniquement dans des briqueteries commerciales où il est possible de louer une machine à fabriquer des briques pour faire des briques d'adobe sur place. En Nouvelle-Zélande, il n'était pas possible d'acheter des briques d'adobe fabriquées commercialement jusqu'à la création d'un chantier de fabrication de briques d'adobe à Nelson en 1992.

Contrairement au pisé, l'adobe est une brique de terre crue moulée sans compactage, puis mise à sécher à l'air libre pendant plusieurs semaines, voir Figure 4. La terre utilisée ne doit être ni trop argileuse, ni trop sableuse au risque de fissures et pour garantir sa cohésion. Il est possible d'ajouter des fibres végétales à la terre pour la rendre plus résistante aux fissures. Utilisées en grande quantité, ces fibres améliorent également le comportement isolant des briques (Adobe léger). L'adobe est employé pour la réalisation de murs porteurs, tout comme pour la réalisation de murs de refend ou de cloisons.

En effet, cette technique de construction présente un très bon bilan environnemental puisqu'elle ne nécessite pas ou peu de transformation ou de transport. Sa durabilité est élevée et son recyclage est facile. De plus, un tel matériau contribue à un environnement sain grâce à sa capacité à réguler l'humidité ainsi que la température de l'habitat.



Figure 4: Démarche de fabrication des briques adobe [44].

1.2.3. Blocs de terre comprimée

Dans l'histoire des techniques de construction en terre, les blocs de terre comprimés sont une nouveauté, voir Figure 5. Cette technique a été développée dans les années 50 dans le cadre d'un programme de recherche sur l'habitat rural en Colombie [45]. Le bloc de terre comprimé est le produit moderne du bloc de terre moulé, connu plus communément sous le nom de bloc d'adobe. Plutôt que d'être moulés dans un cadre en bois, les blocs sont formés en tassant de la terre, légèrement humidifiée, à l'aide d'une presse en acier. Autrefois, la terre était comprimée dans les moules à l'aide d'un petit pilon, ou en tassant fortement avec une masse très lourde appliquée sur le moule. Actuellement, une variété de presses est utilisée.

Le bloc de terre comprimé peut éventuellement être stabilisé. A ce titre, il convient de parler de blocs de terre stabilisés avec du ciment permettant de construire des murs résistants. Il faut également mentionner que les présents règlements concernant les blocs de terre encouragent la stabilisation au ciment et recommandent l'utilisation d'un revêtement protecteur pour accroître la durabilité des parois en terre.

Comparé au bloc moulé à la main, un bloc de terre comprimé est très régulier en taille, en forme et bien plus dense. Il résiste mieux aux contraintes de compression et à l'eau. De plus, cette technique est basée sur des matériaux qui apportent une masse thermique et régulent l'humidité.



Figure 5: Des briques de terre comprimées [44].

1.2.4. Bauge

La construction en bauge fait son apparition vers la fin du XVI^e siècle, par exemple dans le bassin rennais. Pour preuve, le bâtiment le plus ancien connu est situé à Conteville-en-Ternois (Pas-de-Calais) et remonte au XVI^e siècle. Cette ancienne technique est présente en Picardie, Normandie, Beauce, Bretagne, Poitou, Vendée, Sologne, Auvergne et Camargue. Elle a également été retrouvée en Belgique, dans le Hainaut, et dans l'ouest de l'Angleterre, dans le Devon.

La technique de la construction en bauge consiste à bâtir des murs massifs, souvent porteurs, par un mélange de terre, d'eau et de fibres réalisé par empilement de mottes à l'état plastique sans l'aide de coffrage, voir Figure 6. La différence avec le pisé est que les outils se limitent à la fourche et à la bêche. Les parois sont construites par une succession de couches de terre appelées "levées" dont la hauteur est généralement d'une soixantaine de centimètres. En principe, la levée encore meuble est assemblée à la main avec une fourche et compactée avec un bâton ou le pied. La technique de la bauge permet donc de faire un ouvrage très résistant et plastique mais nécessitant des temps de mise en œuvre importants.

La terre est généralement extraite sur le site de la construction au-dessous de la couche de terre végétale. Cette terre est modérément argileuse afin qu'elle ait une bonne cohésion, mais sans excès pour qu'elle ne se fissure pas.

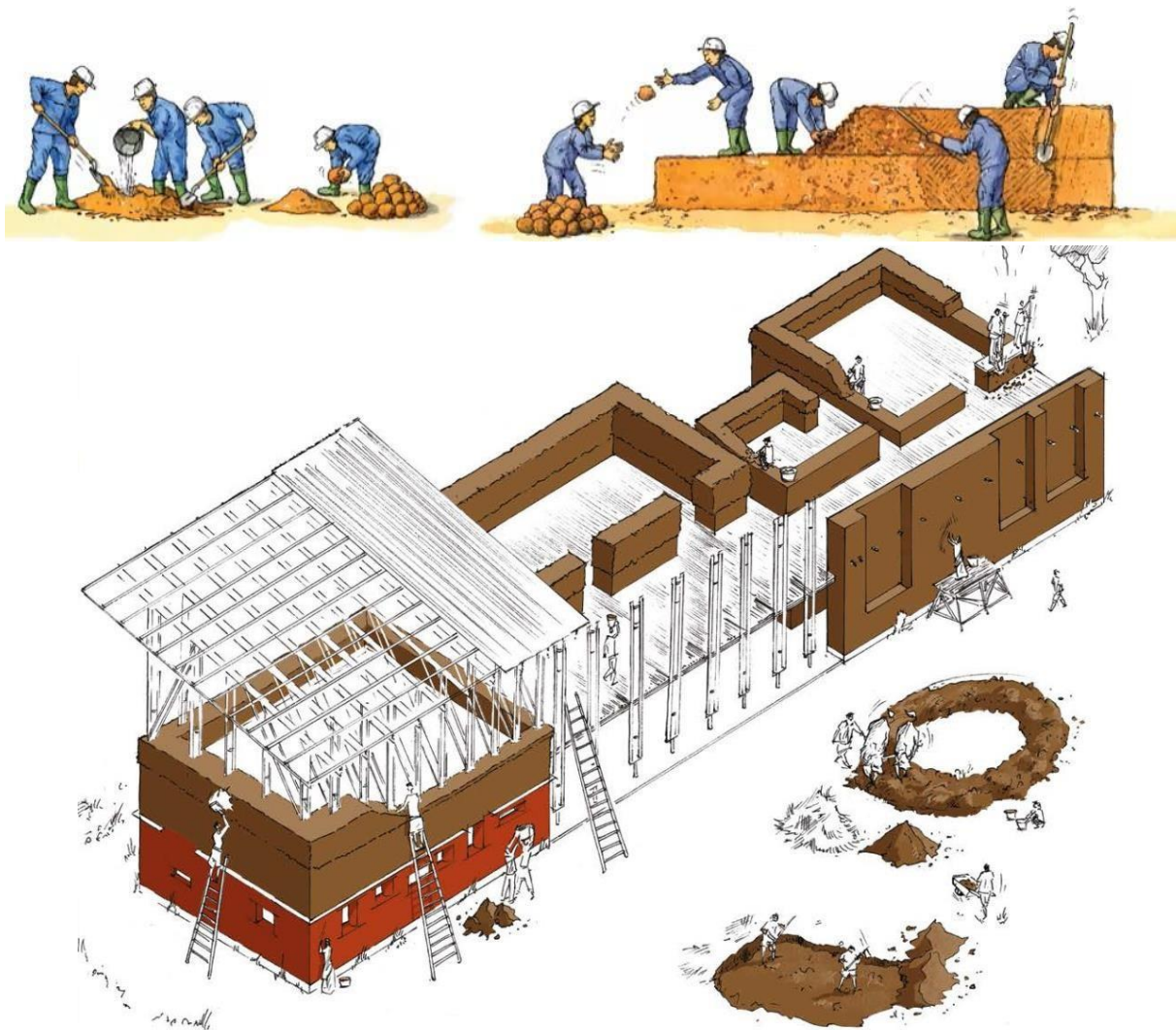


Figure 6: La construction en bauge [44,46].

La principale qualité mécanique d'un mur en bauge est sa résistance à la compression [29]. Cependant, la bauge présente une faible résistance à la traction ainsi qu'une bonne ductilité due à la présence de fibres. Les propriétés mécaniques d'un mur en bauge sont variables et dépendent :

- du type de terre et de fibres utilisés,
- de la teneur en fibres qui contrôle ainsi la masse volumique du mélange,
- de la qualité de la mise en œuvre,
- de la teneur en eau.

Ces paramètres n'influent pas seulement sur la résistance mécanique mais aussi sur le comportement hygrothermique de la bauge. En effet, la baisse de la densité du fait de l'ajout de fibres réduit la résistance à la compression mais améliore la conductivité et le comportement hygroscopique de la bauge. Dans le tableau suivant, les propriétés mécano-hydro-thermiques sont présentées.

Tableau 1: Caractéristiques mécano-hygro-thermiques de la bauge [47].

Propriété	Valeurs moyennes min.	Valeurs moyennes max.	Unité
Résistance mécanique	0,6	1,5	MPa
Masse volumique sèche	1400	1800	kg.m ⁻³
Conductivité thermique	0,4	0,6	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Chaleur spécifique	1000	1500	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Résistance à la vapeur d'eau	4	10	-
Coefficient d'absorption d'eau	6	13	kg.m ⁻² .h ^{0.5}

1.2.5. Terre allégée

La terre allégée est une technique de construction conçue en Allemagne après la première guerre mondiale en se basant sur les procédés techniques du pisé et du torchis. Elle constitue une technique d'isolation thermique et phonique sans capacité de portance. Sa diffusion s'est faite dans les pays européens et aux Etats-Unis dans les années 80 en raison de sa conformité aux exigences de performance thermique du bâtiment. De nombreuses variantes de mélanges de terre et de granulats végétaux ou minéraux en résultent.

Le terme " terre allégée " fait référence à tout procédé de coffrage non porteur comprenant une matrice argileuse enrobée de granulats végétaux ou minéraux, dont la masse volumique sèche se situe généralement entre 200 et 1200 kg/m³, voir Figure 7.

La terre est étalée dans l'eau jusqu'à l'obtention d'un état liquide épais et homogène : la barbotine, qui est mélangée à de la paille. Le matériau de construction obtenu garde son apparence de paille. Il est mis en place à l'aide d'un coffrage pour réaliser un ensemble homogène.

En fonction de la masse volumique du mélange sec et des caractéristiques de la matière première, ce matériau offre une large gamme de propriétés physiques : isolation thermique, inertie thermique et hygrométrique, isolation acoustique, adsorption et désorption alternées, etc.

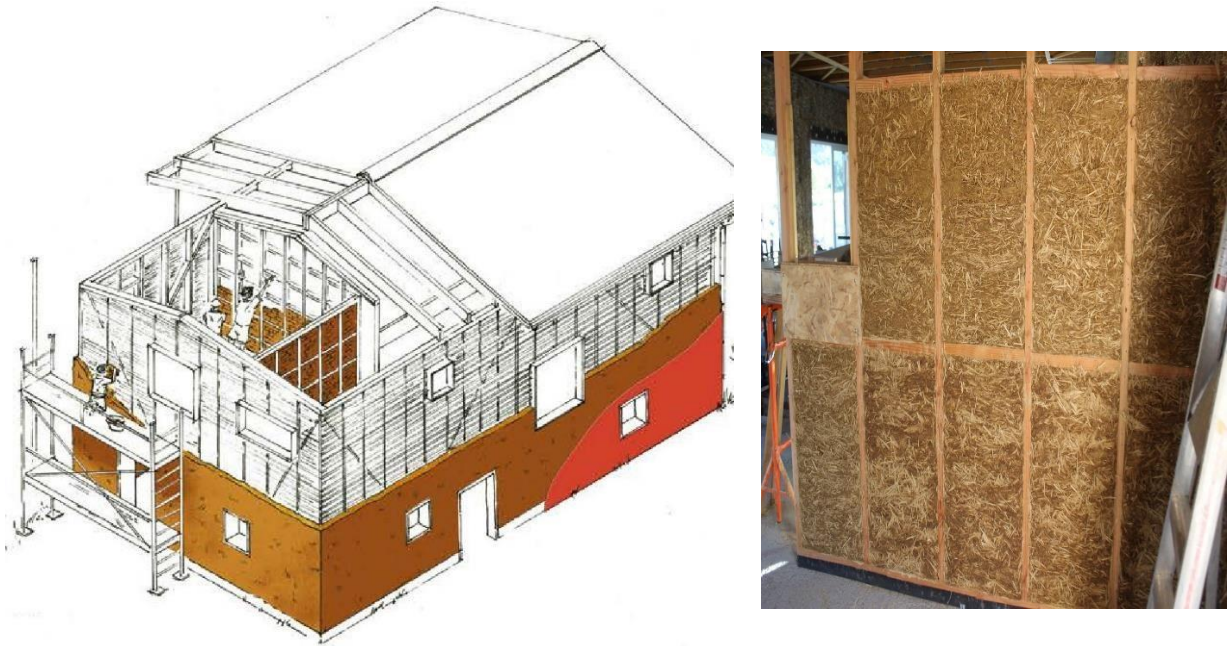


Figure 7: Un exemple de bâtiment construit avec de la terre allégée [46,48].

Dans le Tableau 2, les propriétés physico-mécaniques (masse volumique, résistance à la compression) et hygrothermiques (sorption, perméabilité à la vapeur d'eau, conductivité thermique, chaleur spécifique) de quelques matériaux à base de terre sont indiquées. Il convient de noter que les propriétés signalées ont été obtenues dans des conditions expérimentales (température et humidité relative) parfois différentes mais la comparaison reste valable.

Tableau 2: Propriétés mécaniques et hygrothermiques de différents matériaux à base de terre.

Matériaux	Mélanges	Masse volumique [kg/m ³]	Résistance à la compression [MPa]	Sorption max [%wt]	μ (coupelle sèche) [-]	Cp [J/(kg.K)]	λ [W/(m.K)]	Référence
Terre allégée	- Terre - Paille	241 - 531	-	12 HR=90 %	4,8	-	0,071 - 0,120 25 °C	[30]
	- Terre - Typha Australis (20, 33 %)	323 - 586	-	12,9 HR=97 %	3,748 - 7,057	-	0,065 - 0,112 23 °C	[31]
	- Terre - Chènevotte (34 - 67 %)	200 - 350	-	5,3 - 7,56 HR=80 %	2,24 - 4,14	965 - 1105	0,06 - 0,12 23 °C	[33]
	- Terre - Paille de roseau (36 %)	420 - 565	0,03 - 0,12	-	-	-	0,132 - 0,146	[49]
	- Terre - Paille de roseau (25 %) - Laminaria digitata	643 - 697	0,079 - 0,245	8 - 12 HR = 90 %	-	600 - 800 20 °C	0,117 - 0,157 20 °C	[50]
	Bauge	- Terre - Paille de lin (0 - 3%)	1462 - 2011	1 - 3,0	2,8 - 4,1 HR=90 %	7 - 9,98	-	0,616 - 1,933
- Bauge		1475	1,59	-	-	-	-	[51]
- Terre - Paille de lin (2,1 - 2,3 %)		1691-1789	0,96 - 1,35	-	-	-	0,610-0,650	[52]
Pisé	- Pisé	2190	3,73	-	-	-	-	[51]
Brique de terre	- Briques de terre crue	1761 - 1797	-	5,3 HR=95 %	-	817,6 40 °C	0,77 - 0,95	[53]
	- Brique de terre extrudée	1940 - 2070	-	4 - 6 HR=97 %	7 - 9,0	900 - 960	0,47 - 0,59 25 °C	[32]

Note : μ = coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau, Cp = chaleur spécifique, λ = conductivité thermique, HR= humidité relative.

1.3. Stockage de l'énergie thermique

Le stockage d'énergie reste un défi majeur du XXI^e siècle [54–57]. Il s'agit du troisième des cinq piliers de la troisième révolution industrielle, selon Jeremy [57]. Par ailleurs, le développement du stockage d'énergie sous sa forme « thermique » apparaît comme un instrument pouvant contribuer à la compétitivité de nombreux domaines et technologies. Le stockage de l'énergie thermique a connu son premier apogée dans les années 1980 après le premier choc pétrolier en 1973. Après cet enthousiasme initial et lorsque le pétrole est redevenu bon marché, l'intérêt pour le stockage de l'énergie thermique a diminué. Cependant, le nombre d'ouvrages publiés dans ce domaine d'études a augmenté de façon exponentielle depuis le début du millénaire.

Les systèmes de stockage de l'énergie thermique s'avèrent de plus en plus attractifs et sont reconnus par plusieurs agences nationales et internationales comme un moyen efficace permettant de réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre 'CO₂'. De plus, les systèmes de stockage thermique présentent un potentiel élevé dans les secteurs de l'énergie. En effet, ils permettent de déplacer la demande de charge de pointe vers les périodes creuses ce qui permet de combler l'écart entre l'offre et la demande d'énergie et aussi de réduire la charge sur les réseaux énergétiques.

Le concept même du stockage de la chaleur est de collecter la chaleur lorsqu'elle est disponible, que ce soit en été et/ou pendant la journée, et de la réutiliser lorsque c'est nécessaire, c'est-à-dire en hiver et/ou en soirée. Ainsi, la chaleur des capteurs solaires et la chaleur résiduelle des installations de climatisation peuvent être collectées pendant la saison chaude et utilisées pour le chauffage quand il devient indispensable, y compris pendant les mois d'hiver. Il est également possible de stocker la chaleur excédentaire générée par certaines industries.

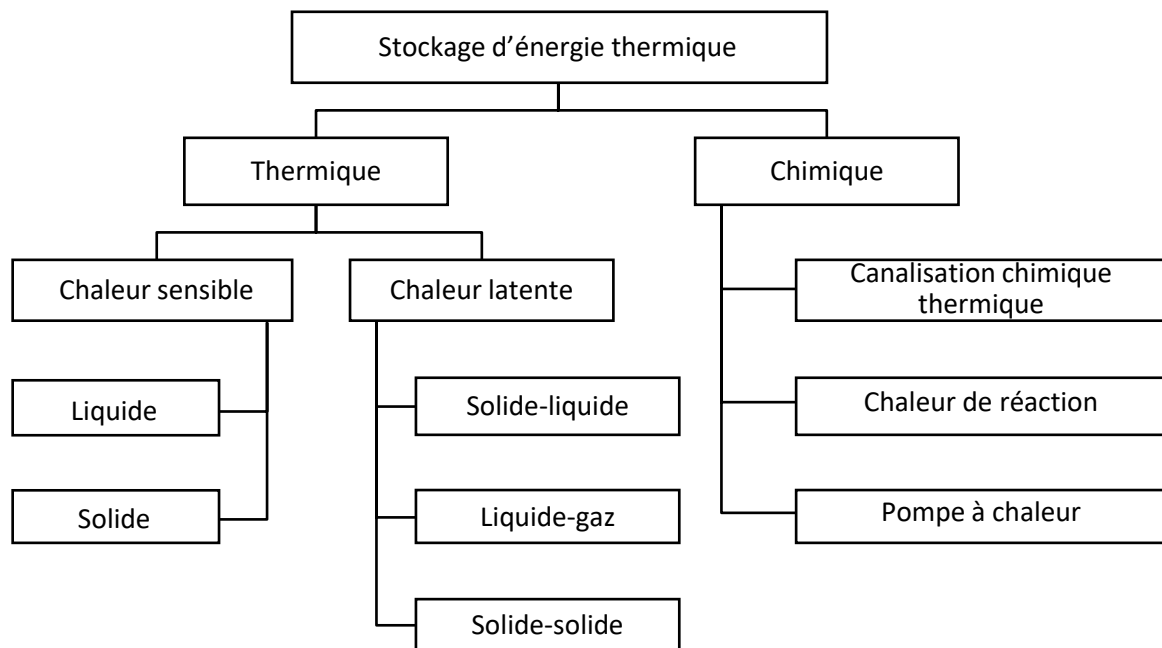


Figure 8: Différentes techniques de stockage thermique.

Tout matériau ayant la capacité de libérer ou de stocker de la chaleur par transfert de chaleur donne lieu à différentes techniques de stockage, à savoir (Figure 8) :

- Par chaleur sensible :

C'est-à-dire en modifiant la température du matériau ; la chaleur est alors stockée dans le matériau. Le stockage sensible est principalement destiné au stockage saisonnier dans des réservoirs (aquifères naturels, roches, etc.), voir Figure 9.

Cette méthode de stockage est connue pour être le plus ancien moyen utilisé pour stocker de l'énergie pendant des périodes plus ou moins longues. Elle consiste à utiliser une source de chaleur pour élever la température d'un matériau sans en modifier le comportement. Pour être précis, elle consiste à préchauffer un corps à une température élevée et de le mettre ensuite en contact avec le système d'exploitation à une température plus basse. La capacité de stockage est en relation directe avec les différentes propriétés thermo-physiques, c'est-à-dire la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la densité des matériaux utilisés. L'énergie massique stockée est généralement faible en raison de la faiblesse de la capacité de stockage, ce qui implique des volumes de stockage importants.

L'utilisation la plus fréquente de la chaleur sensible est le stockage thermique saisonnier par des procédés à grande échelle que sont les structures géologiques tels que le stockage souterrain d'eau chaude, le stockage dans des aquifères souterrains, le stockage souterrain dans un système composé de "gravier/eau" et le stockage dans des puits souterrains [58].

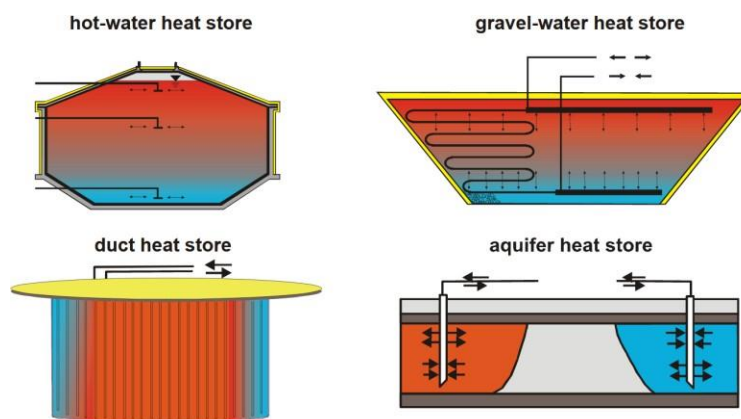


Figure 9: Différentes techniques de stockage de chaleur sensible [59].

L'énergie stockée par la chaleur sensible est parfois sujette à d'importantes pertes de chaleur en raison d'un mauvais emplacement, d'une mauvaise isolation et de la longue durée de vie des systèmes de stockage. Ce type de stockage nécessite également de très grands systèmes. Il est donc nécessaire de choisir le bon système et sa taille afin d'augmenter leurs performances [60–62].

- Par chaleur latente :

Par définition, la chaleur latente est l'énergie associée à un changement d'état. L'énergie massique stockée par le matériau est l'enthalpie massique du changement d'état [63].

La technique de stockage par chaleur latente consiste à faire varier la température et/ou la pression du milieu, et la matière peut passer d'un état à un autre. La matière peut exister sous différentes formes : solide, liquide ou gazeuse. Cette variation de température et/ou de pression entraîne une fusion, une vaporisation ou une sublimation de la matière. La transition la plus fréquemment utilisée est le changement de phase solide-liquide avec un faible changement de volume. Ce dernier permet de stocker une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur latente avec de faibles variations de température. Le stockage de la chaleur latente consiste ainsi à exploiter la quantité d'énergie impliquée

dans le changement d'état d'un corps (Figure 10). Ce changement d'état se produit à température constante, il permet donc de stabiliser la température pour un certain temps à une température constante [64].

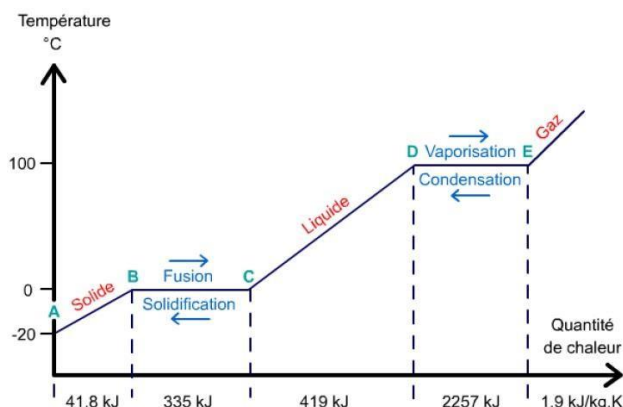


Figure 10: Comportement de l'eau à la température en termes de chaleur [64].

- Par voie thermochimique (ou sorption) :

Le stockage thermochimique entraîne des réactions réversibles, endothermiques dans un sens et exothermiques dans l'autre. Les systèmes de stockage thermochimiques ont une densité d'énergie 5 à 20 fois plus élevée que le stockage sensible [65]. Il peut s'agir de manifestations physiques ou chimiques, décrites dans l'équation (1) :



Au cours du processus de stockage, la phase de charge correspond à une réaction de décomposition endothermique d'un produit chimique A en deux éléments B et C. L'énergie thermique Q permet à cette réaction de se produire. Ces deux composants (ou plus selon les réactions mises en place) sont alors stockés séparément sans perte de chaleur et la chaleur est libérée lorsqu'ils sont réunis à nouveau par reconstitution du produit d'origine. Il peut s'agir d'une réaction de physico-sorption ou de chimio-sorption, mais dans tous les cas, la chaleur dégagée provient de la rupture des liens entre les différents composants. En thermochimie, l'énergie n'est donc pas stockée sous forme de chaleur à proprement dit mais plutôt sous forme de potentiel chimique.

Le Tableau 3 énumère les principales caractéristiques des trois systèmes de stockage d'énergie thermique :

Tableau 3: Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur [66].

	Chaleur sensible	Chaleur latente	Voie thermochimique
Densité énergétique massique	Faible 0,02 - 0,03 kWh.kg ⁻¹	Moyenne 0,05-0,1 kWh.kg ⁻¹	Haute 0,5-1 kWh.kg ⁻¹
Température de stockage	Température de l'étape de charge	Température de fusion/solidification	Température de l'étape de charge ou température ambiante
Durée de stockage	Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes thermiques)	Théoriquement illimitée
Technologie	Simple	Moyenne	Complexe

1.4. Matériaux à changement de phase

Aujourd'hui, les bénéfices du stockage thermique dans l'enveloppe de bâtiments peuvent être obtenus en adoptant des produits de construction avancés à base de nouveaux matériaux intelligents tels que les matériaux à changement de phase (MCP en français ou PCM : Phase Change Material en anglais). Ces matériaux sont capables d'accumuler la chaleur externe et de la libérer par le phénomène de transition de phase tout en maintenant une température interne constante (stockage de la chaleur latente). Grâce aux PCM, la capacité d'atténuer et de modifier la durée des fluctuations de la température de l'air dans une pièce d'un bâtiment devient principalement dépendante de la capacité du matériau à accumuler la chaleur externe sous forme de chaleur latente pour subir une transition de phase, (Figure 11).

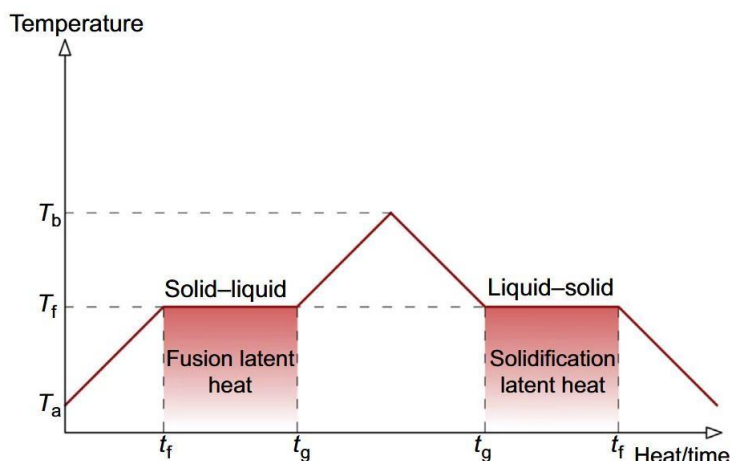


Figure 11: Diagramme de transition de phase [67].

Pendant la journée, lorsque la température de l'air dépasse une certaine valeur (température dite de fonctionnement à laquelle le PCM commence à changer de phase), l'excès de chaleur utilisé par le PCM pour descendre en dessous de la transition de phase (par exemple du solide au liquide), est retiré de l'environnement. La nuit, lorsque la température descend en dessous du point de consigne, le PCM restitue la chaleur accumulée dans l'environnement pendant la transition de phase inverse (liquide-solide). De cette façon, il est possible d'amortir les fluctuations de température d'un environnement intérieur et de maintenir un état de confort. Il est évident pour que les PCM remplissent leur fonction, la température diurne doit dépasser le point de fusion pour permettre la transition de phase puis redescendre en deçà de ce point de fusion pour recommencer un nouveau cycle le lendemain.

Selon le type de matériau utilisé pour le stockage de chaleur latente, les PCM sont divisés en deux catégories principales : organique et inorganique (Figure 12). Pour la construction de bâtiments, les avantages et les inconvénients de chaque catégorie diffèrent du point de vue thermique, physique, chimique, environnemental et économique. Pour une utilisation efficace dans les bâtiments, les PCM doivent avoir des caractéristiques spécifiques (ou intrinsèques) comme avoir un point de fusion dans une plage de température particulière, une chaleur latente de fusion élevée par unité de masse, une capacité thermique spécifique élevée pour fournir un stockage de chaleur sensible supplémentaire, une bonne conductivité thermique, une congruence de fusion et un changement limité de la capacité volumétrique et de la pression de vapeur du matériau par rapport à la température de fonctionnement.

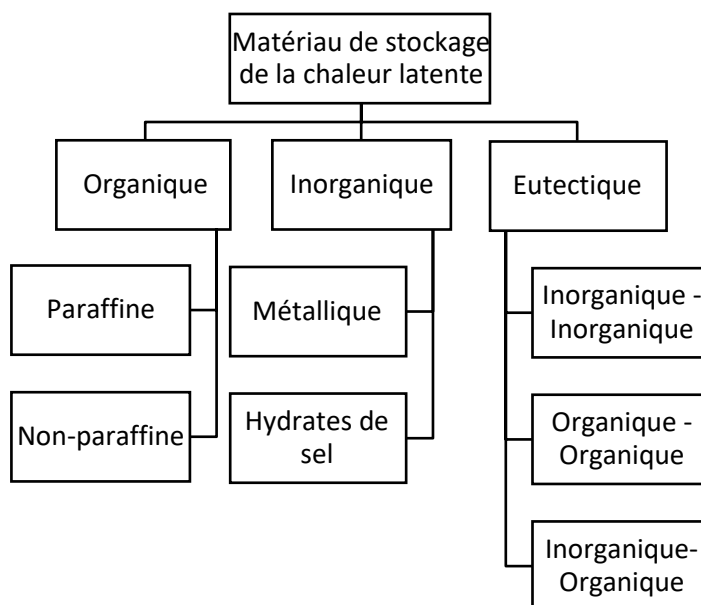


Figure 12: Différents types de matériaux PCM.

La plage de température de fusion des matériaux ou des substances inorganiques est de -100°C à $+1000^{\circ}\text{C}$. Les substances inorganiques les plus couramment utilisées sont l'eau (température de fusion de 0°C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0°C), les sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), les mélanges de sels, les mélanges de métaux (température de fusion supérieure à 150°C).

Les matières ou substances organiques ont une température ou une gamme de température plus basse et comprise entre 0°C et 150°C [68]. Les plus courantes sont principalement à base de paraffine, d'acides gras et d'alcools de sucre.

Chaque type de PCM présente des avantages et des inconvénients quant à leur utilisation comme le montre le Tableau 4 :

Tableau 4: Comparaison des matériaux organiques et inorganiques pour le stockage de la chaleur [68].

Organique	Inorganique
Avantages - Pas de produits corrosifs - Sous-refroidissement faible ou nul - Stabilité chimique et thermique	Avantages - Plus grande enthalpie de changement de phase - Sous-refroidissement*
Inconvénients - Enthalpie de changement de phase relativement faible - Faible conductivité thermique - Inflammabilité	Inconvénients - Sous-refroidissement - Corrosion - Séparation des phases - Ségrégation de phase, manque de stabilité thermique

Note : * L'utilisation contrôlée du sous-refroidissement permet d'obtenir des solutions de stockage partiellement sans perte de chaleur pour les systèmes solaires combinés.

Les PCM eutectiques sont des substances composées de plusieurs PCM purs, chacun d'eux fondant et gelant de manière cohérente en formant un mélange de cristaux du composant pendant la cristallisation. En général, ce sont des mélanges de PCM organiques et inorganiques. Ils présentent deux avantages majeurs, à savoir ils ont un point de fusion net similaire à celui d'une substance pure et leurs volumes de chaleur latente sont légèrement supérieurs à ceux des composés organiques purs.

Quant à leurs désavantages, peu de données sont disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et leur faible utilisation dans les systèmes industriels [69].

1.4.1. Application et produit de construction

Initialement l'application expérimentale s'est concentrée sur l'intégration de PCM dans les éléments de construction par incorporation directe ou immersion. La méthode la plus simple et la plus économique est l'incorporation directe. Les PCM liquides ou en poudre ont été ajoutés directement aux mélanges de matériaux de construction sans avoir besoin d'équipement supplémentaire. Cependant, la commodité de la procédure a été affectée par des problèmes de fonte du PCM, son infiltration dans le matériau et les interactions chimiques indésirables associées, entraînant une corrosion et une détérioration au fil du temps.

Le processus d'immersion consiste à immerger des éléments de construction poreux comme les plaques de plâtre, les briques ou les blocs de béton dans du PCM fondu qui sera absorbé par capillarité [70]. De même, les problèmes d'infiltration à long terme et d'incompatibilité avec les matériaux de construction sont apparus.

Aujourd'hui, la méthode la plus répandue et la plus efficace est l'encapsulation des PCM (Figure 13). Elle consiste à insérer le PCM dans des emballages scellés spécifiques pour contenir des matériaux liquides et solides afin d'empêcher les changements de sa composition chimique, éviter les interactions avec l'environnement, augmenter la compatibilité avec les matériaux environnants, améliorer la manipulation et réduire les éventuelles variations de volume extérieur. Deux types d'encapsulation sont connus : la macro-encapsulation et la micro-encapsulation. Les méthodes d'encapsulation ont une grande influence sur le coût final des produits PCM.



Figure 13: Micro [71] et macro [72] capsules de PCM.

Les PCM microencapsulés ont montré de nets avantages par rapport aux PCM en vrac. Tout d'abord ils empêchent les fuites pendant le changement de phase solide-liquide et fournissent également une plus grande zone de transfert de chaleur par volume unitaire [73].

Au cours des dernières années, les bâtiments résidentiels et de service, nouveaux et existants ont fait l'objet de nombreux tests expérimentaux de systèmes et produits PCM innovants. Les opportunités offertes par la micro-encapsulation des PCM ont facilité l'intégration du stockage thermique latent dans les bâtiments. Les produits PCM peuvent être utilisés de différentes manières, soit intégrés dans les matériaux de construction ou soit disposés comme éléments de construction supplémentaires dans les murs, les plafonds, les planchers, les vitrages et les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation.

En particulier, les PCM sont intégrés dans les matériaux de construction dès leur fabrication, y compris les bétons et plâtres prêts à l'emploi, les plaques de plâtre et les panneaux composites, les carreaux de plafond et de sol, les matériaux d'isolation micro ou macro encapsulés, les briques de

béton, le béton de construction, les fenêtres et les briques de verre. L'utilisation des PCM dans les bâtiments est envisageable et souhaitée dans les nouvelles constructions et les interventions de rénovation pour améliorer la performance énergétique et le confort intérieur.

1.5. Introduction des PCM dans les matrices cimentaires

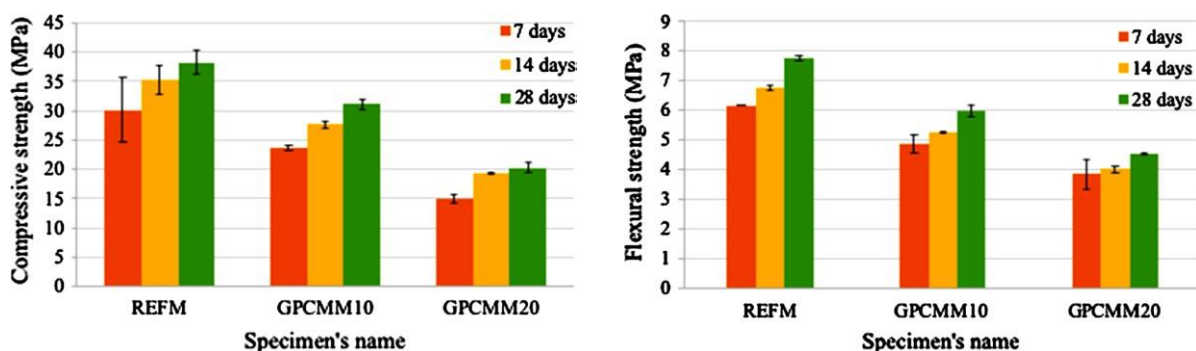
L'utilisation de matériaux à changement de phase (PCM) pour améliorer les performances thermiques du béton grâce à un stockage et une transmission efficace de l'énergie a pris de l'ampleur au cours des dernières années.

L'utilisation de PCM dans le bâtiment, son incorporation dans les matrices cimentaires et leur influence sur les propriétés de ces matrices à l'état frais et durci ont été examinées dans plusieurs travaux [70,74–79]. Notamment la stabilité des PCM, les limites de leur utilisation dans les matrices cimentaires, ainsi que leur performance thermique ont été investiguées. Ces études résument ainsi différents résultats issus de travaux de recherche qui détaillent les différents types de PCM et différents moyens d'incorporation dans la matrice cimentaire. Des études expérimentales, les résultats majeurs sur la caractérisation des mélanges à l'état frais et à l'état durci (caractéristiques physiques et mécaniques) sont présentés et discutés en relation avec la technique de malaxage et d'incorporation et le jeune âge du béton (comportement). Des études de durabilité des PCM incorporés dans une matrice cimentaire comme la stabilité dans un milieu alcalin, l'effet du gel/dégel et la résistance au feu viennent compléter ces résultats. L'effet thermique de l'incorporation des PCM dans le béton est aussi abordé.

1.5.1. Effet de l'incorporation de PCM sur le comportement physico-mécanique et au jeune âge des matrices cimentaires

La résistance mécanique est la préoccupation première des matériaux cimentaires, quelle que soit la fonction souhaitée du matériau (structurale, isolante ou autre...). Quant à l'incorporation de PCM, de nombreux chercheurs reconnaissent que cet ajout dans les matériaux cimentaires entraîne une dégradation de leurs performances mécaniques qui peut atteindre parfois 50 %.[80–85]. Cependant, certaines études ont recherché la cause de la dégradation évidente des propriétés mécaniques qui se produit par l'introduction de PCM dans la matrice cimentaire.

Les résultats d'essais de compression réalisés montrent une diminution nette de la résistance mécanique des mortiers avec l'ajout de PCM. Cette diminution n'est pas proportionnelle au pourcentage des PCM ajoutés. Les résistances mécaniques de différentes matrices cimentaires, comme présenté à la Figure 14, à titre d'exemple montrent clairement une baisse de la résistance de ces matrices avec un ajout de PCM [85]. Comme mentionné ci-avant, cette diminution n'est pas proportionnelle au taux de PCM ajouté.



Note : REF M = Mortier de référence ; GPCMM10 = Mortier avec 10 % vol. de PCM « RT35HC » ; GPCMM20 = Mortier avec 20 % vol. de PCM « RT35HC ».

Figure 14: Exemple de résultats mécaniques (compression et flexion) en fonction de la teneur en PCM ajoutée dans une matrice cimentaire [85].

La dégradation des performances mécaniques des composites PCM-mortier peut être causée par les interactions phénoménologiques PCM-ciment. Ces interactions peuvent donc affecter les propriétés physiques (densité, porosité etc.) qui sont en relation évidente avec la résistance mécanique. L'utilisation de PCM nécessite un ajustement de la quantité d'eau ce qui se traduit par une augmentation de la porosité dans la matrice cimentaire. La porosité peut être encore affectée par d'autres phénomènes dont la nature végétale de la capsule du PCM, l'ajout des particules fines etc. Pour mieux comprendre l'évolution de la porosité avec l'incorporation de PCM, une corrélation a été établie par Dakhli et al. 2019 [82] entre ces deux paramètres (Figure 15), et puis avec la résistance mécanique par la suite. La porosité augmente avec l'augmentation du pourcentage de PCM ajouté avec une nette augmentation au-delà de 20% [82]. Cette augmentation coïncide avec la diminution des résistances mécaniques.

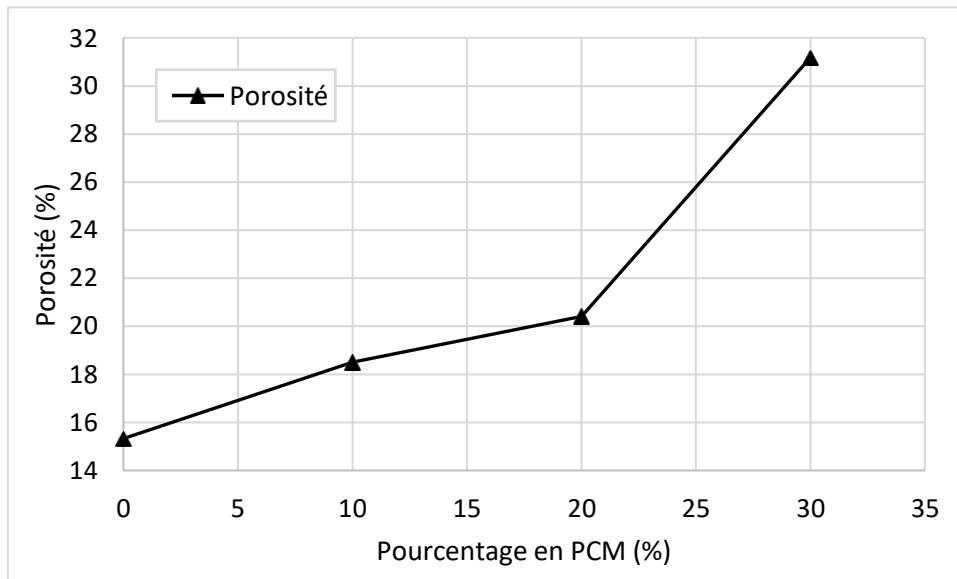


Figure 15: Relation porosité - ajout de PCM dans un mortier [82].

Pour confirmer ces propositions, des chercheurs se sont appuyés sur une ancienne étude qui liait la porosité à la perméabilité et à la résistance à la compression [86]. La perméabilité augmente avec la porosité alors que la résistance à la compression diminue avec ce dernier paramètre, voir Figure 16.

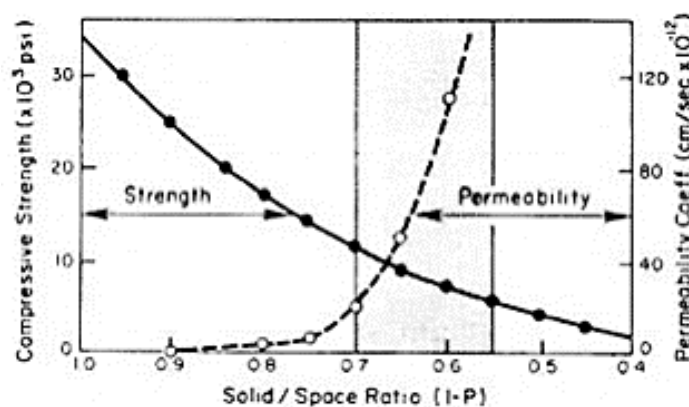


Figure 16: Relation entre résistance, perméabilité et porosité d'un béton [86].

La porosité n'est pas le seul facteur qui peut affecter la résistance mécanique. Cette résistance dépend aussi du comportement au jeune âge qui conduit à la formation du béton durci. La prise et le durcissement du béton sont le résultat d'un certain nombre de réactions chimiques qui s'accompagnent d'un fort dégagement de chaleur [87,88].

Pour mieux cerner l'effet de l'ajout de PCM sur la réaction d'hydratation et par la suite sur la prise et le durcissement d'un béton, la température et la chaleur d'hydratation de différentes formulations de mortier avec incorporation de PCM ont été suivies [84]. Ce suivi a été effectué par la méthode semi-adiabatique Langavant couramment utilisée et conforme à la norme NF EN 196-9 [89]. Les résultats montrent une diminution de la température du mortier au jeune âge et de la quantité de chaleur dégagée par ce mortier, comme montré à la Figure 17. Cette diminution est proportionnelle à la teneur en PCM ajoutée. Il en résulte une diminution du degré d'hydratation et un retard dans la prise du mortier. Cette diminution en degré d'hydratation est attribuée au fait que les particules de PCM recouvrent les grains de ciment et empêchent le passage de l'eau, stoppant ainsi leur participation au processus d'hydratation. Ceci est illustré sur la Figure 18 [83].

Par conséquent, outre la porosité, la perte de performances mécaniques est aussi liée à la diminution du degré d'hydratation relative à l'ajout de PCM dans la matrice cimentaire.

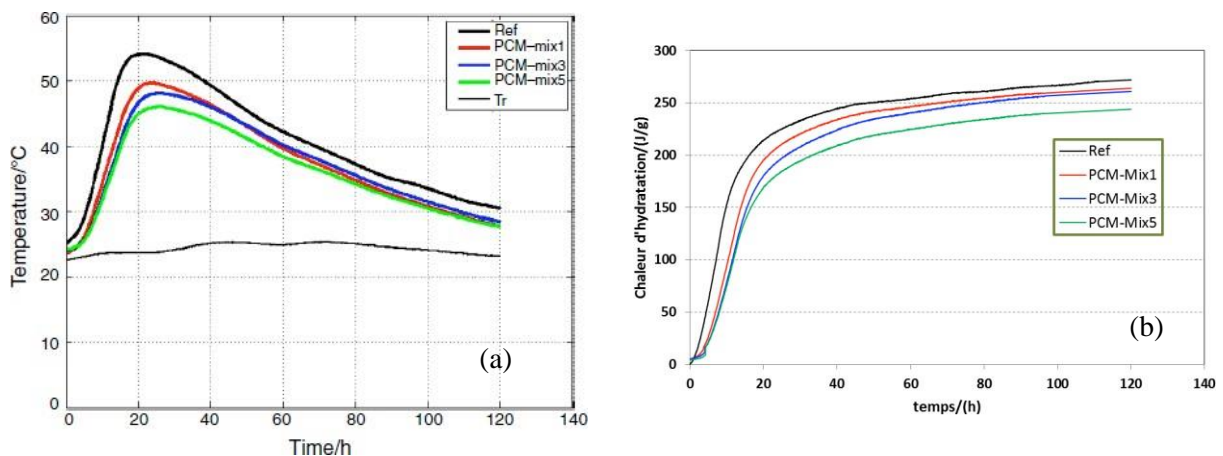


Figure 17: Température (a) et chaleur d'hydratation (b) observées sur des mortiers étudiés par Drissi et al (2014) [84].

Note : Ref = mortier de référence ; PCM-mix1 = mortier + 1 % PCM ; PCM-mix 3 = mortier + 3 % PCM ; PCM-mix 5 = mortier + 5 % PCM ; l'ajout est exprimé en pourcentage volumique ; PCM utilisé: Micronal® DS 5038 X. Tr = Température de la bouteille de Langavant de référence.

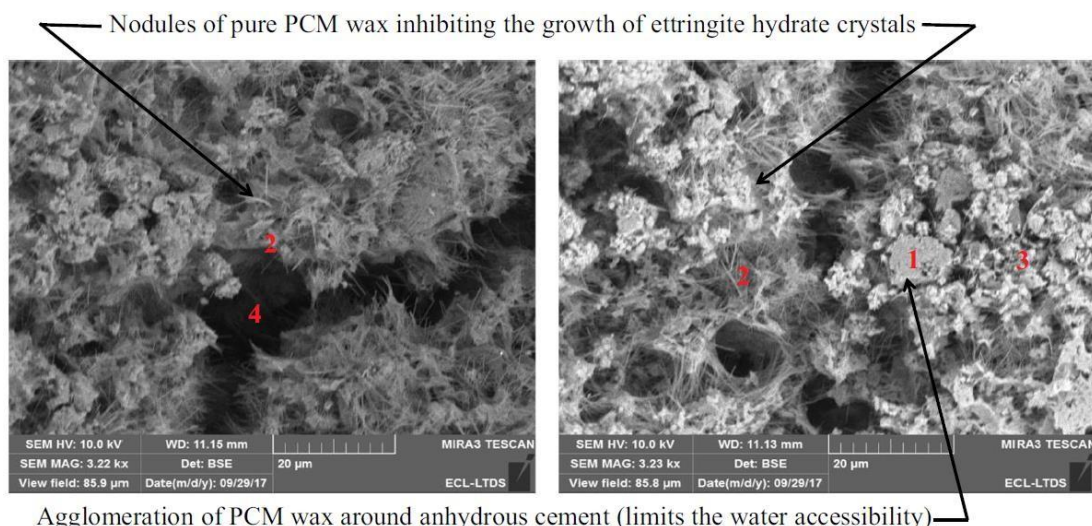


Figure 18: Images MEB d'un mortier + 10 wt% PCM (INERTEK 23) montrant l'effet du PCM sur l'hydratation [83]. Note : 1 = grain de ciment anhydre ; 2 = ettringite ; 3 = nodules de cire de PCM pure ; 4 = porosité induite.

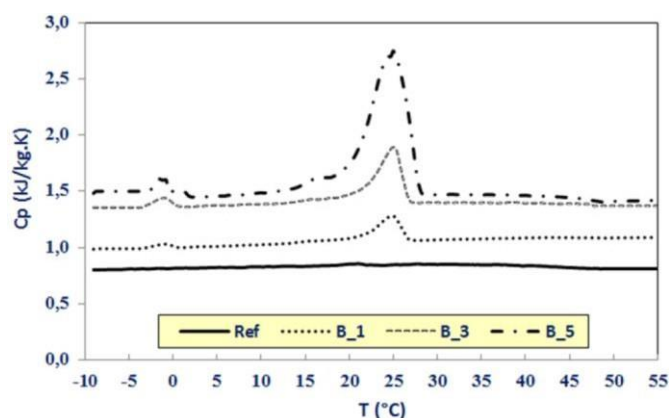
1.5.2. Effet thermique de l'ajout de PCM dans la matrice cimentaire

Les travaux cités dans la littérature permettent de conclure que l'ajout de PCM dans une matrice cimentaire entraîne une modification significative de ses propriétés non seulement mécaniques (état frais et durci) mais aussi thermiques.

1.6.2.1. Chaleur spécifique

En théorie, l'incorporation de matériaux à changement de phase (PCM) dans la matrice cimentaire apporte une chaleur latente en complément de sa propre chaleur sensible. Cet ajout accroît sa capacité de stockage de la chaleur et permet ainsi l'intégration de l'énergie dans la structure du bâtiment. Cette chaleur se répercute sur la capacité calorifique massique du matériau. Cette dernière est une caractéristique thermique et peut être mesurée par calorimétrie différentielle à balayage (en anglais, *Differential Scanning Calorimetry* ou DSC) en faisant varier la température à une vitesse donnée.

Plusieurs études ont été menées pour observer l'effet de l'ajout de PCM dans différents liants hydrauliques cimentaires, comme un mortier d'enduit, un béton structural etc. Un exemple pour un béton est illustré à la Figure 19, dans lequel du PCM microencapsulé a été incorporé à différents dosages, soit 1 %, 3 % et 5 % volumique [90]. L'évolution de la capacité calorifique massique des mélanges PCM-béton mesurée par DSC dans la plage de température -10°C à 55°C montrée sur cette Figure 19, est tout à fait typique et ce type d'évolution a été reproduit dans plusieurs études.



Note : Ref = béton de référence ; B_1 = Béton + 1 % PCM ; B_3 = Béton + 3 % PCM ; B_5 = Béton + 5 % PCM en pourcentage volumique ; PCM utilisé : Micronal® DS 5008 X

Figure 19: Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la température [90].

Deux pics sont identifiés sur cette Figure 19. Un faible premier pic peut être lié à la phase polymère de la capsule des PCM et un deuxième en relation avec le changement de phase en dégageant ou absorbant une grande partie de la chaleur. Le béton-PCM présente une même allure de courbes quel que soit le pourcentage de PCM ajouté. Ces résultats confirment bien l'hypothèse théorique que l'effet de l'ajout de PCM est d'augmenter l'inertie thermique du matériau en ajoutant de la chaleur latente à la paroi [91].

1.6.2.2. Conductivité thermique

Actuellement, plusieurs développements prometteurs sont en cours d'application dans le domaine du stockage thermique par usage de PCM dans les bâtiments. Des études détaillées sur l'intégration des PCM dans les matériaux de construction, l'intégration des PCM dans l'architecture des bâtiments pour le chauffage, le refroidissement des locaux et la combinaison du chauffage et du refroidissement, ont été réalisées. Il ressort clairement des études antérieures que les améliorations thermiques dans un bâtiment dues à l'incorporation de PCM dépendent de la température de fusion des PCM, du type de PCM, du climat, de la conception et du processus de construction du bâtiment [92]. L'optimisation de

ces paramètres est fondamentale pour démontrer les possibilités de succès du PCM dans les matériaux de construction.

Une étude a été menée pour étudier l'effet de l'ajout du PCM sur la matrice cimentaire, mais surtout pour optimiser le dosage de PCM le plus rentable. Ainsi, une série de formulations à base de ciment et de PCM (*i.e. pâte de ciment*) a été étudiée. Le dosage de PCM retenu est de 0 %, 10 %, 20 %, et 30 % en pourcentage massique [82]. L'optimisation de la quantité de PCM à ajouter a été mise en relation avec la conductivité thermique.

La Figure 20 montre l'évolution de la conductivité thermique en fonction du taux d'incorporation de PCM. Sur le graphique, une ligne en trait mixte représente la diminution réelle mesurée par rapport à une droite de référence (bissectrice) signifiant l'égalité entre la diminution de la conductivité thermique et le pourcentage de PCM ajouté (les deux paramètres étant exprimés en %). Pour un pourcentage de PCM inférieur à 20 %, le gain de conductivité thermique du matériau cimentaire est supérieur au pourcentage d'incorporation de PCM. En d'autres termes, une augmentation de la conductivité thermique est réalisée tout en utilisant une quantité minimale de PCM. Pour des valeurs supérieures à 20% d'incorporation de PCM, la diminution de la conductivité thermique est limitée. En effet, on observe qu'une diminution de 5 % de conductivité thermique pour 10 % d'incorporation de PCM. La zone allant de 0 à 20 % d'incorporation de PCM pourrait être considérée comme une utilisation optimale des PCM. Il convient de souligner que dans cette étude l'optimum proposé est un optimum associé à la conductivité thermique. Pour un optimum global, plusieurs paramètres doivent être étudiés.

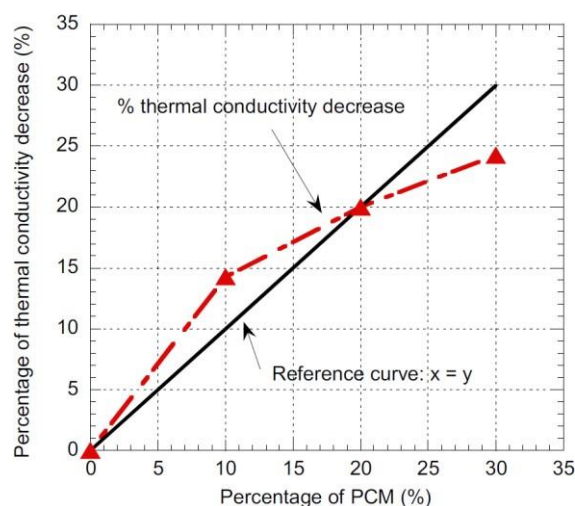


Figure 20: Evolution de la conductivité thermique en fonction du taux de PCM [82].

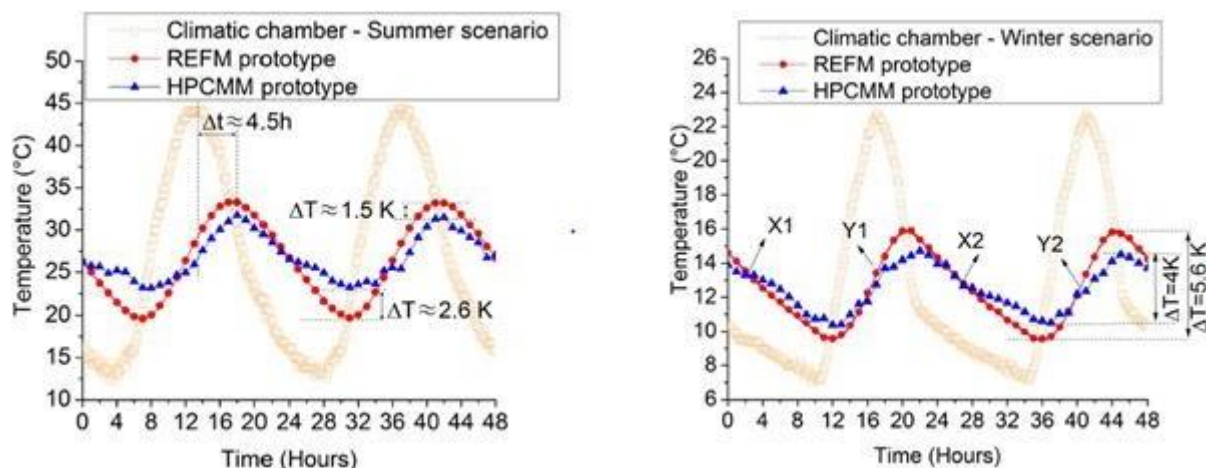
1.6.2.3. Application hivernale et estivale

La sélection de la température de fusion du PCM pour l'incorporation doit se faire dans une combinaison de la gamme prévue de confort thermique et des conditions climatiques typiques de l'emplacement du bâtiment. Il est impossible de choisir un matériau à changement de phase qui satisfasse toutes les conditions météorologiques dans un endroit particulier. Le PCM, qui réduit les fluctuations de la température de l'air intérieur en hiver ne conviendra pas pour une utilisation estivale, car les PCM restent en permanence liquides pendant ces mois. Ainsi le système d'isolation ne peut donc pas exploiter l'effet de chaleur latente.

Pour cela, des chercheurs ont testé l'utilisation de plusieurs types de PCM dans l'enveloppe d'un bâtiment. Trois matériaux différents à changement de phase (appelés PCM hybrides) ont été incorporés dans un mortier pour enduit extérieur pour les murs de façade dans le but d'améliorer

l'efficacité énergétique des bâtiments [93]. Ainsi, la sélection initiale des matériaux pour cette recherche a été limitée à ceux présentant un changement de phase dans la plage de température de 10 à 30 °C, qui couvre les variations de température sol-air pour les périodes hivernales et estivales au Portugal, lieu de l'étude. Ainsi, les PCM utilisés présentent des températures de fusion de 10 °C, 26 °C et 28 °C.

Des prototypes ont été développés pour étudier la réponse de l'enduit-PCM aux fluctuations de la température de l'air extérieur. Ces prototypes consistaient en des boîtes creuses dont les parois extérieures étaient matérialisées par des panneaux de polystyrène enduits à l'intérieur avec les mortiers étudiés. La réponse de ces matériaux sous des profils de température quotidiens réalistes sont présentés à la Figure 21.



Note : REF M = Matériau de référence sans PCM ajouté ; HPCMM = Mélange de PCM hybrides

Figure 21: Températures mesurées dans un scénario d'été et d'hiver [93].

Une diminution de température maximale est notée pour les deux scénarios avec possibilité d'identification de la température de fusion qui se traduit par une stabilisation de la température à l'intérieur durant le changement de phase.

Il convient toutefois de souligner que ni les prototypes de référence sans ajout de PCM (REF M) ni les prototypes avec des PCM hybrides (HPCMM) n'atteignent les niveaux de confort thermique souhaités pour les bâtiments. Cette situation ne serait pas acceptable dans un scénario réel, où un élément chauffant serait ajouté au système. Même si un tel élément chauffant n'a pas été inclus dans cette recherche, l'ajout de PCM a atténué les amplitudes thermiques par rapport à la référence comme prévu.

1.5.3. Durabilité et comportement à long terme, au feu et au gel/dégel

1.6.3.1. Effet de la température et réaction au feu

Le comportement à haute température des matériaux cimentaires contenant des PCM et leur réaction au feu est une question fréquente liée à la sécurité des occupants et que les chercheurs se sont posés. Dans les différentes études recensées, il a été constaté que l'exposition des mortiers développés à de hautes températures entraîne une baisse de la résistance à la flexion, à la compression et d'adhérence. Ce comportement peut être justifié par l'augmentation des phénomènes de fissuration lors de l'exposition à des températures élevées en raison des contraintes générées dans les échantillons par la dilatation des constituants. A cela s'ajoute la déshydratation de certains composants d'un mortier hydraté. Même si le comportement d'un mortier avec PCM est similaire à celui des mortiers de référence, la présence de PCM dans les matrices cimentaires présente une stabilité significative après exposition à des températures bien supérieures à celles de l'environnement naturel en ne montrant

aucun signe de détérioration jusqu'à environ 200°C [94]. Dans la même étude, il a été constaté qu'aucune inflammabilité ne survient dans cette gamme de température [95]. Également, il a été observé que l'enrobage des PCM dans les mortiers génère des flammes lorsqu'ils sont chauffés à 1000°C [96]. Donc l'ajout de PCM provoque des flammes dans le mortier lorsqu'il est exposé à une source de chaleur. Néanmoins, les mortiers contenant des PCM s'éteignent facilement d'eux-mêmes une fois la source de chaleur retirée, ceci atteste de la faible capacité de propagation de la flamme en cas d'incendie [96].

La caractérisation des propriétés des matériaux soumis à des températures élevées est complexe et il est nécessaire d'évaluer plusieurs paramètres afin d'étudier leur comportement au feu. Deux ans plus tard après la première investigation [96], la même équipe a effectué de nouveau, une étude sur les événements importants qui pourraient augmenter les risques en cas d'incendie, comme la présence de flammes soutenues, la production de gouttes pendant la combustion ou le dégagement de fumées denses qui nuit à la visibilité [97]. L'ajout d'une matière organique inflammable telle que la paraffine dans certains PCM, rend la classification de la réaction au feu d'un mortier indispensable avant son utilisation dans les constructions.

Pour ce faire, des essais d'égouttage, des essais de dégagement de fumées, des essais de résistance au feu à petite échelle et des analyses avec un calorimètre à pyrolyse de flux de combustion ont été réalisés par Haurie et al. 2016 pour évaluer le comportement au feu de mortiers contenant des PCM [97].

Les résultats confirment que la présence de PCM organiques aggrave le comportement au feu d'un mortier [97]. Néanmoins, les mortiers-PCM ont montré un potentiel d'auto-extinction de la flamme lorsque la source de chaleur est retirée, ce qui est un signe très positif en termes de potentiel de propagation de la flamme en cas d'incendie [96].

1.6.3.2. Gel/dégel et attaque ionique

La neige et la glace sont fréquemment enlevées de la surface d'une chaussée en béton pour accroître la sécurité. Une méthode courante pour enlever la glace et la neige de la surface des chaussées et des ponts est l'application de sels de déglçage. Une dégradation combinée du béton se produit par apparition de fissures induites par le gel-dégel et la diffusion des chlorures à travers les fissures qui peut causer la corrosion des armatures [98].

L'incorporation de PCM dans le béton pourrait être une méthode alternative efficace. Ceci permettrait de profiter de la chaleur latente élevée des PCM qui est libérée dans des conditions ambiantes de gel. Lorsque la température ambiante diminue pour atteindre une température inférieure à la température de congélation du PCM, celui-ci subit une transformation de phase de liquide à solide, libérant de la chaleur qui peut être utilisée pour faire fondre la glace et la neige sur la surface de la chaussée en béton. Une étude expérimentale a été menée pour évaluer l'effet du PCM dans le béton sous des cycles de gel/dégel [98]. A l'arrivée d'un épisode de neige, lorsque la dalle de béton a été exposée à une température ambiante inférieure à la température de congélation du PCM, on a observé un dégagement de chaleur pendant la transformation de phase du PCM, comme montré sur la Figure 22(d). Ce dégagement de chaleur se traduit par une augmentation de température par rapport à la référence Figure 22(a, b, c). Le matériau de référence atteint des températures plus basses que le matériau contenant des PCM.

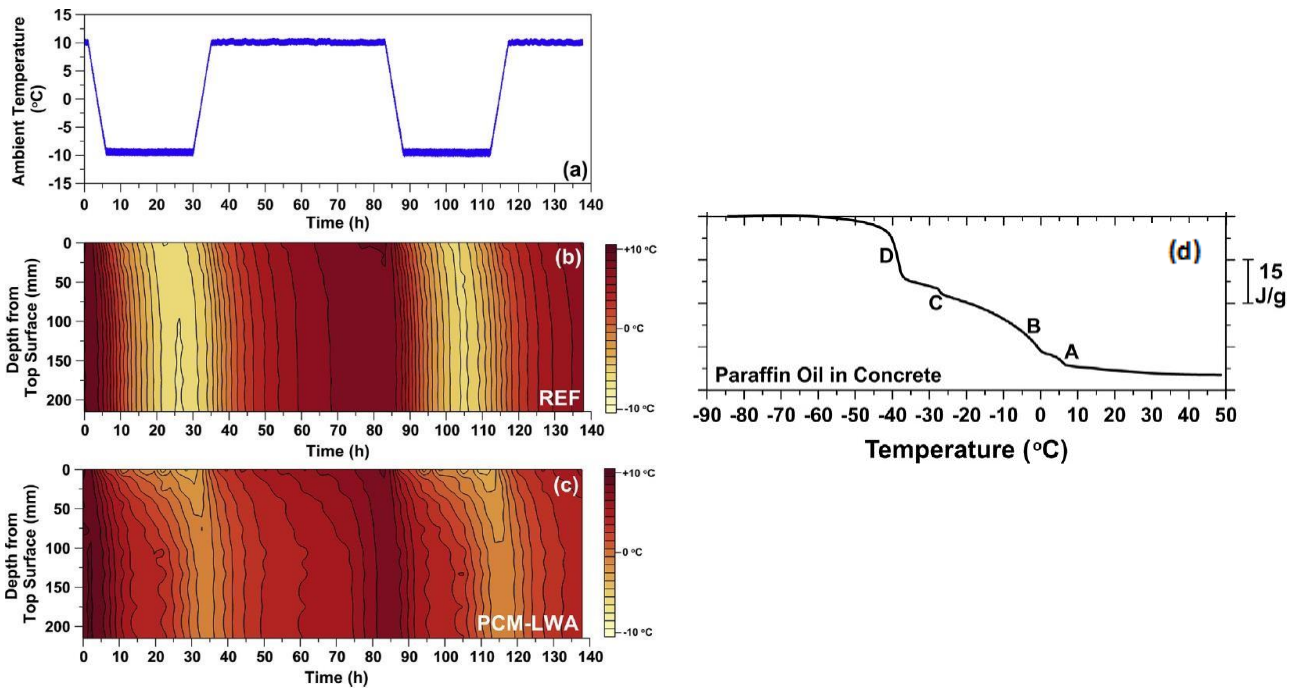


Figure 22: (a, b, c) Température en profondeur - (d) Dégagement de chaleur, [98].

Note: Ref = concrete slab with no PCM; PCM-LWA: concrete slab made using lightweight aggregate containing PCM (paraffin oil)

Les résultats précédents conduisent à ne pas avoir ou à limiter la formation de gel dans le béton et par suite augmenter sa durée de vie. Après l'étude expérimentale, ces résultats ont été validés numériquement par Nayak et al. (2019) [99]. La simulation numérique montre des résultats semblables en termes de gel/dégel et permet, en plus, de simuler une attaque ionique de chlorure sur un béton avec l'incorporation de PCM. Le béton avec une incorporation volumique de PCM (en substitution de 20% du sable en volume) montre une réduction du nombre de cycles de gel-dégel de 70 %, ce qui établit le potentiel de son application. En plus, le pouvoir de pénétration et le taux de diffusion des chlorures sont fortement réduits par la présence de PCM dans la matrice cimentaire, ceci démontre l'efficacité des PCM pour améliorer la durabilité des mortiers, voir Figure 23.

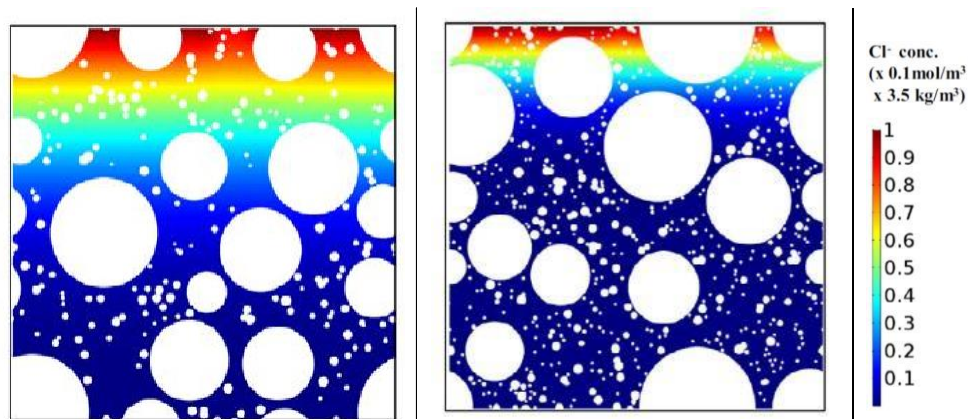


Figure 23: Distribution de la concentration en chlorure d'un mortier endommagé par le gel à 30 jours: (à gauche) mortier (à droite) mortier-PCM, [99].

1.6. PCM et matériaux à base de terre

1.6.1. Incorporation de PCM dans les sous-couches de chaussées

De la même façon que dans la section 1.6.3.2, le PCM a été utilisé dans les sous-couches et fondations des chaussées [100–102]. Ces dernières sont souvent exposées à des problèmes de gel/dégel. Le stockage de l'énergie par chaleur latente pourrait constituer une solution prometteuse. Par le passé, des études expérimentales et numériques ont été réalisées sur un sol en incorporant des PCM. Les études expérimentales ont porté sur l'effet de l'ajout des PCM sur les propriétés physiques et mécaniques du sol [100]. Les études numériques ont permis d'analyser l'évolution de la température d'un sol incorporant des microcapsules de PCM à différentes températures externes et d'investiguer l'influence du PCM sur le sol environnant [101]. Dans un premier temps, il a été constaté que les PCM encapsulés à base de paraffine n'ont pas réagi avec le sol [100]. En ce qui concerne le pH du sol, l'incorporation de PCM n'a pas eu d'influence. D'autre part, l'utilisation de PCM a augmenté la limite de liquidité (LL) du sol. La capacité d'absorption d'eau plus élevée de PCM peut constituer la raison de la limite de liquidité plus élevée des mélanges. En plus, l'augmentation du ratio de vide dû à l'éclatement des capsules de PCM peut être une raison possible de ce phénomène [100]. Une plus grande capacité d'absorption d'eau de PCM pourrait être la raison pour le LL plus haut des mélanges. Concernant la performance mécanique, pour le PCM microencapsulé, la résistance à la compression a diminué avec le pourcentage croissant de PCM. Les capsules de PCM se comportent comme des vides remplis de liquide et diminuent la résistance [100]. Pour le PCM pur, la résistance à la compression a augmenté jusqu'à un taux d'ajout de PCM de 8 %, puis a diminué. L'absorption de PCM pur par le sol peut avoir diminué l'orientation aléatoire des particules du sol, ce qui a finalement augmenté la résistance [100].

Sur un autre plan, l'ajout de PCM dans les sous-couches de chaussées permet de lisser les pics de température et de réduire la vitesse de changement de température du sol. Dans ce sens, une expérience a été menée en laboratoire en considérant l'ajout de PCM [102]. Sur la Figure 24, l'évolution de la température de différents mélanges de sol soumis à un cycle de gel/dégel (de 10 °C à -10 °C et puis à 10 °C) est représentée. L'addition de PCM au sol a eu un impact remarquable sur l'évolution de la température du sol. Par exemple, à la 150^{ème} minute de l'expérience, les échantillons de sol sans PCM avaient une température de -5 °C, alors que les échantillons contenant 4 % de PCM sous forme libre (PCMf) ou sous forme microencapsulée (PCMm) présentaient une température de -2.4 °C et -1 °C, respectivement. Ainsi, il peut être stipulé que l'ajout de PCM entraîne un ralentissement du processus de congélation du sol car la chaleur dégagée par le PCM pendant le changement de phase retarde la formation des cristaux de glace et diminue la profondeur de pénétration du gel. Par ailleurs, l'ajout de PCM ralentit le processus de décongélation, ce qui peut être remarqué avec le retard dans la montée de la température des échantillons d'environ 10 à 15 minutes vers la 480^{ème} minute [102].

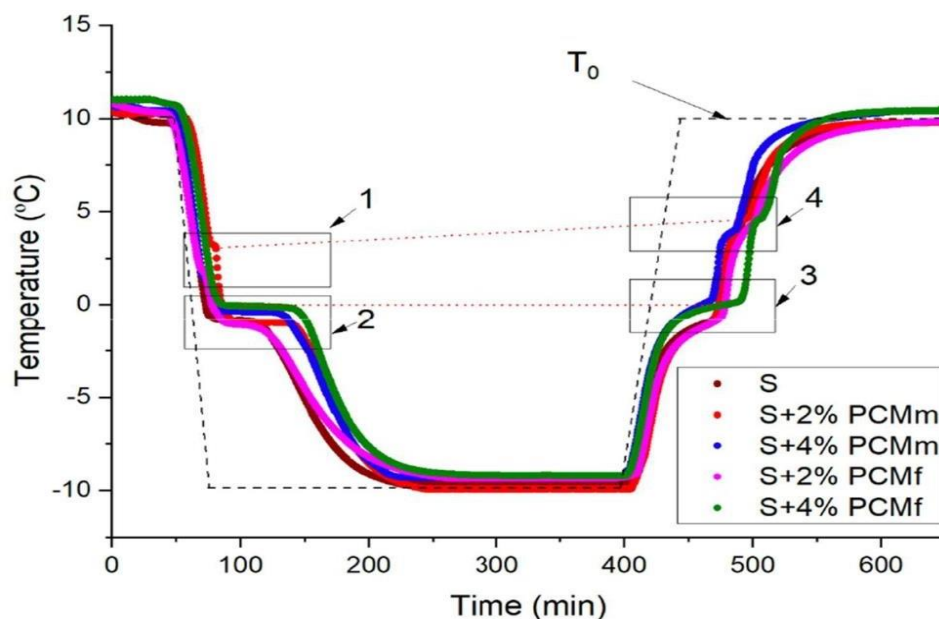


Figure 24: Variations de la température de mélanges sol-PCM [102].

Note : S= Sol, PCMm= PCM microencapsulé, PCMf = PCM free (libre) ; (1 et 4) : Changement de phase du PCM, (2 et 3) : Congélation/décongélation de l'eau.

Les PCM ont un potentiel d'application pratique dans la construction de chemins de fer et de routes dans les régions froides ainsi que dans les sous-couches de fondation des bâtiments. Les PCM libèrent/absorbent une grande quantité de chaleur latente pendant la solidification/fusion, ce qui ralentit la vitesse de gel/dégel du sol. La génération et l'absorption de chaleur pendant le changement de phase peuvent réguler d'importants processus thermo-physiques dans la masse du sol [102].

1.6.2. Incorporation de PCM dans des matériaux de construction à base de terre

1.7.2.1. L'incorporation de PCM dans le pisé

Le ciment est le matériau de construction le plus utilisé ce qui explique les nombreuses études sur l'incorporation de PCM dans les matrices cimentaires. Néanmoins, avec les enjeux climatiques actuels et l'entrée en vigueur de la nouvelle réglementation environnementale en France, le recours aux matériaux à faible impact environnemental (paille, bois, terre, torchis, etc.) va devenir de plus en plus important. Si l'on considère la construction en mélange terre-paille végétales, très peu de travaux se sont intéressés à l'impact de l'incorporation de PCM sur les propriétés de ce type de matériaux. Parmi les rares études trouvées dans la littérature, nous pouvons citer celle menée par Serrano et al. où un PCM a été incorporé dans des pisés stabilisés [38,103], celle réalisée par Gounni et Louahlia. dans la bauge [104]. Enfin, l'incorporation de PCM dans des enduits à base de terre a été investiguée par Santos et al [105].

Dans leurs travaux, Serrano et al. [38,103] ont cherché à développer un nouveau pisé stabilisé aux propriétés thermiques améliorées par l'incorporation du PCM Micronal DS 5001. Les compositions des échantillons étudiés sont présentées dans le Tableau 5 avec différents dosages en terre, en stabilisateur physique (paille végétale) et en stabilisateur physico-chimique (chaux ou albâtre) et en PCM.

Tableau 5: Composition des différents pisés stabilisé étudiés [38,103].
 Note : P=Pisé, C=Chaux, A=Albâtre, et le numéro indique le pourcentage de PCM ajouté.

Echantillon	Terre [%vol]	Paille végétale [%vol]	Stabilisateur physico-chimique [%vol]	PCM [%vol]
Référence	100	0	0	0
PC-10	70	10	10	10
PC-5	75	10	10	5
PC-0	80	10	10	0
PA-10	75	10	5	10
PA-5	80	10	5	5
PA-0	85	10	5	0

En principe, le PCM est supposé atténuer la résistance à la compression. Ainsi, la raison qui justifie l'ajout de stabilisants est de bénéficier des propriétés thermiques du PCM tout en garantissant, ou même en améliorant, les propriétés mécaniques du pisé. L'effet du PCM sur les résultats mécaniques se distingue selon l'ajout de chaux ou d'albâtre au pisé, voir Tableau 6. Lorsqu'il s'agit d'ajouter de la chaux, le PCM génère une légère augmentation de la résistance à la compression, tout en restant en dessous de la valeur du pisé de référence. En revanche, dans le cas de l'ajout d'albâtre, la résistance à la compression diminue en fonction de la teneur en PCM incorporé tout en restant supérieure à celle de l'échantillon de référence. Ce fait est dû aux agrégats fins qui améliorent la compacité du matériau en remplissant les espaces laissés dans le cas du pisé de référence.

D'autre part, la conductivité thermique diminue clairement avec l'ajout de PCM. Cela s'explique par le fait que les microcapsules de PCM sont fabriquées avec des matériaux polymères entourant de paraffine qui sont des matériaux à faible conductivité thermique.

Enfin, la capacité thermique massique (C_p) a augmenté lorsque le PCM a été ajouté. Ainsi, la capacité des échantillons étudiés à accumuler de la chaleur sensible et latente se trouve améliorée. A noter que dans cette étude, un dispositif expérimental à une échelle représentative a été utilisé pour mesurer ce paramètre [106].

Tableau 6: Propriétés thermiques (à 30°C) et mécaniques de différentes formulations de pisé stabilisé dopé avec différents taux de PCM [38,103].

Echantillon	Conductivité thermique [W/(m.K)]	Capacité thermique massique [J/(kg.K)]	Résistance à la compression [MPa]
Référence	0,51	875	3,47
PC-10	0,39	957	3,38
PC-5	0,38	939	3,13
PC-0	0,45	821	2,86
PA-10	0,42	952	3,66
PA-5	0,46	915	4,26
PA-0	0,50	851	4,85

1.7.2.2. L'incorporation de PCM dans la bauge

L'utilisation des PCM dans les matériaux à base de terre suscite l'intérêt des chercheurs : comme déjà cité, certains incorporent des PCM microencapsulés dans le pisé [38,103], d'autres utilisent des macrocapsules dans des parois en terre [104]. Parmi ces parois, il convient de mentionner la bauge pour des utilisations isolante ou structurelle. La teneur en fibres de la bauge détermine son usage : la bauge structurelle est caractérisée par sa rigidité pour résister à des charges importantes grâce à leur faible teneur en fibres inférieure à 5 % (en masse). Quant à la bauge isolante, elle contient une quantité

importante de fibres 25-50 % permettant une bonne isolation thermique. La technique de construction en bauge fait l'objet de nombreuses études pour leur énergie intrinsèque, leur relative simplicité et leur disponibilité [104].

Dans l'étude concernée [104], la bauge structurelle est composée d'un mélange de terre, de 2,5 % de chanvre et de 28,5 % d'eau, tandis que la bauge isolante contient de la terre, 25 % de chanvre et 107,3 % d'eau. Dans le but d'améliorer la performance énergétique d'une maison en bauge, un panneau PCM Energain est intégré. Ce panneau composite PCM de 5 mm d'épaisseur est constitué de 60 % de paraffine microencapsulée dans un copolymère avec une température de fusion du PCM d'environ 22 °C et une chaleur latente de 105 kJ/kg. La masse volumique du PCM est d'environ 850 kg/m³.

Le panneau de PCM est incorporé dans les murs extérieurs d'une maison en bauge. Les murs sont définis, de l'intérieur vers l'extérieur, comme illustré à la Figure 25 : 15 mm de chaux comme enduit intérieur, le panneau de PCM, 300 mm de bauge isolante, 400 mm de bauge structurelle et 12 mm de terre crue enduite.

La performance thermique est ensuite étudiée à l'aide du logiciel TRNSYS pour les différentes zones climatiques du territoire français présentées à la Figure 27. Le comportement thermique transitoire du bâtiment est réalisé en utilisant le module Type 56 (TRNBuild). Ensuite les résultats sont comparés à une maison conventionnelle définie selon la réglementation thermique française RT2012 en utilisant les matériaux de construction conventionnels. Le mur extérieur de la maison conventionnelle est constitué de plaques de plâtre, de laine de roche, de blocs de béton et de mortier extérieur, ce qui représente la tendance classique en France.

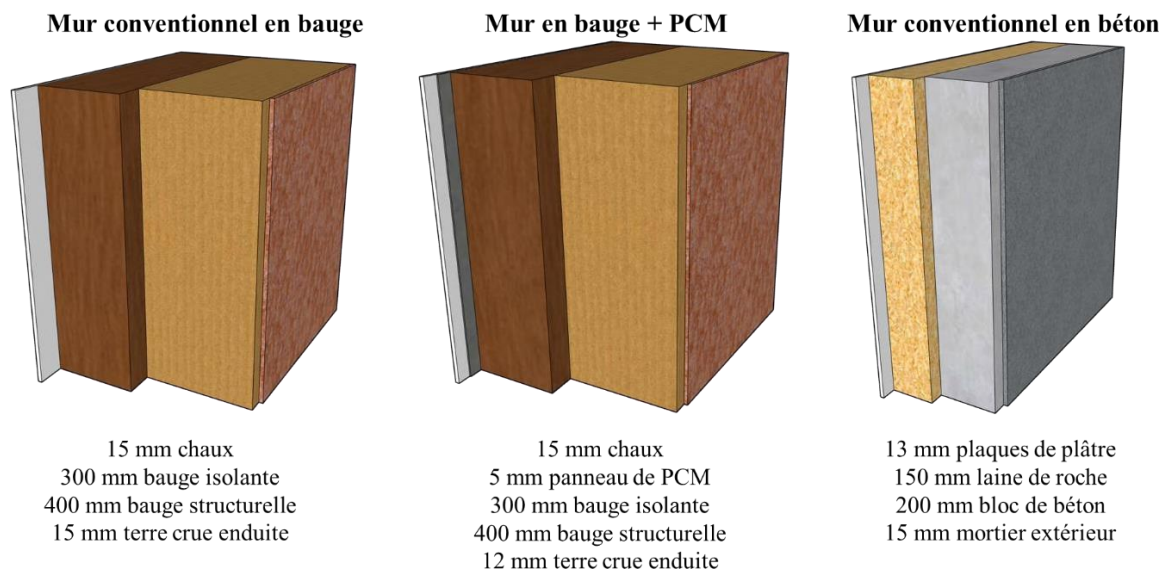


Figure 25: Composition des murs pour la simulation numérique réalisée par Gounni et Louahlia [104].

Le bâtiment étudié est une maison individuelle à deux étages de 2,5 m de hauteur par étage, d'une superficie de 65 m², située en Normandie, France. Les caractéristiques des parois sont présentées dans le Tableau 7.

Tableau 7: Les propriétés thermo-physiques des composants du mur extérieur de la maison en bauge [104].

Composition	Épaisseur [mm]	Conductivité thermique [W/m.K]	Masse volumique [kg/m ³]	Capacité thermique [J/kg.K]
Chaux	15	1,98	1400	850
PCM	Solide	0,22	850	Figure 26
	Liquide	0,18	850	Figure 26
Bauge isolante	300	0,19	625	1408
Bauge structurelle	400	0,24	1145	1121
Enduit de terre crue	15	0,75	1500	900

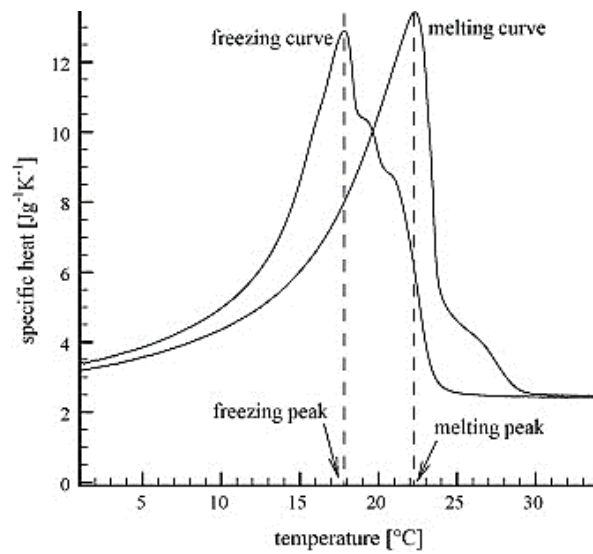


Figure 26: Capacité thermique du PCM ENERGAIN [104,107].

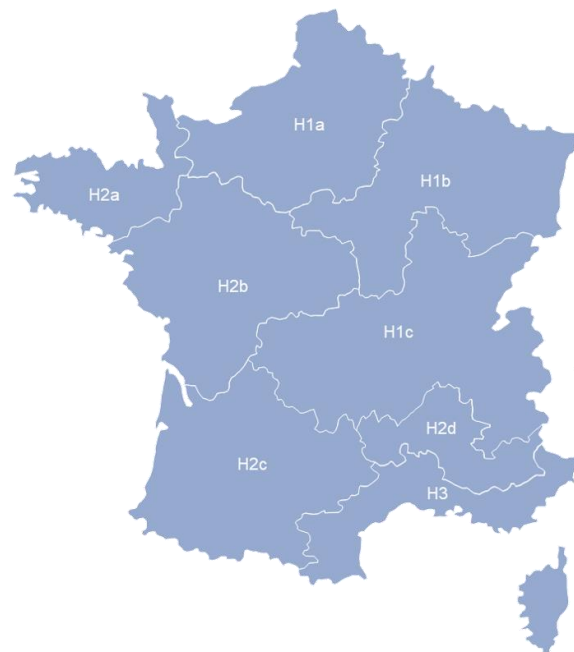


Figure 27: Zones climatiques définies selon la réglementation RT2012.

De ces simulations, les maisons en bauge ont un caractère plus avantageux que les maisons conventionnelles. En effet, les simulations numériques ont révélé un besoin énergétique annuel maximal d'environ 28 kWh/m² obtenu pour une maison en bauge dans la zone climatique H1a. Il en résulte une économie d'énergie de 20 % par rapport à la maison conventionnelle [104]. De plus, cette économie d'énergie maximale est d'environ 50 %, obtenue pour la zone climatique H2d où une très grande partie de l'année est à une température ambiante supérieure à 18 °C par rapport à H1a.

L'incorporation d'un panneau Energain dans cette maison en bauge et pour toutes les zones climatiques étudiées montre que la charge énergétique annuelle est encore réduite d'environ 35 % comparativement à la maison en bauge sans PCM. Les économies d'énergie annuelles sont plus importantes dans les zones climatiques froides que dans les zones climatiques chaudes où les besoins en chauffage sont faibles. Cette augmentation des économies d'énergie thermique est due à l'énergie latente stockée par le panneau Energain. Dans cette étude, il a été rapporté que plus la température de changement de phase du PCM est proche de la température ambiante, plus les économies d'énergie dans la maison sont importantes. Ceci est dû au fait que le PCM sera exposé au phénomène de stockage d'énergie par changement de phase dans certaines zones climatiques plus que d'autres [104].

1.7.2.3. L'incorporation de PCM dans les enduits en terre

Dans une étude datant de 2017, Santos et al. se sont intéressés aux enduits de terre crue incorporant des PCM [105]. Une campagne expérimentale a été développée visant à évaluer les propriétés des mortiers d'enduit de terre, notamment en termes de maniabilité et de performances physico-mécaniques. Cette étude s'est également penchée sur la susceptibilité à la colonisation biologique. Ainsi, des mortiers d'enduit de terre prêts à l'emploi et plusieurs autres mortiers formulés avec une terre argileuse brute ont été produits. Les chercheurs ont évalué aussi l'influence du remplacement partiel du sable fin par des PCM, Micronal DS 5040 X.

L'analyse des résultats de ces travaux a montré que la conductivité thermique des mortiers de terre diminue avec l'ajout de Micronal DS 5040 X. Contrairement à l'impact positif sur la conductivité thermique, l'ajout de PCM modifie complètement la maniabilité des mortiers, augmente l'absorption capillaire et la bio-susceptibilité. Cet ajout a eu également un impact négatif sur les propriétés mécaniques des mortiers de terre, en diminuant leur résistance à la compression et à la flexion [105]. Dans des études précédentes, les mortiers avec des PCM incorporés ont montré de bonnes propriétés thermiques à l'intérieur des locaux mais, au vu des résultats de l'étude, leur utilisation comme des mortiers de terre simplement formulés n'est pas recommandée sans optimisation [105].

1.7. Bilan de l'état de l'art

La terre est le matériau de construction le plus ancien de la planète. Ce matériau de construction est 100 % écologique. Il ne nécessite ni transformation ni transport. Une paroi faite de terre crue est un véritable climatiseur naturel : elle est chaude en hiver et fraîche en été. Ce matériau répond aussi aux défis de l'économie circulaire. En effet, après la démolition d'un bâtiment, la terre retourne au sol et peut être recyclée et réutilisée indéfiniment dans la construction.

Largement boudée depuis l'arrivée du matériau "béton" dans les années 1950, la terre renaît aujourd'hui, ses atouts écologiques et esthétiques retiennent l'attention de nombreux architectes et éco-construc-teurs contemporains.

Tout un écosystème économique est en train de se développer autour de la construction en terre crue à mesure que ce matériau durable suscite l'intérêt. Parmi les préjugés associés à l'architecture en terre, on peut citer le fait que beaucoup de personnes pensent qu'elle n'est utilisée que pour la construction de logements dans les zones rurales pauvres alors que des aéroports, des ambassades, des hôpitaux, des musées et des usines ont été construits en terre.

Par ailleurs, le développement des systèmes de stockage de l'énergie thermique ne cesse de démontrer aux agences nationales et internationales son intérêt en tant qu'option performante pour répondre à l'intermittence des énergies renouvelables, réduire la consommation d'énergies fossiles et ainsi les émissions de gaz à effet de serre.

Pour stocker l'énergie thermique plusieurs technologies existent : le stockage par chaleur sensible, le stockage thermochimique et le stockage par chaleur latente. A l'échelle d'un bâtiment c'est cette dernière technologie qui est privilégiée parce qu'elle est plus efficace pour de faibles différences de température [3,108–112]. Dans le cas du stockage par chaleur latente, un matériau à changement de phase change d'état (liquide/solide, solide/solide, etc.) à une température dite de transition, en libérant ou en absorbant de l'énergie thermique selon le sens de la transformation [113]. Les PCM s'imposent donc comme la technologie la plus adaptée au stockage de la chaleur à basse température (autour de 20 °C) et à court terme (sur une journée), car ils permettent :

- Une **valorisation maximale des apports solaires et de l'énergie produite** ;
- Une amélioration du confort thermique des usagers par la réduction des fluctuations thermiques ;
- Une augmentation de l'inertie thermique et un **lissage de la pointe de consommation électrique** : chauffer un matériau pendant les heures où l'électricité est la moins chère (heures creuses), pour que ce dernier restitue cette chaleur toute la journée ;
- Une **réduction du volume d'encombrement des matériaux de stockage** grâce aux quantités de chaleur importantes stockées par la combinaison de la chaleur latente de changement d'état et de la capacité thermique massique de ces matériaux.
- Outre l'effet thermique, le PCM est bénéfique pour lutter contre le phénomène de gel/dégel.

Cependant, le PCM impose des limitations mécaniques en raison de son impact sur la porosité, sur le degré d'hydratation résultant de son incorporation dans les matrices cimentaires et sur les réactions chimiques qui peuvent intervenir dans un environnement alcalin. De nombreuses études ont été menées sur l'effet de l'ajout de PCM dans une matrice cimentaire, mais peu se sont intéressées à cet effet dans un mélange naturel tel que la terre-paille.

De manière synthétique, et afin de répondre aux défis du développement durable, le secteur de la construction, notamment celui des matériaux de construction, apporte de plus en plus de solutions basées sur des matériaux de proximité (provenance locale) tels que la bauge, le pisé, la terre allégée etc. Parmi ces matériaux, la bauge est une construction traditionnelle en terre crue, très présente en Normandie qui présente de nombreux avantages environnementaux.

La mise en œuvre de mélanges à base de terre élimine les problèmes majeurs liés à l'utilisation des PCM dans une matrice cimentaire, comme la réaction d'hydratation. Le bénéfice de ces mélanges provient de leur nature biosourcée et des propriétés hygroscopiques, ce qui est pertinent et répond à l'objectif de la thèse. L'utilisation des mélanges terre-paille-PCM va probablement contribuer à un meilleur confort thermique.

Chapitre **2**

 Matériaux et méthodes

CHAPITRE 2 : Matériaux et méthodes

L'étude bibliographique a révélé la diversité des mélanges terre-paille. Cette bibliographie a été exploitée pour retenir deux types de matériaux. Un premier ayant un bon comportement thermique et un second présentant un bon comportement mécanique. De ce fait, un mélange de terre limono-argileuse et de roseau a été sélectionné pour des applications thermiques. De même, un mélange de terre limoneuse sableuse avec de la paille de lin est dédié à des usages structurels. Comme l'objectif de cette étude est de combiner ces mélanges terre-paille avec des PCM, la caractérisation de ces différents constituants (terre, fibres, PCM) séparément est donc nécessaire. Il convient de souligner que les matières premières mises en œuvre proviennent essentiellement de la Normandie pour simplifier l'approvisionnement, favoriser l'usage des matériaux locaux. Toutefois, des matériaux similaires existent également dans les différentes régions de France. Ce chapitre porte non seulement sur la campagne d'essais menée pour la caractérisation des matériaux élémentaires mais également le processus de formulation et les modalités de préparation des échantillons. En complément, ce chapitre expose en détail les méthodes d'essai qui ont servi à l'étude des matériaux composites.

2.1. Caractérisation des matériaux

2.1.1. Sols

2.1.1.1. Caractérisation géotechnique

Un sol est un mélange de gravier, de sable, de limon et d'argile dans une large gamme de compositions. Il n'existe pas deux types de sol identiques. La proportion de sable, de limon et d'argile, ainsi que le type d'argile, détermine la qualité d'un sol donné et son adéquation pour la construction. La particularité la plus importante d'un sol est sa teneur en argile. En effet, cette dernière assure la cohésion du matériau de construction. Pour permettre une bonne cohésion, le sol doit contenir au moins 5 % d'argile [114]. D'autre part, l'argile gonfle et se rétracte avec les variations du taux d'humidité. Au-delà de 50 % d'argile, le matériau devient ingérable lors de la construction, car il subit un fort retrait et se fissure lorsqu'il sèche.

Avant d'utiliser un sol local, il est important de vérifier qu'il convient à la technique de construction en terre choisie. Plusieurs tests préalables à la construction, décrits dans les guides de construction en terre, permettent de déterminer la résistance, la durabilité et le rétrécissement. Ainsi, il serait possible d'ajuster les sols inadaptés en ajoutant différents types de sable, de gravier fin, de paille ou davantage d'argile.

Selon la littérature, un sol destiné à la construction en bauge doit être modéré en argile. La modulation de la quantité d'argile permet d'éviter les fissures. Par ailleurs, une quantité suffisante d'argile est nécessaire pour assurer la cohésion. Dans cette thèse, trois sols différents ont été caractérisés. Les sols utilisés dans cette étude ont été collectés de la carrière Lieusaint (Société des Sablières du Cotentin, SABCO Normandie). L'analyse granulométrique ainsi que l'activité argileuse ont été investiguées.

L'analyse granulométrique vise à déterminer la taille et les pourcentages en poids respectifs des différentes particules constituant le sol. La classification des sols est réalisée selon la caractérisation géotechnique conventionnelle en respectant les normes applicables. La distribution granulométrique a été réalisée séparément pour les particules fines ($< 80 \mu\text{m}$) et les particules grossières ($> 80 \mu\text{m}$). Pour les premières, le granulomètre laser LS 13 320 de Beckman Coulter a été utilisé. Pour les secondes, des tamis en été utilisés en suivant la norme XP P94-041 [115]. A partir d'une courbe granulométrique, il est possible de répertorier le diamètre maximal (D_{max}), le tamis à 2 mm et la teneur en fines qui sont des paramètres caractéristiques permettant de classer les sols selon la norme (NF P11-300, 1992) [116].

Tous les sols ne sont pas complètement argileux ou limoneux, mais constitués d'un mélange d'argile, de limon et de sable. L'analyse granulométrique des trois sols investigués dans cette étude a donné les résultats présentés en Figure 28. Cette dernière permet de déterminer les pourcentages exacts des particules constituant ces sols.

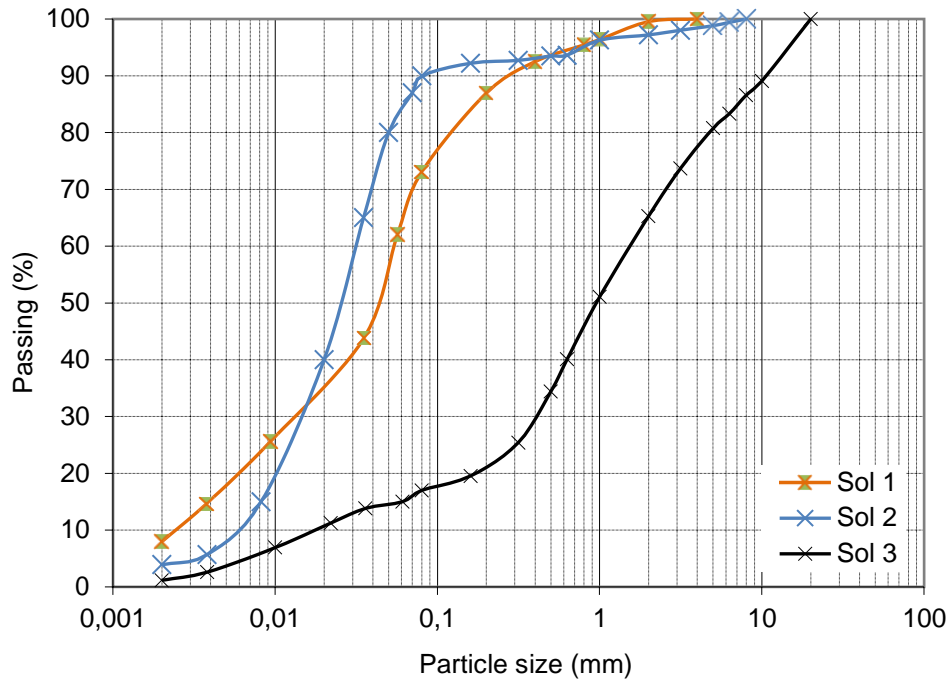


Figure 28: Courbes granulométriques des différents sols.

Grâce à ces pourcentages, il devient alors possible de déduire la texture du sol grâce au triangle des textures, voir Figure 29 et Tableau 8. L'analyse granulométrique montre que le premier sol a une texture de sol limoneux, alors que le deuxième est un sol limoneux fin et le troisième, sableux limoneux.

Figure 29: Texture des sols selon ses constituants : Sol 1 (orange) – Sol 2 (bleu) – Sol 3 (noir) [117].

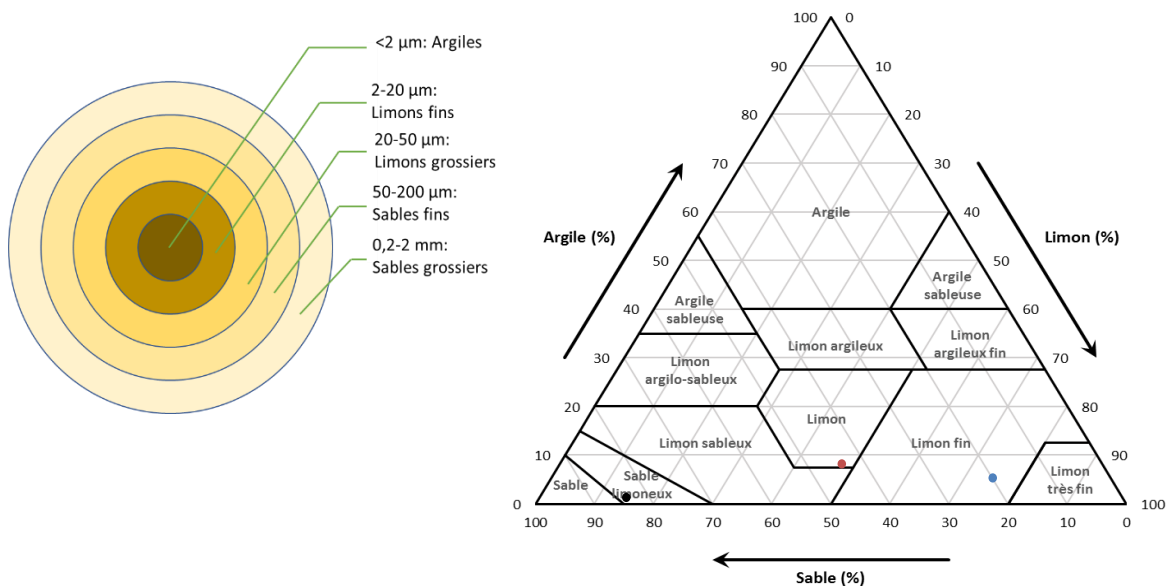


Tableau 8: Distributions des particules pour les différents sols.

Diamètre	Sol 1 [%]	Sol 2 [%]	Sol 3 [%]
< 2 μm	8	4	1
2-20 μm	23	36	10
20-50 μm	26	40	3
50-200 μm	29	12	8
0,2-2 mm	13	5	43
> 2 mm	0	3	35
<i>Passant à 80 μm</i>	73	90	17

Les travaux consultés dans l'étude bibliographique expliquent que les argiles donnent au sol une capacité d'absorption d'eau dite activité argileuse susceptible d'entraîner des phénomènes de retrait-gonflement et de contribuer à la plasticité et à la cohésion du sol [29]. Ainsi, la détermination des limites d'Atterberg (limites de liquidité et de plasticité) [118] et l'essai au bleu de méthylène [119] ont été réalisés pour évaluer cette activité argileuse. Cette activité est un paramètre qui peut compléter la caractérisation du sol. Les résultats de ces 2 essais donnés dans le Tableau 9 sont cohérents avec les courbes granulométriques. Le sol 1 contient le plus d'argile, et ce taux diminue pour le sol 2 et voire plus pour le sol 3. Les limites d'Atterberg et les valeurs du bleu de méthylène permettent de classer les sols 1, 2 et 3 comme des sols limoneux élastiques avec du sable, limoneux de faible plasticité et sablo-limoneux avec gravier, respectivement selon le système unifié de classification des sols [120] (en anglais : Unified Soil Classification System (USCS)).

Tableau 9: Valeur au bleu de méthylène et limites d'Atterberg des différents sols.

Sol	LL [%]	PI [%]	MBV [g/100g]	USCS [120]
Sol 1	57,8	15,3	5,64	Limon élastique avec du sable (MH)
Sol 2	27,6	3,6	1,61	Limon de faible plasticité (ML)
Sol 3	23,7	2,7	0,47	Sable limoneux avec gravier (SM)

2.1.1.2. Caractérisation chimique et minéralogique

Techniques de caractérisation

Les analyses de la composition du sol ont été réalisées par la spectrométrie par fluorescence X (XRF). Le spectromètre Inel Equinox 3500 a été utilisé pour collecter les spectres de fluorescence X (équipé d'une source microfocus en Cu, d'un miroir multicouche parabolique sur le faisceau primaire, et d'un détecteur Amptek X-123SDD Silicon Drift placé verticalement à 10 mm au-dessus de l'échantillon pour assurer une haute sensibilité même avec des éléments à faible numéro atomique). Les données ont été collectées avec un temps d'intégration de 400 s.

Le diagramme de diffraction des rayons X sur poudre a été collecté à l'aide d'un rayonnement K de cuivre pur (= 1,54059) sélectionné par un monochromateur Ge (111) à faisceau incident sur un instrument D8 Advance Vario 1 Bruker (diffractomètre à 2 cercles, mode θ - 2θ Bragg-Brentano). Le diagramme de diffraction des rayons X du sol est collecté pendant 1s à un pas de $0,01^\circ$ (16 h/scan) de 10° à 80° .

La technique *Full-Pattern Search-Match* (FPSM) et la *Crystallography Open Database* [121] ont été utilisées pour la quantification et l'identification des phases cristallines, tandis que le logiciel MAUD [122] a été utilisé pour la quantification Rietveld.

Caractérisation microstructurale du sol

Les sols utilisés dans cette étude contiennent principalement du silicium, de l'aluminium, du fer et du sodium pour les cations majeurs. L'analyse XRD est très importante pour obtenir la composition minéralogique du sol. Par exemple, les atomes de silicium peuvent être trouvés dans le quartz ou les argiles, deux phases aux propriétés bien distinctes lorsqu'elles sont présentes dans le composite terre-paille. Le processus d'ajustement en ligne *Full Profile Search Match* (FPSM) a été utilisé pour effectuer une analyse préliminaire rapide des phases [123].

Le FPSM teste toutes les structures cristallines probables de la base de données COD (limitées aux éléments détectés par XRF) à l'aide d'un processus d'ajustement de Rietveld, ce qui permet d'obtenir une liste ordonnée de candidats pour une quantification ultérieure.

Le diagramme XRD des sols est ensuite ajusté selon la méthode de Rietveld, en tenant compte de l'identification de la phase précédente. Les facteurs R généraux indiquant la qualité globale de l'ajustement entre le modèle et les données expérimentales sont : $R_{wp} = 5,3 \%$ et $R_b = 3,9 \%$, ce qui donne une qualité d'ajustement de 1,8. Les valeurs de microdéformation sont également ajustées au cours de cette étape et restent faibles pour toutes les phases.

Les résultats illustrés dans le Tableau 10 montrent que le sol 1 est composé de silicium, d'aluminium, de fer, de calcium et de magnésium comme principaux cations, avec une présence mineure de potassium et de calcium. Alors que le sol 2 utilisé dans cette étude est composé de silicium, aluminium, fer et magnésium comme cations principaux avec une présence mineure de potassium, titane, calcium et sodium.

Tableau 10: Composition chimique du sol structurel en masse obtenue par des mesures XRF.

Elément	Sol 1 [%]	Sol 2 [%]
Dioxyde de silicium (SiO ₂)	59,73	65,89
Oxyde d'aluminium (Al ₂ O ₃)	20,25	14,23
Oxyde ferrique (Fe ₂ O ₃)	6,09	6,65
Oxyde de magnésium (MgO)	3,16	4,08
Oxyde de potassium (K ₂ O)	2,05	2,17
Dioxyde de titane (TiO ₂)	<0,1	2,08
Oxyde de calcium (CaO)	5,33	1,27
Oxyde de sodium (Na ₂ O)	0,10	1,11
Oxyde de manganèse (MnO)	<0,1	0,16
Pentaoxyde de phosphore (P ₂ O ₅)	<0,1	0,14
Trioxoxyde de soufre (SO ₃)	<0,1	<0,1
Perte au démarrage	3,10	2,26

Par rapport aux phases minérales, le quartz est formé par des roches ignées. Le quartz est composé de tétraèdres de silice, tous les atomes d'oxygène étant liés de manière covalente à tous les atomes de silice. Cela donne un cristal extrêmement solide, sans plans faibles [124].

La muscovite (également connue sous le nom de mica commun) est un phyllosilicate hydraté d'aluminium et de potassium. Elle possède un clivage basal presque complet, ce qui donne des lamines (feuilles) incroyablement fines qui sont souvent assez élastiques [125]. La montmorillonite est un minéral silicate d'aluminium avec du magnésium hydraté.

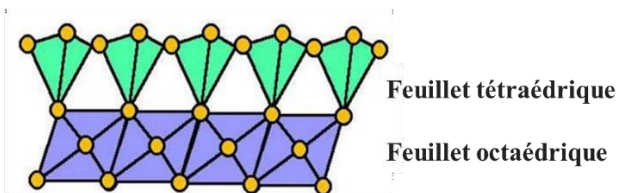
La montmorillonite, souvent connue sous le nom de TOT (deux feuillets tétraédriques encadrant une couche octaédrique), est une argile de type 2/1, voir Figure 30. Chaque feuille de montmorillonite est

constituée de trois couches : une couche octaédrique de $\text{Al}(\text{OH})_5\text{O}$ et deux couches tétraédriques de SiO_4 [125]. La capacité des montmorillonites à gonfler lorsque l'eau remplit la zone située entre les couches est l'une de leurs propriétés les plus remarquables. La montmorillonite dispersée dans l'eau produit assez rapidement une suspension colloïdale stable. En revanche, cette capacité à gonfler et à se rétracter (effondrement des couches d'argile lors de la dessiccation) pose des problèmes géotechniques importants, générant des déplacements parfois significatifs au niveau des fondations en raison des fluctuations de l'humidité du sous-sol. L'albite est un minéral feldspathique (groupe des silicates, sous-groupe des tectosilicates) dont la formule est $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ et qui peut contenir des traces de calcium, de potassium et de magnésium [125]. La goethite est un minéral oxyhydroxyde de fer (III), plus précisément le polymorphe α du composé $\text{FeO}(\text{OH})$ [125]. La goethite se forme par l'altération d'autres minéraux riches en fer. La kaolinite est un minéral composé de silicate d'aluminium hydraté et appartient au sous-groupe des phyllosilicates (groupe kaolinite-serpentine) [125]. Le rutile est un minéral oxydé, la forme naturelle la plus abondante du TiO_2 . Le rutile est un minéral accessoire fréquent dans les roches métamorphiques et ignées à hautes températures et pressions [126].

L'illite désigne une catégorie de minéraux argileux qui ne gonflent pas. Les espèces d'illite sont constituées de trois couches de phyllosilicates, avec une couche d'aluminium (Al) prise en sandwich entre deux couches de silicate (Si). La bisiallisation, une réaction qui se produit lorsque l'eau est attaquée dans des circonstances particulières de température et de pression, produit des micas (muscovite, biotite) et d'autres silicates (feldspath, feldspathoïdes, orthose, et autres) [125].

La huntite est un minéral carbonaté formé à basse température. Elle est présente dans les roches riches en magnésium, comme produit d'altération superficielle des roches riches en magnésium telles que les serpentinites, ou la magnésite [127].

1:1 Argile minérale (kaolinite, halloysite...)



2:1 Argile minérale (montmorillonite, illite...)

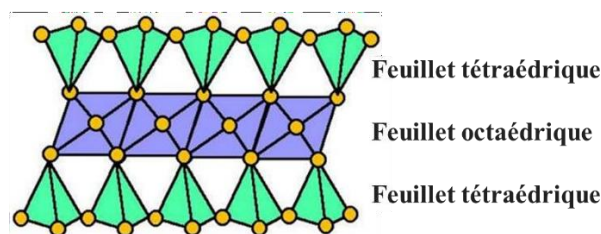


Figure 30: Différentes combinaisons de feuilles tétraédriques et octaédriques [128].

Certaines argiles ont la capacité d'élargir les espaces interfoliaires entre leurs feuillet. L'insertion de cations hydratés (Na, Ca, etc.) lui confère cette caractéristique, ce qui lui permet de compenser les déficits chroniques de charge [129]. Si la charge argileuse est trop élevée (ex. micas ou muscovite dans notre échantillon : charge argileuse totale de -1 entièrement contrebalancée par les cations déshydratés K), le phénomène disparaît (ex. pyrophyllite, talc : charge argileuse totale de 0, pas de cation interfoliaire). La sous-classe des smectites fait partie des espèces expansibles, avec une charge allant de 0,3 à 0,8. L'eau insérée par les cations hydratés est ce qui permet à la structure cristalline de s'élargir [129]. En raison de l'humidité excessive, le gonflement devient encore plus critique.

Les analyses quantitatives des phases à l'aide de l'affinement de Rietveld, le diagramme DRX sont présentées dans le Tableau 11. Le sol 1 est indexé par quartz (40,6 %), kaolinite (32,3 %), albite (15,1 %) et calcite (10,1 %) comme phases majeures. Tandis que le sol 2 est majoré par du quartz (54,8 %), muscovite (26,2 %), montmorillonite (6,9 %) et albite (4,2 %).

Le sol 3 (sable limoneux avec gravier) est un sable naturel français fabriqué par la Société des Sablières du Cotentin (SABCO, Lieusaint). Il est composé de sable siliceux naturel (quartz). Les grains sont lavés et de forme arrondie.

Les propriétés de retrait des sols seront influencées par la présence de muscovite, albite, kaolinite et illite. En raison de leur petit espace interfoliaire, ces cristaux ont peu de molécules d'eau entre leurs couches [129]. Par conséquent, lorsqu'ils sont immergés dans l'eau, ils présentent un faible gonflement intercrystallin. Par conséquent, ces quatre espèces se rétractent beaucoup moins lors du séchage que les argiles smectiques comme la montmorillonite [126].

Ainsi, les phases principales de ces trois sols sont des minéraux primaires. Le quartz est le premier minéral des sols. Le mica, les feldspaths, les oxyhydroxydes de fer et la limonite sont d'autres minéraux couramment rencontrés, mais en plus faible concentration [130].

Tableau 11: Valeurs raffinées des paramètres du réseau, du volume unitaire de la cellule des sols 1 et 2 utilisés. Un écart-type est indiqué entre parenthèses sur le dernier chiffre.

Phases	Référence COD	Sol 1 V (%)	Sol 2 V (%)
Quartz SiO_2	1526860	40,6 (2)	54.8 (5)
Muscovite $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$	1100011	-	26.2 (5)
Montmorillonite $(\text{Na},\text{Ca})_{0,3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	1100106	-	6.9 (2)
Albite $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	1556999	15,1 (2)	4.2 (2)
Kaolinite $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	1011045	32,3 (2)	2.1 (3)
Goethite $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$	2211652	-	2.0 (3)
Rutile TiO_2	1532819	-	1.6 (3)
Illite $(\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})]$	2300190	-	1.1 (2)
Huntite $\text{Mg}_3\text{Ca}(\text{CO}_3)_4$	1000046	-	1.1 (2)
Calcite CaCO_3	1547347	10,1 (3)	-

2.1.2. Fibres végétales : pailles de lin et pailles de roseau

La mise en œuvre de fibres végétales comme renfort dans les matériaux de construction présente de multiples avantages. Les fibres végétales sont très largement disponibles à faible coût. Leur utilisation dans la construction permet de créer de nouvelles opportunités aux fibres qui sont souvent des coproduits agricoles. D'autre part, étant de nature renouvelable, neutres en termes d'émissions de CO_2 et peu consommatrices d'énergie lors de leur production, les fibres végétales permettent de réduire les impacts environnementaux des matériaux et systèmes les incorporant.

Les fibres d'origine végétale sont nombreuses : les poils séminaux des graines comme le coton, les fibres libériennes issues des tiges comme le lin et le chanvre, les feuilles ou troncs comme le sisal et l'abaca, et les enveloppes de fruits comme la noix de coco [131].

Dans le présent travail, deux fibres ont été utilisées, de la paille de lin et de la paille de roseau. La paille de lin est utilisée dans la production de la bauge alors que la paille de roseau l'est pour la terre allégée. Ces choix ont été faits en se basant sur l'étude bibliographique et sur la disponibilité locale. Ces deux pailles proviennent de la plaine de Caen (Normandie).

Rappelons que le lin est une plante annuelle dont la tige atteint 0,6 à 1,20 m de hauteur et 1 à 3 mm de diamètre largement produite en France, leader de la production mondiale à hauteur de 80 % [132].

Quant au roseau, c'est une plante vivace, aux tiges dressées, de 1,5 à 3 m de haut, et de 10 mm de diamètre. Si la présence du roseau se retrouve pratiquement dans toute la France, la Camargue regroupe à elle seule les trois quarts des bottes de roseaux françaises utilisées pour la construction. Cependant, la Normandie compte 3 exploitations qui rendent le roseau disponible dans la région [133].

La structure des fibres peut être analysée à différentes échelles. A l'échelle macroscopique, de la périphérie vers l'intérieur, les pailles utilisées sont composées de l'écorce, du phloème, du xylème et d'un vide central. À l'échelle microscopique, les fibres comportent des couches concentriques qui diffèrent par leur épaisseur, leur composition chimique et leur structure. Les roseaux sont constitués de 3 couches circulaires et de multiples pores de tailles différentes, allant de 1 à 150 μm , voir Figure 31. Sur chaque couche, il y a également la répétition d'un noyau de porosité qui est complètement différent des autres couches. Les pores de la paille de lin sont plus uniformes, ressemblant à un nid d'abeilles avec des tailles comprises entre 5 et 40 μm , voir Figure 31. Ces fibres sont composées de microfibrilles qui, à l'échelle nanoscopique, sont composées de chaînes de cellulose noyées dans une matrice amorphe constituée principalement d'hémicellulose, de lignine et de pectine, comme montré sur la Figure 32.

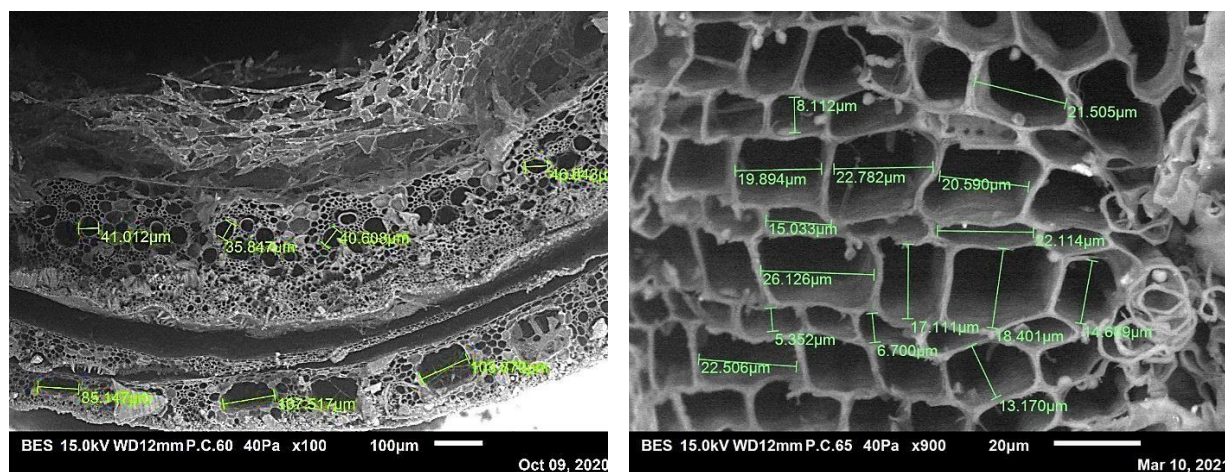


Figure 31: Image MEB de la paille de roseau (à gauche) et la paille de lin (à droite).

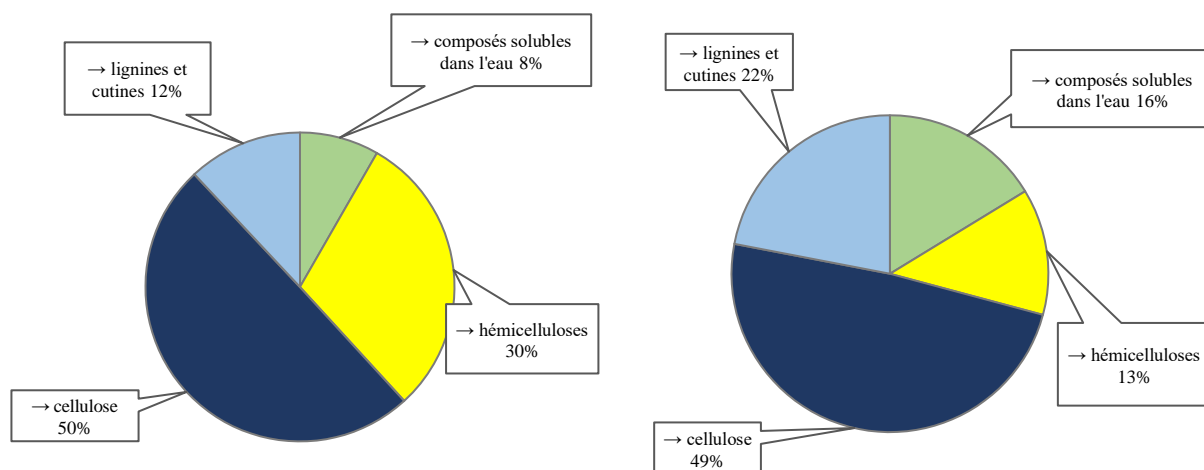


Figure 32: Fraction biochimique de la paille de roseau (à gauche) et de la paille de lin (à droite).

2.1.3. Matériaux à changement de phase (PCM)

La sélection du PCM à introduire dans le mélange terre-paille est soumise à plusieurs critères, à savoir : la chaleur latente de changement de phase, les propriétés chimiques et surtout la température de

fusion/solidification. En effet, le choix de la température de fusion/solidification doit tenir compte du confort thermique des occupants et des conditions climatiques typiques de la localisation du bâtiment [93]. Le marché propose des PCM couvrant une large gamme de températures opérationnelles. Cependant, les PCM dédiés aux applications dans le domaine de la construction nécessitent un environnement de température adéquat qui induit un changement de phase, accroissant l'efficacité énergétique et le potentiel d'économie d'énergie des bâtiments. Kalnæs et Jelle [113] recommandent trois plages de température: jusqu'à 21 °C pour les applications de refroidissement, 22-28 °C pour les applications de confort thermique humain, et 29-60 °C pour les applications d'eau chaude.

En France, la température moyenne varie entre 0 et 30 °C sur une année [134]. Par conséquent, pour pouvoir satisfaire aux exigences climatiques rencontrées, la recherche initiale se limite aux PCM ayant une température de fusion comprise dans la zone des températures rencontrées. Par ailleurs, pour garantir le confort humain, la température de changement de phase du PCM doit être comprise entre environ 16 et 25 °C [135]. D'autre part, l'utilisation de PCM microencapsulés est privilégiée plutôt que des PCM en vrac pour éviter l'écoulement de la matière dans le matériau après sa fusion et offrir également une plus grande surface de transfert de chaleur par unité de volume [73].

Selon les critères susmentionnés et les PCM disponibles dans le commerce, le Nextek 24D et le Micronal 5038 X ont démontré des propriétés thermiques favorables. Leur température de fusion (24 °C) est convenable au climat français et les applications de confort thermique humain. Le noyau des deux PCM est constitué de paraffine purifiée alors que l'enveloppe est un polymère. Le PCM Nextek 24D est microencapsulé avec un copolyester aromatique thermodurcissable et le Micronal 5038 X avec un polymère de polyméthacrylate de méthyle hautement réticulé [71]. La composition exacte du PCM relève du savoir-faire de Microtek Lab. et n'est pas rendue publique. Cependant, les caractéristiques données par les fournisseurs ont été vérifiées. Les propriétés étudiées sont : la densité (pycnomètre à hélium), la distribution granulométrique (granulométrie laser), la chaleur latente de changement de phase. Les différents résultats sont présentés dans le Tableau 12 et les Figure 33 et Figure 34.

Tableau 12: Propriétés physiques des PCM étudiés.

PCM	Taille des particules [µm]	Masse volumique [kg/m ³]	Température [°C]		Chaleur latente [J/g]	
			Fusion (Pic)	Solidification (Pic)	Fusion	Solidification
Nextek 24D	0-80	300-400	18,5 (22,5)	20,7 (19)	168	170
Micronal 5038 X	50-300	300-400	21 (24,5)	23,2 (21)	97	98

Note : Vitesse de balayage calorimétrique différentiel DSC fixée à 1 K/min.

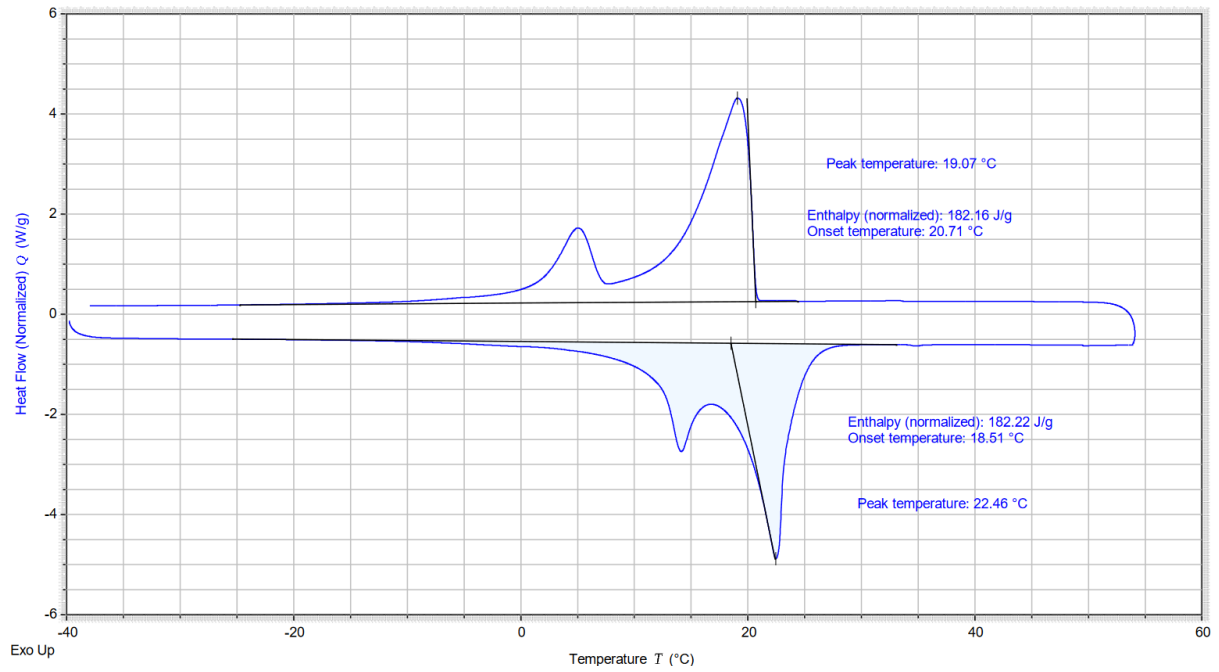


Figure 33: Courbe DSC du Nextek 24D [71].

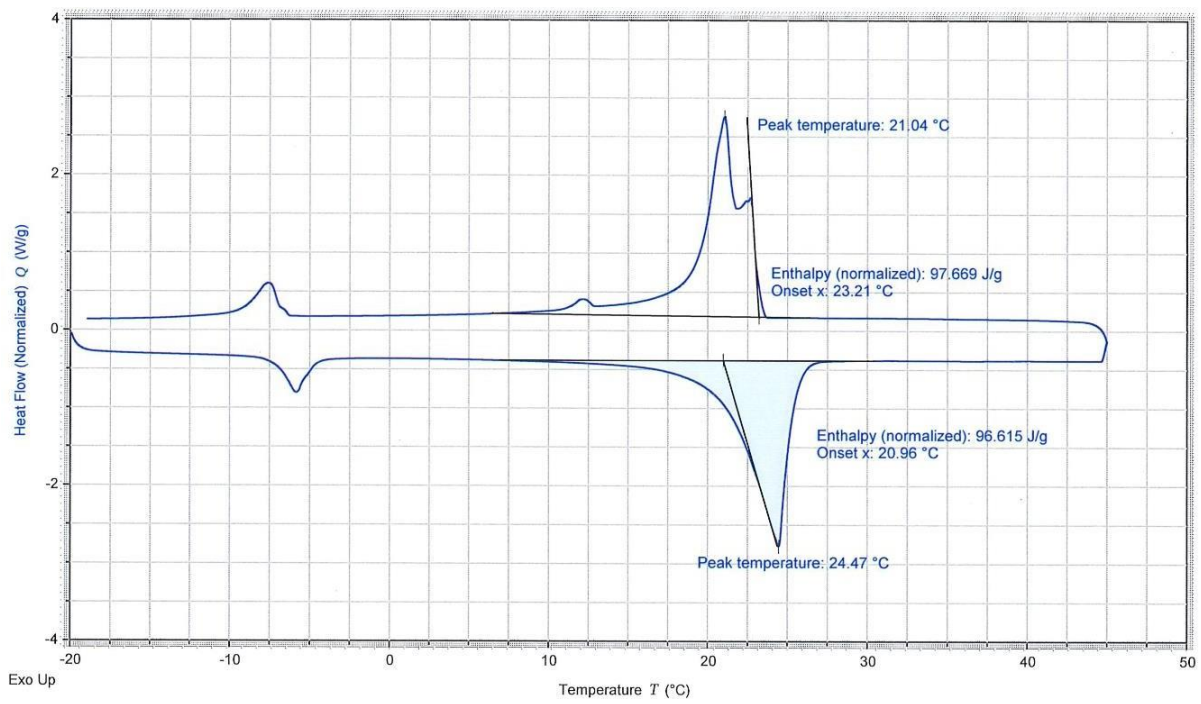


Figure 34: Courbe DSC du Micronal 5038 X [71].

2.2. Méthodologie de préparation des échantillons

2.2.1. Préparation et traitement des matières premières

Avant de détailler le processus de préparation des différents échantillons destinés aux caractérisations physiques, thermiques, mécaniques et hygroscopiques, il convient de préciser d'abord les traitements que les sols ont subis en amont. Trois différents sols ont été utilisés dans cette étude, un sol plutôt limoneux avec plus d'argile (sol1), un sol plutôt limoneux avec moins d'argile (sol 2) et un troisième sol plutôt sableux (sol 3). Au regard de leurs consistances et textures, les sols 1 et 2 sont d'abord broyés afin d'obtenir des particules ayant un diamètre maximal de 2 mm. Ensuite, ces sols broyés ainsi que le sol 3 sont séchés dans une étuve ventilée à 40 °C pendant 2 semaines.

Comme tous les sols ne sont pas argileux ou limoneux, mais constitués d'un mélange d'argile, de limon et de sable, ainsi les sols peuvent être mélangés pour se conformer aux mélanges recommandés. Par conséquent, pour les formulations étudiées, le sol contenant plus d'argile mais encore homogène dans les différents diamètres de particules a été sélectionné pour la terre légère (sol 1), pour assurer la liaison compte tenu de la quantité de fibre ajoutée. D'autre part, et pour la préparation de la bauge, le sol grossier (sol 3) a été mélangé avec le sol fin (sol 2) pour obtenir un sol homogène et adapté aux utilisations structurelles. Donc, le sol 2 et le sol 3 ont été mélangés avec des proportions 2/3 et 1/3 respectivement.

Par ailleurs, deux types de fibres végétales sont utilisés : la paille de lin et la paille de roseau. La paille de roseau est coupée à la main à une longueur de 5 ± 1 cm. La paille de lin est coupée aussi manuellement à des longueurs d'environ 7 cm. Toutes ces fibres, préalablement séchées, ont été couvertes et stockées à température ambiante, c'est-à-dire à 20 °C jusqu'à la préparation des mélanges terre-paille-PCM. De même, le stockage des PCM s'est fait également à température ambiante. Les formulations sont présentées dans le Tableau 13.

Tableau 13: Formulations étudiées [%wt].

Formulation [kg/m ³]	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Paille de roseau	Paille de lin	Eau	Nextek 24D	Micronal 5038 X	
Terre allégée	TA0	100	-	-	25	-	100	0	-
	TA2	100	-	-	25	-	100	2	-
	TA5	100	-	-	25	-	100	5	-
	TA10	100	-	-	25	-	100	10	-
	TA20	100	-	-	25	-	100	20	-
Bauge	B0		67	33	-	2,5	25	-	0
	B2		67	33	-	2,5	25	-	2
	B5		67	33	-	2,5	25	-	5
	B10		67	33	-	2,5	25	-	10

Note : TA et B = Terre allégée et bauge, le numéro indique la teneur en PCM.

Le pourcentage de la paille et de l'eau est référé à la masse de la terre.

Le pourcentage de PCM est référé à la masse de la terre et de la paille.

2.2.2. Préparation des échantillons

Afin d'assurer une distribution homogène, le sol et le PCM, avec leur masse correspondante, sont d'abord mélangés manuellement à l'état sec dans une cuve. Puis, le malaxage s'est fait dans une bétonnière, après avoir ajouté la quantité d'eau nécessaire jusqu'à l'obtention d'une barbotine. Ensuite, les fibres séchées sont ajoutées progressivement et malaxées pendant 120 secondes. À la fin, le mélange terre-paille-PCM est ensaché et stocké à température ambiante pendant une journée pour permettre aux pailles d'absorber de l'eau et que le mélange soit le plus homogène. La méthode de préparation des échantillons est la même pour les différents mélanges étudiés ici.

Le lendemain, des moules prismatiques (22 cm x 22 cm x 4 cm) et des moules cylindriques (Ø11 cm x hauteur 22 cm), préalablement huilés pour faciliter le décoffrage, sont remplis. Les mélanges sont compactés manuellement avec une dame de compactage en bois.



Figure 35: Protocole de confections des éprouvettes.

Ensuite, les moules remplis avec les différents mélanges sont conservés à température ambiante pendant une journée avant d'être placés dans une étuve à 40 °C pour éviter un séchage brusque. Après deux jours de séchage dans l'étuve, les moules cylindriques sont complètement retirés. Les moules prismatiques sont graduellement retirés (un côté est enlevé tous les deux jours) tout en maintenant les échantillons à 40 °C. Au total, le processus de séchage dans l'étuve dure entre 2 et 3 semaines. À l'issue de ce processus, les échantillons sont placés dans des conditions ambiantes de 20 °C et 50 % d'humidité relative. Ce protocole est détaillé par les images de la Figure 35. La caractérisation des échantillons ainsi préparés commence lorsque l'équilibre pondéral est atteint (la variation de masse

entre deux pesées quotidiennes est inférieure à 0,1 %). Le Tableau 14 résume les différents essais effectués, les normes respectées et la taille des échantillons testés pour toutes les formulations.

Tableau 14: Essais, normes et dimensions des échantillons formulés pour les différents essais : thermiques, mécaniques et hygroscopiques.

Essai	Norme	Dimensions [cm]	Paramètre mesuré
Porosité	ISO 5017 [136]	Ø11x4	p_0 [%]
Isothermes de sorption/désorption	ISO 12571 [137]	3x3x3	w [%]
Facteur de résistance à la vapeur d'eau	ISO 12572 [138]	Ø15x6	μ [-]
Conductivité thermique	ISO 8301 [139]	22x22x4	λ [W/(m.K)]
Capacité thermique massique	ISO 11357-4 [140]	40 [μ L]	C_p [J/(kg.K)]
Résistance à la compression	NF EN 13286-41 [141]	Ø11x22	R_c [MPa]

2.3. Technique de caractérisation des échantillons

2.3.1. Propriétés hygroscopiques

2.3.1.1. Isotherme de sorption/désorption

Il est bien connu que la terre allégée, à l'instar de tous les matériaux à base de terre, présente un réel potentiel pour améliorer le confort thermique et réguler l'humidité à l'intérieur des bâtiments. Dans cette section, l'interaction des mélanges terre-paille-PCM avec la vapeur d'eau de l'ambiance est présentée.

Pour y parvenir, la technique de sorption dynamique de la vapeur (DVS) est exploitée. Dans la présente étude, les isothermes de sorption/désorption des matières premières (sol, fibre, PCM) et des mélanges sont étudiés selon la norme ISO 12571 [137]. Pour ce faire, un analyseur de sorption/désorption ProUmid SPSx-1 μ a été utilisé, voir Figure 36. Cet équipement permet une mesure précise de la masse des échantillons et de la cinétique de sorption grâce à une balance de précision intégrée et un contrôle rigoureux de la température et de l'humidité. Les courbes des isothermes sorption/désorption sont déterminées à partir de la teneur en humidité des échantillons pour différents paliers successifs (montée et descente) de l'humidité relative ambiante.



Figure 36: Appareil de mesure de la sorption dynamique de la vapeur.

Avant de commencer l'analyse d'adsorption, les échantillons sont d'abord séchés dans une étuve jusqu'à atteindre un poids constant (variation du poids est inférieure à 0,1 %). Pour les matières premières, des échantillons de masse supérieure à 10 g sont considérés. Pour les matériaux composites terre-paille-PCM, des échantillons mesurant environ 30x30x30 mm³ sont étudiés.

Dans l'analyseur ProUmid SPSx-1 μ , les échantillons sont exposés à une atmosphère dont l'humidité relative a été variée de 10 % à 90 % en 5 étapes, tout en maintenant la température d'essai à 23 °C. La norme ISO 12571 [137] exigeant l'utilisation d'au moins quatre atmosphères différentes entre 30 et 90 % d'humidité relative a été respectée. Conformément à cette norme, l'échantillon est considéré en équilibre quand la variation de sa masse est inférieure à 0,1 % pour trois pesées consécutives réalisées à au moins 24 h d'intervalle.

2.3.1.2. Perméabilité à la vapeur d'eau

Ce paramètre traduit la capacité d'un matériau à être traversé par la vapeur d'eau. Il représente le rapport de la quantité de vapeur d'eau traversant un matériau par unité d'épaisseur, de temps et de différence de pression de vapeur existant de part et d'autre du matériau. Dans cette étude, la perméabilité à la vapeur d'eau des différentes formulations a été mesurée selon la norme ISO 12572 [138] en utilisant la méthode de la coupelle sèche. Les mesures de la perméabilité à la vapeur d'eau par la méthode de la coupelle sèche fournissent des informations sur le comportement du matériau lorsque le transfert d'humidité est dominé par la diffusion de la vapeur. Cette méthode sèche nécessite de créer un gradient d'humidité entre l'intérieur de la coupelle (≈ 0 % HR) et l'extérieur (≈ 50 % HR) à travers l'échantillon, comme illustré à la Figure 37.

Les éprouvettes sont scellées sur la coupelle d'essai contenant un déshydratant (coupelle sèche), en l'occurrence du gel de silice. L'ensemble est ensuite placé dans une chambre d'essai à température et humidité contrôlées à 23 °C et 50 % HR. En raison de la différence de pression partielle de vapeur entre la coupelle et la chambre, la vapeur d'eau diffuse à travers les spécimens d'essai perméables. Des pesées périodiques de l'assemblage sont effectuées pour déterminer le débit de transmission de la

vapeur d'eau en régime permanent. Tous les échantillons ont été preconditionnés à 23 °C et 50 % d'humidité relative pendant une période suffisante pour stabiliser leur poids jusqu'à ce que trois relevés quotidiens successifs de leur poids ne diffèrent pas de plus de 5 %.

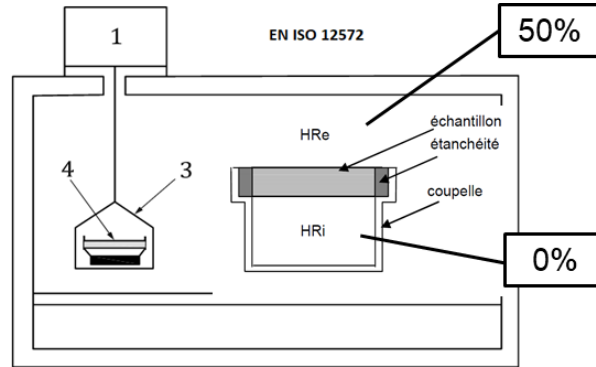


Figure 37: Illustration du dispositif de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau.

Le flux de vapeur à travers le matériau est obtenu en pesant à l'aide d'une balance (1) l'assemblage (3) de la coupelle contenant l'échantillon et le gel (4) (Figure 37). En régime permanent, le flux de vapeur d'eau (G) à travers l'échantillon est donné par la pente de la ligne de régression de la masse de l'ensemble coupelle-échantillon en fonction du temps. Ce résultat est obtenu après avoir éliminé la phase initiale non linéaire de l'essai.

Ainsi, la densité de flux (ou taux de transmission) de la vapeur (g) est calculée par l'équation (2), où A représente la surface de l'échantillon exposé et G le flux de vapeur d'eau.

$$g = \frac{G}{A} \quad (2)$$

Dans l'équation (3), on peut voir que la résistance à la vapeur d'eau (Z) peut être calculée à partir de la perméance à la vapeur d'eau (W). Cette dernière dépend, entre autres, de la différence de pression partielle de vapeur d'eau entre les deux côtés de l'échantillon (ΔP_v).

$$Z = \frac{1}{W} = \frac{A \times \Delta P_v}{G} \quad (3)$$

Puis, à partir de l'équation (4), la résistance à la vapeur d'eau de la couche d'air présente dans la coupelle (Z_a) est obtenue en connaissant l'épaisseur de la couche d'air (d_a) et la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air à la pression atmosphérique (δ_a) qui est égale à $2 \times 10^{-10} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$.

$$Z_a = \frac{d_a}{\delta_a} \quad (4)$$

La perméance à la vapeur d'eau corrigée W_c est obtenue en utilisant l'équation (5).

$$W_c = \frac{1}{Z - Z_a} \quad (5)$$

La perméabilité à la vapeur d'eau de l'échantillon (δ) peut être déterminée en utilisant l'équation (6) avec e comme étant l'épaisseur de l'échantillon.

$$\delta = W_c \times e \quad (6)$$

Finalement, le facteur de résistance à la vapeur d'eau de l'échantillon (μ) est obtenu par l'équation suivante (7).

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (7)$$

La détermination des isothermes de sorption de l'humidité et de la perméabilité à la vapeur d'eau permet d'évaluer l'impact du PCM sur le comportement hygroscopique des mélanges terre-paille.

2.3.2. Propriétés thermiques

Pour utiliser un matériau donné comme isolant thermique et/ou accumulateur de chaleur dans l'enveloppe d'un bâtiment, certaines propriétés thermiques doivent être connues. Parfois, ces propriétés doivent satisfaire des valeurs seuils qui peuvent être définies dans des réglementations, comme la RT2012 ou la RE2020, etc. Dans le présent travail, notre intérêt porte principalement sur deux propriétés : la conductivité thermique et la capacité thermique massique. Les méthodologies utilisées pour déterminer ces deux paramètres sont décrites ci-après.

2.3.2.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique est une propriété physique qui caractérise l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur d'un point chaud à un point froid. La méthodologie appropriée pour déterminer cette propriété dépend de la nature, de la forme et de la taille des échantillons à étudier. Dans la présente étude, les mesures de conductivité thermique sont réalisées avec l'appareil HFM 436 Lambda de chez Netzsch. Cette technique consiste à soumettre le matériau, de surface (A) et d'épaisseur (e), à un gradient de température et de mesurer le flux de chaleur le traversant quand le régime permanent est atteint, voir Figure 38. Le flux de chaleur entrant et sortant du matériau est mesuré à l'aide de deux capteurs de flux thermique placés dans les plaques chaude et froide en contact respectivement avec la surface supérieure et inférieure de l'échantillon. La température sur les deux surfaces de l'échantillon est mesurée avec des thermocouples de type K. Lorsque l'état d'équilibre est atteint et que le flux thermique (Q) est constant, la conductivité thermique du matériau est calculée en utilisant la loi de Fourier [142] à travers l'équation (8). La précision de l'appareil est d'environ 3 %.

$$\lambda = \frac{Q e}{A \Delta T} \quad (8)$$

Ici, des mesures ont été effectuées sur des échantillons prismatiques de 22 x 22 x 4 cm³ à différentes températures moyennes : 14, 24 et 34 °C. Ces températures ont été choisies en fonction du matériau à changement de phase et sa température de fusion/cristallisation. Une mesure dans la plage de changement de phase (24 °C) et deux autres mesures hors changement de phase, en état solide (14 °C) et état liquide (34 °C). La différence de température entre les deux côtés des échantillons (Figure 38) est fixée à une valeur de 10 °C pour chaque mesure. Avant le test, les échantillons sont préconditionnés à la température et l'humidité du laboratoire (23 °C et 50 % HR)

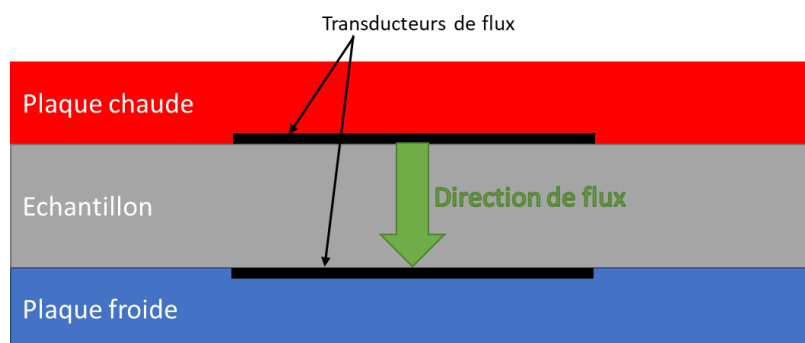


Figure 38: Principe de mesure de la conductivité thermique avec l'appareil Netzsch HFM 436 Lambda.

2.3.2.2. Capacité thermique massique

La capacité thermique massique est mesurée par la technique de calorimétrie différentielle à balayage. Cette technique repose sur la différence de flux thermique échangé par une référence et un échantillon du matériau à caractériser, maintenus dans les mêmes conditions, pendant un balayage de température. La différence de puissance W est liée à la capacité thermique massique à pression constante (C_p) par l'équation (9) :

$$C_p = \frac{1}{m} \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (9)$$

où ∂H représente le flux enthalpique et m désigne la masse de l'échantillon.

Les changements de phase constatés dans la plage de température définie correspondent à des processus endo- ou exothermiques, autrement dit, ils produisent respectivement une absorption ou un dégagement de chaleur. Par conséquent, une étude quantitative des transitions de phase peut être réalisée. On peut distinguer notamment :

- La cristallisation par un pic exothermique,
- La fusion par un pic endothermique.

Dans le présent travail, l'appareil utilisé est l'analyseur calorimétrique différentiel DSC 2920 commercialisé par TA Instruments. Ce dernier se compose d'un seul four à température contrôlée contenant deux bancs de mesure. Sur l'un d'eux repose le creuset contenant l'échantillon et sur l'autre repose le creuset de référence, généralement vide, voir Figure 39. Ces creusets dont le volume est de 40 microlitres sont en aluminium. La différence de température entre les deux creusets tout au long du programme de chauffe est enregistrée. Le flux de chaleur nécessaire pour maintenir ces deux creusets à la même température est ensuite déterminé. Les résultats présentés sur les thermogrammes analysés représentent le flux de chaleur en fonction de la température. Toutes les mesures sont effectuées sous une atmosphère contrôlée et inerte (hélium).

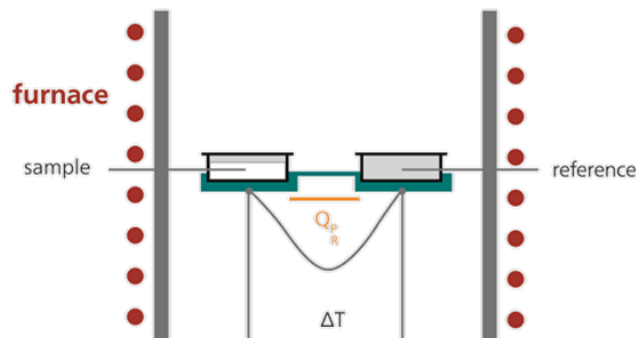


Figure 39: Dispositif du système de mesure par DSC

Comme mentionné ci-avant, la quantité de matière nécessaire pour effectuer une mesure est faible (10 μL), vu le volume des creusets. Ainsi pour des matériaux hétérogènes, la réalisation de mesures directes n'est pas évidente. Comme dans ce travail, les études portent sur des mélanges à plusieurs composants, la capacité thermique massique est calculée en utilisant une loi de mélange. Pour ce faire, le C_p des différents composants constitutifs à l'état brut est obtenu par la technique DSC. Pour remonter à la capacité thermique massique des mélanges, l'équation (10) est utilisée à chaque température d'étude [33].

$$C_p = F_s \cdot C_{p_s} + F_f \cdot C_{p_f} + F_{PCM} \cdot C_{p_{PCM}} \quad (10)$$

Dans cette équation, C_p et F sont respectivement la capacité thermique massique du matériau sec et la fraction massique du composant dans le mélange. Les indices s , f et PCM représentent respectivement le sol, les fibres et le matériau à changement de phase. Les fractions massiques des matériaux constitutifs sont calculées à l'ambiance du laboratoire ($\approx 50\%$ HR et 20°C).

Dans le présent travail, les mesures de C_p sont effectuées par la technique DSC en respectant la norme ISO 11357-4 [140]. Les essais ont été réalisés en augmentant la température de -10°C à 50°C en continu. La vitesse de chauffage était de $1^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$.

2.3.3. Propriétés physico-mécaniques

2.3.3.1. Propriétés physiques

La porosité et la densité apparente sont les propriétés physiques qui impactent le comportement hygrothermo-mécanique des matériaux de construction. Leur connaissance est donc d'une importance capitale. Comme l'utilisation d'eau n'est pas possible avec les matériaux à base de terre, la détermination de ces propriétés physiques se fait par immersion de petits échantillons dans une huile non mouillante en respectant la norme NF ISO 5017 [136]. Dans ce travail c'est du pétrole désaromatisé que nous avons utilisé.

Tout d'abord, les échantillons sont saturés sous vide dans un dessiccateur pendant 24 heures au moins, ce qui permet au liquide de remplacer l'air dans les pores sans interagir avec l'échantillon.

Par la suite, les échantillons sont pesés en étant immergés dans l'huile et puis dans l'air. Enfin, les échantillons sont séchés à l'étuve à $105 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à l'obtention d'une masse constante, soit lorsque deux pesées successives, avant et après un séjour de 24 heures à l'étuve, ne diffèrent pas de plus de $0,05\%$. Cette masse est alors considérée comme la masse sèche. Cette méthode permet d'obtenir le volume des vides initialement remplis d'huile ainsi que la densité de l'échantillon, par l'intermédiaire d'une différence de masse entre l'état saturé et l'état sec. De ce fait, la porosité accessible p_0 est donnée par l'équation (11) et la masse volumique apparente par l'équation (12).

$$p_0 = \frac{M_a - M_s}{M_a - M_h} \quad (11)$$

$$\rho_{sp} = \frac{M_s}{M_a - M_h} \times \rho_h \quad (12)$$

avec les notations suivantes :

- M_s : la masse de l'échantillon sec.
- M_a : la masse de l'échantillon saturé pesé dans l'air.
- M_h : la masse de l'échantillon saturé pesé dans l'huile.
- ρ_{sp} : la masse volumique apparente de l'échantillon.
- ρ_h : la masse volumique apparente d'huile.

2.3.3.2. Résistance à la compression non confinée

Pour déterminer la résistance à la compression uni-axiale non confinée (UCS) des mélanges à base de terre, des essais ont été réalisés à l'aide d'une presse INSTRON SCHENCK, voir Figure 40. Ainsi, une charge croissante est appliquée à l'éprouvette jusqu'à la rupture ou pour une déformation de 30 %. La résistance à la compression uni-axiale non confinée a été mesurée sur des éprouvettes cylindriques de dimensions $\text{Ø}11 \times \text{H}22$ cm. Ces mesures ont été effectuées conformément aux recommandations de la norme NF EN 13286-41 [141].



Figure 40: La presse d'essai INSTRON SCHENCK.

Les essais sont réalisés à une vitesse de chargement imposée de 0,05 kN/s. Les courbes contrainte-déformation sont déduites des mesures des efforts et de déplacement enregistrés par les capteurs intégrés à la presse. L'élanement de l'échantillon, rapport entre la hauteur et du diamètre de l'éprouvette (H/D), est de 2. La résistance à la compression est calculée selon l'équation (13) :

$$R_{c,i} = \frac{F_{c,i}}{S} \quad (13)$$

avec :

- $R_{c,i}$: résistance à la compression à la déformation i (MPa).
- $F_{c,i}$: charge de compression pour la déformation i (N).
- S : surface transversale de l'éprouvette (mm^2).

2.3.4. Dispositif d'étude de la réponse thermique d'un matériau avec des conditions aux limites variables

La réponse thermique aux conditions aux limites changeantes correspond à la capacité d'un matériau à amortir les pics de chaleur et de consommation d'énergie. En d'autres termes, il s'agit de la capacité du matériau à stabiliser la température intérieure d'un bâtiment dans la zone de confort thermique des occupants.

Dans un premier temps, les deux faces d'un échantillon étudié ($22 \times 22 \times 8 \text{ cm}^3$) sont exposées à une sollicitation thermique similaire. Ensuite, cet échantillon est placé dans une autre ambiance avec des conditions thermiques différentes. L'évolution de la température de l'échantillon en fonction du temps est suivie en continu. Pour ce faire, un thermocouple de type T a été placé au cœur de l'échantillon et relié à la station d'acquisition de données Keithley 3706A.

Dans un second temps, les deux faces de l'échantillon étudié ($22 \times 22 \times 4 \text{ cm}^3$) sont soumises à deux ambiances différentes. Pour étudier la réponse thermique du matériau dans ce cas, un dispositif expérimental a été conçu et construit. Ce dispositif expérimental permet de suivre la réponse thermique d'un échantillon lorsqu'il est soumis à des fluctuations de la température externes. Ainsi, l'échantillon étudié constitue la séparation entre 2 ambiances, voir Figure 41. Une ambiance extérieure sous une température contrôlée et une ambiance intérieure bien isolée de toutes les faces par du polystyrène extrudé XPS, sauf celle recevant l'échantillon. La température de la face intérieure de l'échantillon a été suivie en continu dans le temps. En considérant que la température de changement de phase du PCM est égale à $24 \pm 2 \text{ °C}$, des cycles thermiques extérieurs ont été imposés entre 16 et 29 °C. La vitesse de changement de température est égale à 1,2 °C/h.

L'humidité est contrôlée à 50 % pour les différents essais. Ces mesures permettent de comprendre le comportement thermique des mélanges à base de terre et d'analyser l'influence de l'incorporation des PCM sur la température intérieure des bâtiments.

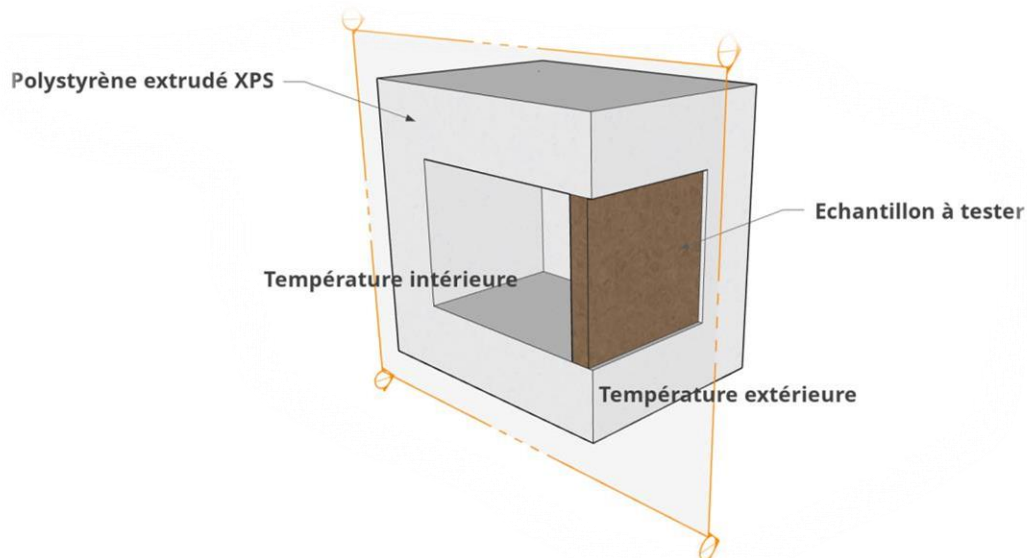


Figure 41: Coupe d'une vue 3D du dispositif expérimental permettant l'étude de la réponse thermique d'un matériau à des conditions aux limites variables.

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre, les matériaux utilisés sont caractérisés et les méthodes expérimentales sont présentées. Le choix des matériaux est basé sur la bibliographie. Les sols contenant plus d'argile sont dédiés au sol allégé tandis que ceux contenant des particules grossières pour la bauge. Les PCM sont choisis en fonction du climat moyen de la France.

Les essais ont été réalisés dans le laboratoire de l'ESITC Caen. En revanche, deux essais ont été réalisés dans d'autres établissements : La minéralogie des sols a été réalisée au CRISMAT de l'Université de Caen Normandie tandis que les mesures DSC ont été réalisées à l'IMMM de l'Université du Mans.

Chapitre **3**

**Effet de l'incorporation de PCM
sur les propriétés de la terre
allégée**

Chapitre 3 : Effet de l'incorporation de PCM sur les propriétés de la terre allégée

3.1. Introduction

Construire avec des matériaux à base de terre représente une véritable alternative qui peut présenter de nombreux avantages, notamment la recyclabilité des principaux composants et la faible empreinte carbone. La terre est une ressource naturelle qui est souvent largement disponible à travers le globe. Presque tous les sols minéraux qui contiennent de l'argile peuvent être utilisés pour la construction [18]. De nos jours, les propriétés intéressantes de la terre, c'est-à-dire du sol brut, consistent principalement en sa capacité à réguler l'hygrométrie du bâtiment à faible coût économique et environnemental [28,32,34,53,143,144]. Cette régulation naturelle de l'humidité est une qualité que l'on ne retrouve pas dans les matériaux de construction conventionnels tels que le béton.

Ce chapitre vise l'étude de la combinaison de la capacité de la terre allégée à réguler l'humidité et sa faible conductivité thermique avec la capacité des PCM à stocker la chaleur. En effet, comparée à d'autres matériaux à base de terre, la terre allégée présente une faible densité qui confère au matériau une amélioration de son pouvoir d'isolation thermique. Dans un premier temps, le PCM microencapsulé Nextek 24D est introduit dans des mélanges terre-paille. Des mélanges contenant 0 %, 2 %, 5 %, 10 % et 20 % de PCM (%wt) sont formulés, voir Tableau 15. Ensuite, les comportements mécanique, thermique (conductivité thermique, capacité thermique massique et réponse thermique à des conditions extérieures variables) et hygroscopique (isotherme de sorption/désorption, perméabilité à la vapeur d'eau) des mélanges terre-paille sont analysés en considérant les différents dosages en PCM.

Tableau 15: Formulations de la terre allégée étudiées [%wt.].

Formulation	Sol 1	Paille de roseau	Eau	Nextek 24D	
Terre allégée	TA0	100	25	100	0
	TA2	100	25	100	2
	TA5	100	25	100	5
	TA10	100	25	100	10
	TA20	100	25	100	20

Note : TA = Terre allégée, le numéro indique la teneur en PCM.
Le pourcentage de la paille et de l'eau est référé à la masse de la terre.
Le pourcentage de PCM est référé à la masse de la terre et de la paille.

3.2. Propriétés physico-mécaniques

3.2.1. Porosité

La porosité est un paramètre qui peut influencer le comportement mécanique, thermique et hygroscopique des matériaux. Ainsi, la porosité ouverte ou la porosité accessible à l'eau est le premier paramètre étudié. Les différentes formulations ont été préparées pour avoir une même masse volumique (600-700 kg.m⁻³) [145]. Ainsi, la porosité en sera affectée.

Le Tableau 16 illustre la variation de la porosité ouverte de la terre allégée en fonction de la teneur en PCM. La porosité ouverte diminue de manière proportionnelle à la quantité de PCM ajoutée à la terre allégée. La diminution de la porosité s'explique par le fait que les particules de PCM (0-80 µm) comblent en partie les pores au sein du mélange.

Tableau 16: Porosité ouverte mesurée de la terre allégée pour les différents teneurs en PCM.

Formulation	TA0	TA2	TA5	TA10	TA20
Porosité [%]	58	57	56	52	50

3.2.2. Résistance à la compression

Pour bien saisir l'impact de l'incorporation des PCM sur la résistance mécanique des mélanges terre-paille, des tests de résistance à la compression sont effectués. Les courbes contrainte-déformation obtenus sur les différentes formulations sont reportées sur la Figure 42. Sur cette figure, il peut être remarqué que les courbes des contrainte en compression-déformation ont tendance à avoir une forme polynomiale de degré 2. Comme les matériaux étudiés sont très déformable, aucune rupture n'a été observée lors des différents essais mécaniques. Cette caractéristique est due à la teneur élevée en fibres du composite. Par conséquent, la contrainte maximale n'est pas un indicateur pertinent pour étudier la résistance à la compression des échantillons mais plutôt la résistance à un niveau de déformation précis [25,35,36,40]. Au meilleur de notre connaissance, aucune norme ne fixe une valeur de déformation à laquelle la résistance à la compression doit être étudiée. La comparaison du comportement mécanique des matériaux à base de terre est limitée par leur déformation. En ce qui concerne la littérature, dans le projet CobBauge, la résistance à la compression a été étudiée à une déformation de 2 % [37]. Simons et al. [58] et Cerezo [62] ont étudié la résistance à la compression à une déformation de 1,5 %. Certains ont choisi une déformation plus élevée comme 18 %. D'autres choisissent d'étudier la résistance à la compression en fonction de la déformation à divers taux de déformation à savoir 1,5 % ou 7,5 % [35]. Par conséquent, dans le présent travail, la résistance à la compression non confinée (en anglais : Unconfined Compressive Strength UCS) est déterminée à une déformation de 2 %.

Les valeurs de résistance à la compression des mélanges à la déformation retenue présentent des similitudes avec celles reportées dans la littérature sur des mélanges de terre allégée ayant des masses volumiques comparables à celles des échantillons étudiés dans ce travail [26]. Par ailleurs, l'ajout de PCM n'a pratiquement aucun effet sur la résistance mécanique des mélanges terre-paille. Comme il peut être observé sur la Figure 42, les courbes de contrainte-déformation correspondant aux différents mélanges sont très proches avec une similitude de forme évidente. Cette similitude peut se justifier par la porosité élevée de ce type de mélanges. Ainsi, l'ajout de quelques dizaines de microgrammes de PCM dans des matériaux très poreux influence peu leur résistance à la compression, voir Par ailleurs, la fonction première des mélanges de terre allégée dans la construction est purement thermique. Ainsi, il est supposé que la faible résistance à la compression mesurée dans ce travail ne constitue pas une limitation pour l'utilisation de ces mélanges dans les enveloppes des bâtiments étant donné qu'ils sont autoporteurs.

Tableau 17. Cela est à l'opposé de ce qui peut être observé dans des matériaux plus denses à l'exemple des matrices cimentaires [82,146]. Dans le cas de ces derniers, l'incorporation de PCM dans un mortier ou un béton augmente la porosité et par conséquent dégrade leur résistance mécanique.

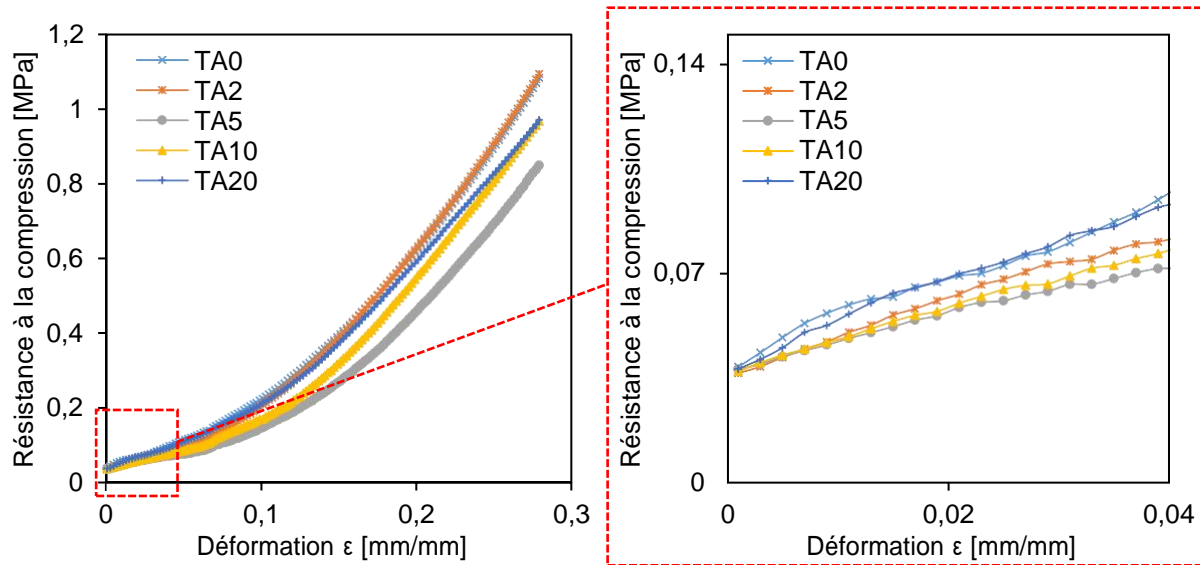


Figure 42: Courbe résistance à la compression-déformation de la terre allégée en fonction de la teneur en PCM.

Par ailleurs, la fonction première des mélanges de terre allégée dans la construction est purement thermique. Ainsi, il est supposé que la faible résistance à la compression mesurée dans ce travail ne constitue pas une limitation pour l'utilisation de ces mélanges dans les enveloppes des bâtiments étant donné qu'ils sont autoporteurs.

Tableau 17: Résistance à la compression des mélanges de terre allégée en fonction de leur teneur en PCM.

Formulation	TA0	TA2	TA5	TA10	TA20
Déformation [mm/mm]	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Résistance à la compression [MPa]	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07

3.3. Propriétés hygroscopiques

3.3.1. Isotherme de sorption /désorption

Il est généralement admis que la terre allégée, comme tous les matériaux hygroscopiques, a un réel potentiel pour réguler l'humidité intérieure des bâtiments. Par conséquent, ces matériaux ont un impact significatif sur la qualité de l'air intérieur, le confort des occupants mais aussi sur la consommation d'énergie [34,35]. Dans cette section, les propriétés hygroscopiques de la terre allégée sont étudiées.

Tout d'abord, les matières premières (sol, paille de roseau et PCM) ont été testées selon la méthode décrite dans la partie 2.3.1.1. Les résultats obtenus sont reportés sur la Figure 43. Sur cette dernière, il peut être remarqué que la paille de roseau est le composant le plus hygroscopique devant la terre. Le PCM avec son caractère hydrophobe ne possède pas des performances hygroscopiques. Par conséquent, il est attendu que l'ajout de PCM réduise la capacité du composite à absorber l'humidité.

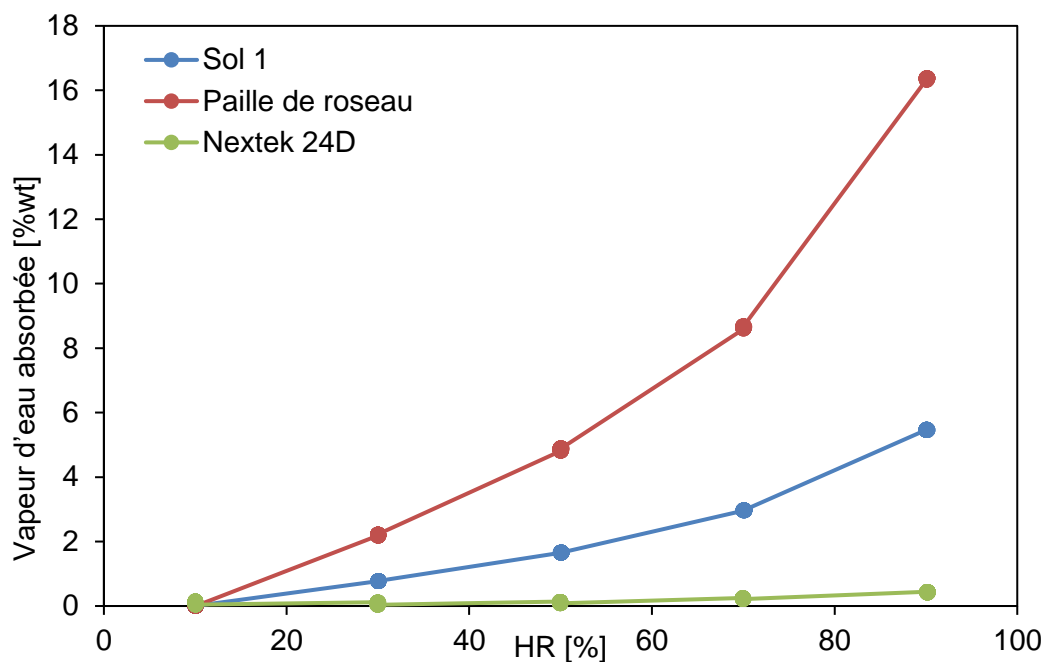


Figure 43: Isothermes de sorption du sol1, de la paille de roseau et du PCM Nextek 24D.

Ensuite, la Figure 44 montre les courbes de sorption/désorption dynamique des matériaux étudiés. La sorption est le phénomène consistant à adsorber ou absorber une substance sur ou dans une autre substance. Ce processus résulte de l'action de molécules de gaz ou de liquide (vapeur d'eau dans le cas présent) mises en contact avec un matériau solide (mélange terre-paille-PCM), et qui adhèrent à sa surface (adsorption) ou s'incorporent dans tout son volume (absorption). La désorption est la manifestation inverse de la sorption, par laquelle les molécules sorbées se détachent du substrat.

À chaque variation de l'humidité relative de l'ambiance, la teneur en humidité de chacun des mélanges étudiés varie de manière significative dans les 24 heures, puis le phénomène ralentit et tend vers un équilibre. Cette forte réactivité est observée à la fois dans les processus de sorption mais aussi de désorption. Cette réponse rapide du matériau au changement d'humidité relative est l'une des propriétés favorisant la régulation de l'humidité à l'intérieur d'un bâtiment.

La Figure 45 représente les isothermes de sorption/désorption des mélanges étudiés à une température constante de 23 °C. Ces isothermes montrent l'évolution de la teneur en humidité de chacun des matériaux en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant. Selon la proposition de Brunauer, citée par Andrade et Pérez [147], les courbes de sorption correspondent au type III et présentent des boucles hystériques. Ce type de courbes est typique des matériaux macroporeux (cas des mélanges étudiés). Sur cette Figure 45, il peut être observé que la quantité de vapeur d'eau absorbée par chaque mélange est inversement proportionnelle à son dosage en PCM. Comme évoqué au début de la section, le comportement de sorption/désorption des mélanges est largement régi par la présence de la paille de roseau. Considérant la nature hydrophobe du PCM, son incorporation dans la terre allégée implique une diminution de la capacité de cette dernière à capter l'humidité présente dans l'air.

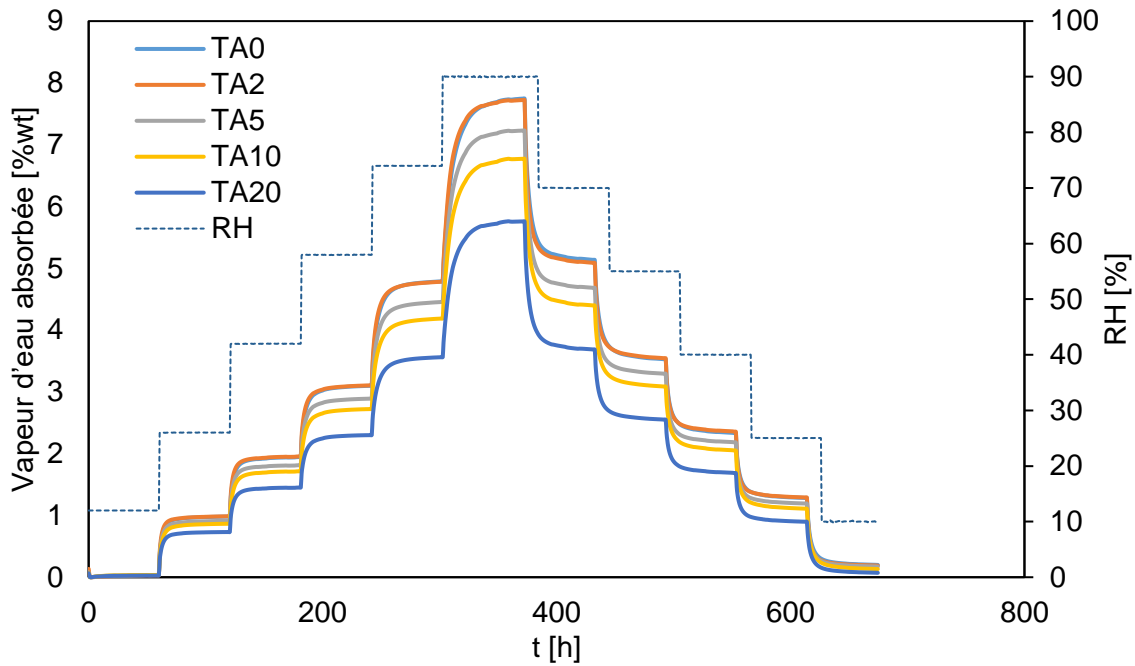


Figure 44: Courbes de sorption dynamiques des différents mélanges de la terre allégée.

D'autre part, il peut être remarqué qu'après un cycle de sorption/désorption complet, les mélanges terre-paille-PCM retrouvent leur état hydrique initial en libérant toute la quantité d'humidité absorbée au début du cycle. C'est un avantage d'un tel matériau parce que de l'eau emprisonnée entraînera inévitablement le développement de moisissures

Par ailleurs, le segment de désorption ne suit pas exactement le chemin suivi par celui de la sorption (effet d'hystérésis). Cette hystérésis diminue légèrement avec l'ajout de PCM et il est supposé dû à la porosité des mélanges. En effet, les résultats de sorption/désorption sont cohérents avec ceux de la porosité rapportée dans le Tableau 16. Une porosité plus faible réduit les zones d'hystérésis et par conséquent conduit à une réduction de l'hygroscopicité des mélanges.

Par ailleurs, un comportement de sorption élevé pourrait conduire à l'augmentation de la teneur en humidité à l'intérieur du matériau, entraînant une dégradation de ses propriétés d'isolation thermique. Ainsi, la connaissance de la perméabilité à la vapeur d'eau des mélanges étudiés devient essentielle.

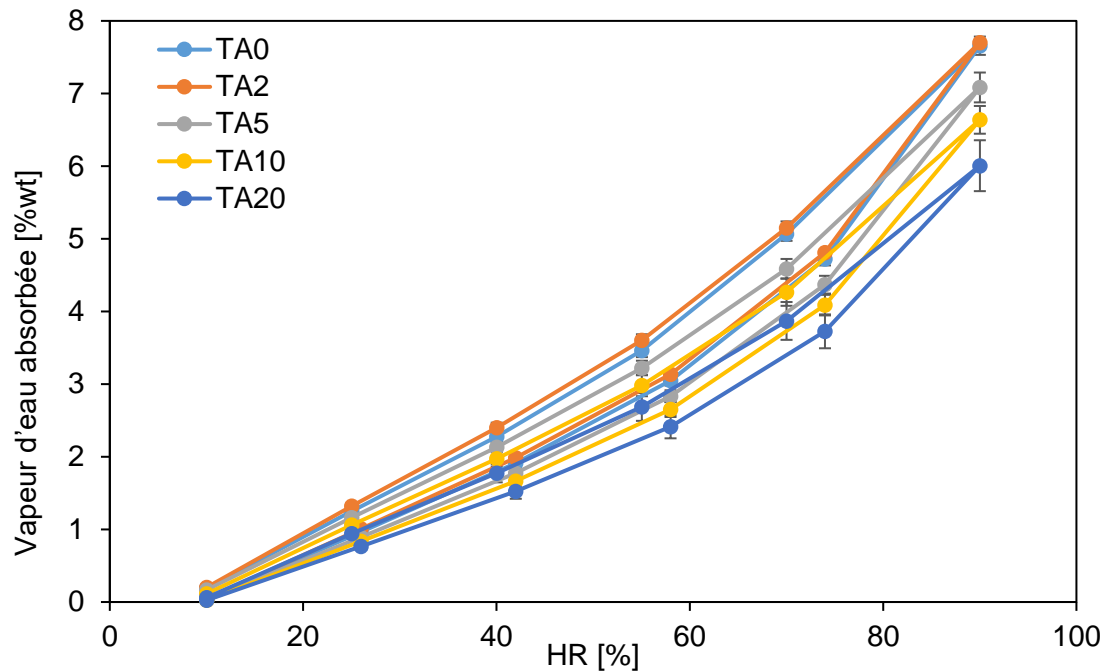


Figure 45: Isothermes de sorption/désorption de la terre allégée à différentes teneurs en PCM.

3.3.2. Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau est la deuxième propriété hygrosopique à être étudiée dans cette thèse. Les résultats des mesures effectuées sur les différents mélanges sont reportés sur la Figure 46. Dans un premier temps, Il peut être remarqué que les différents mélanges présentent des valeurs de perméabilité à la vapeur d'eau comparables à celles retrouvées dans la littérature, voir dans le Tableau 2. En exemple, la valeur du facteur de résistance à la vapeur d'eau de la formulation sans PCM (TA0) est relativement proche de celle rapportée par Phung ($\mu \approx 9$ pour 3 % de roseau) [29].

En ce qui concerne l'effet du PCM sur la perméabilité à la vapeur d'eau, les résultats montrent que l'ajout de PCM diminue la perméabilité à la vapeur d'eau des mélanges terre-paille. Cette diminution est d'autant plus prononcée que le taux de PCM est élevé. Le facteur de la résistance à la vapeur d'eau est le rapport entre les perméabilités à la vapeur d'eau de l'échantillon et celle de l'air. Ce facteur augmente de 2, 10, 17 et 22 % pour les échantillons TA2, TA5, TA10 et TA20, respectivement, par rapport à celui sans PCM (TA0).

Comme pour l'analyse des isothermes de sorption/désorption, la diminution de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de la teneur en PCM est due à la diminution de la porosité et aussi à la nature hydrophobe du PCM. L'ajout de PCM a le même effet sur la capacité des mélanges à absorber (dans le cas des isothermes de sorption/désorption) ou à laisser passer (dans le cas de la perméabilité à la vapeur d'eau) l'humidité au sein du mélange. Etant donné que les diminutions sont de l'ordre de quelques pourcents, le caractère hygrosopique de ces matériaux peut être considéré comme conservé.

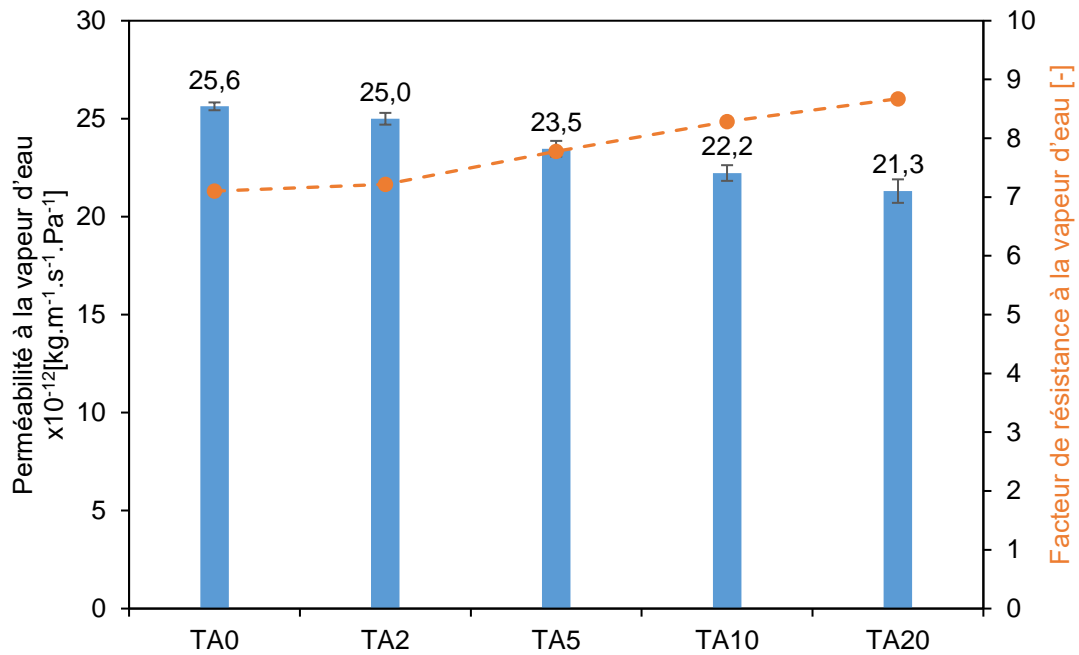


Figure 46: Perméabilité à la vapeur d'eau et facteur de résistance à la vapeur d'eau mesurés sur les différents mélanges terre légère-PCM.

3.4. Propriétés thermiques

3.4.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique (λ) des mélanges terre allégée-PCM a été mesurée à trois températures différentes (14 °C, 24 °C et 34 °C). Les températures sont choisies de manière à étudier la conductivité thermique dans la zone de changement de phase du PCM (24 °C) et en dehors de la zone de changement de phase du PCM (14 °C et 34 °C). À une température de 14 °C, le PCM est à l'état solide et à une température de 34 °C, à l'état liquide. Les résultats obtenus sont affichés sur la Figure 47 et le Tableau 18.

D'abord si l'on compare les résultats obtenus à la littérature, il apparaît que les valeurs de la conductivité thermique sont cohérentes avec celles rapportées dans d'autres travaux, voir Tableau 2. L'analyse des résultats porte d'une part sur l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température, et d'autre part, cette même évolution est faite en fonction de la teneur en PCM. Les résultats illustrés dans la Figure 47 montrent une augmentation de la conductivité thermique de la terre allégée en fonction de la température. Cette évolution était attendue car il est bien connu que la conductivité thermique des matériaux isolants augmente avec la température [148]. Mais au regard de la teneur en PCM, une décroissance relative est observée à 24 °C, température de changement de phase. Dans cette zone, le PCM n'est ni complètement solide ni complètement liquide, ce qui engendre un désordre dans les microcapsules et entraîne cette baisse.

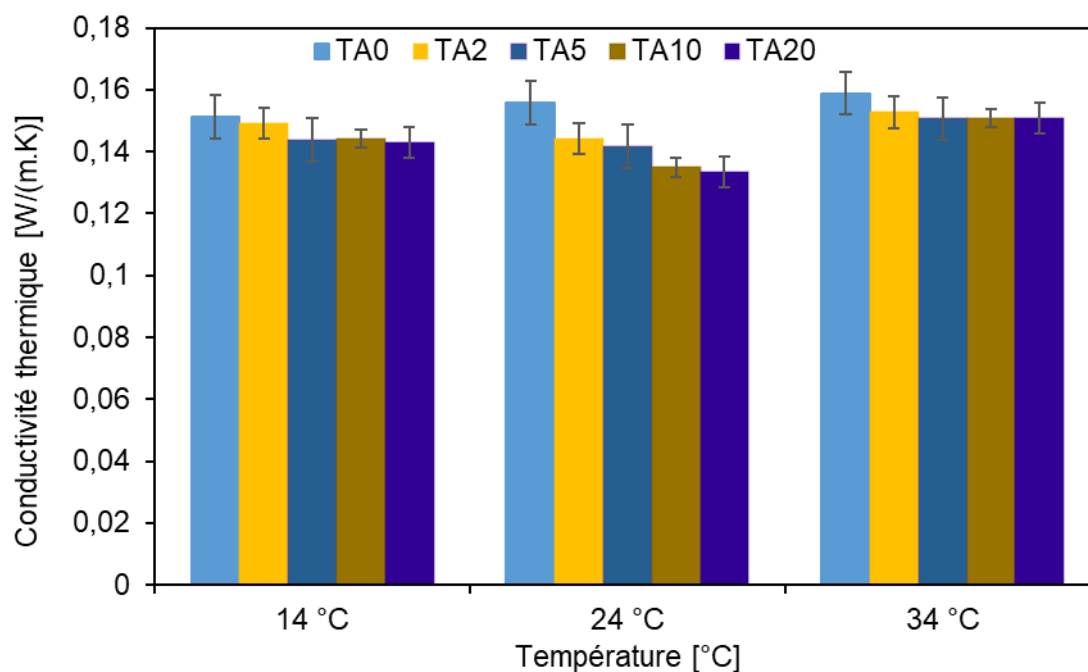


Figure 47: Conductivité thermique de la terre allégée en fonction de la teneur en PCM et de la température.

Ensuite, pour une même température de caractérisation à chaque fois, l'ajout de PCM provoque une diminution de la conductivité thermique de la terre allégée sur toute l'échelle de température. Cependant, cette diminution n'est pas toujours proportionnelle à la quantité de PCM incorporée. Lorsque le PCM est complètement solide ou liquide (à 14 °C ou 34 °C), la conductivité thermique tend à se stabiliser et la diminution de λ devient négligeable au-delà de 5 % de PCM. En revanche, dans la zone de transition (24 °C), la conductivité thermique diminue continuellement jusqu'à ce que la quantité de PCM approche les 10 %. Au-delà de cette teneur en PCM, la diminution de la conductivité thermique ralentit.

Ces résultats montrent qu'une formulation peut avoir une quantité optimale de PCM à ajouter. La valeur de cet optimum doit être définie en fonction de la nature du matériau et ses performances. À titre d'illustration, Dakhli et al. [82] ont signalé une valeur optimale, en fonction de la conductivité thermique, d'environ 20 % de PCM pour un mortier de ciment standard dans leur étude. Enfin, il peut être confirmé que l'ajout de PCM Nextek 24D améliore les propriétés isolantes de la terre allégée en fonction de son niveau d'incorporation et de la température.

Tableau 18: Valeurs de la conductivité thermique de la terre allégée en fonction de la teneur en PCM et de la température

Température [°C]	14	24	34
TA0	0,151	0,156	0,159
TA2	0,149	0,144	0,153
TA5	0,144	0,142	0,151
TA10	0,144	0,135	0,151
TA20	0,143	0,134	0,151

3.4.2. Capacité thermique massique

Comme expliqué dans la section 2.3.2.2 (méthodes expérimentales), la capacité thermique massique de la terre allégée est obtenue par la loi des mélanges en considérant ses différents constituants : la paille de roseau, le sol 1 et le PCM Nextek 24D. Les résultats obtenus sont rapportés dans la Figure 48. Cette dernière reprend les valeurs en absolu. La partie supérieure indique le processus de refroidissement, donc un flux exothermique. La partie inférieure indique le processus de chauffage, donc un flux endothermique. Premièrement, il peut être observé que la chaleur spécifique augmente en fonction de la température. Ce constat est observable dans le cas du sol 1 et de la paille de roseau mais aussi dans le cas du PCM. La particularité de ce dernier est la présence de pics importants caractéristiques du changement de phase. L'aire de la crête de la courbe correspond à une combinaison de la chaleur échangée avec l'échantillon *i.e.* la *chaleur sensible* et la *chaleur latente*.

La courbe DSC obtenue lors du chauffage ne se superpose pas à celle observée lors du refroidissement. Les pics sont décalés, et un effet d'hystérésis est observé. De plus, deux pics sont observés en refroidissement mais pas dans le cas du chauffage. Le PCM Nextek 24D présente un certain polymorphisme, ce qui signifie qu'il est composé d'un mélange isomérique différent qui peut avoir des températures de fusion/solidification différentes.

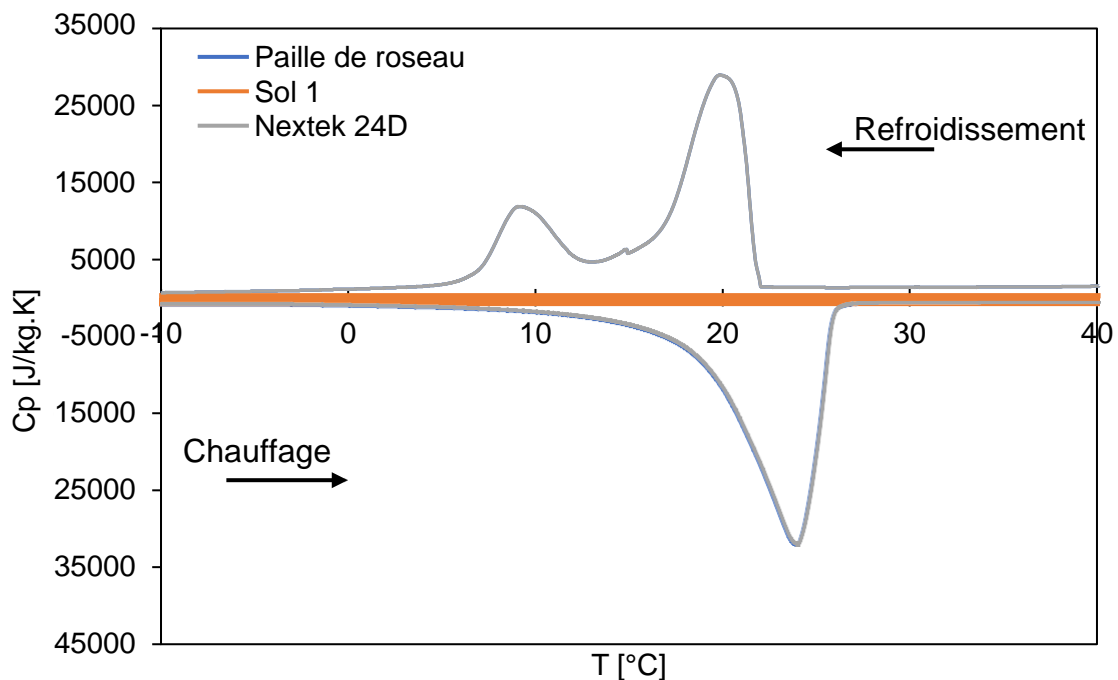


Figure 48: Evolution de la capacité thermique massique des matériaux bruts de la terre allégée.

En ce qui concerne l'effet de l'incorporation des PCM, la Figure 49 montre qu'en général, l'ajout du PCM Nextek 24D augmente la valeur de la capacité thermique massique de la terre allégée. Deux parties distinctes peuvent être identifiées : En dehors et dans la zone de changement de phase. Avant le changement de phase, la capacité thermique spécifique est supérieure de 4 %, 11 %, 21 % et 38 % à celle de l'échantillon témoin pour une teneur en PCM de 2 %, 5 %, 10 % et 20 %, respectivement. Après le changement de phase, la capacité thermique massique est supérieure de 2 %, 4 %, 8 % et 15 % à celle de l'échantillon témoin pour une teneur en PCM de 2 %, 5 %, 10 % et 20 %, respectivement. Le taux d'augmentation est différent avant et après le changement de phase. Cette observation est due à la différence entre l'évolution de la capacité thermique massique du PCM solide et celle du PCM liquide. À la valeur pic, le C_p des mélanges est 175 %, 415 %, 783 % et 1440 % supérieur à celui de l'échantillon témoin pour des teneurs en PCM de 2 %, 5 %, 10 % et 20 %, respectivement. En fait, à ce

niveau, la capacité thermique massique passe de $546 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour l'échantillon sans PCM, à environ $5515 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour l'échantillon TA20.

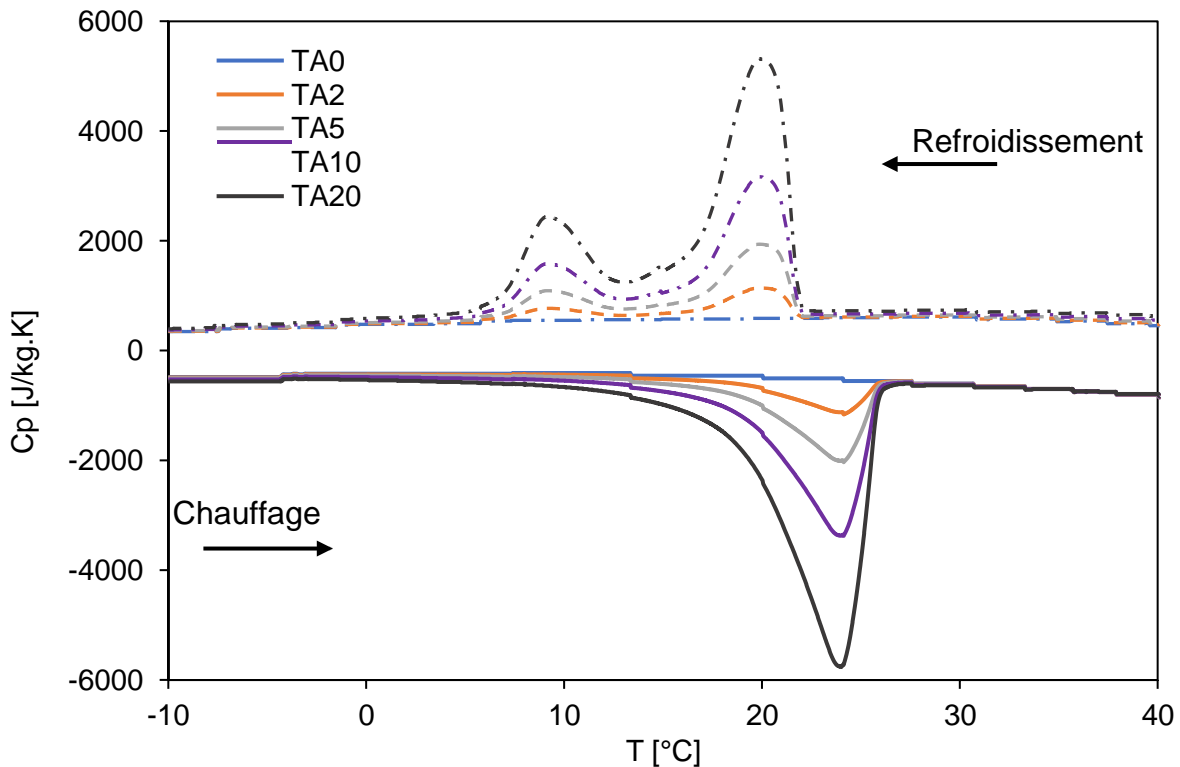


Figure 49: Evolution de capacité thermique de la terre allégée en fonction de la température et de la teneur en PCM.

3.5. Réponse thermique à des conditions aux limites variables

La Figure 50 montre la variation de la température des échantillons placés initialement à 35 °C , puis à 0 °C . Les relevés sont arrêtés à 12 °C (température suffisamment éloignée de celle de changement de phase).

La principale observation de la Figure 50 concerne la présence d'un palier, c'est-à-dire une température constante dans le temps. Ce palier a lieu à des températures comprises entre 22 °C et 23 °C et coïncide avec le point de fusion/solidification du PCM incorporé dans la terre allégée. Ce palier devient de plus en plus important avec l'augmentation de la teneur en PCM.

D'autre part, les pentes des courbes diffèrent. Ces pentes sont supposées être liées aux différentes propriétés thermiques des matériaux. Lorsque la conductivité thermique diminue, le chauffage/refroidissement des échantillons nécessite plus de temps. En considérant le palier de changement de phase, le temps nécessaire au refroidissement des échantillons de terre allégée étudiés augmente avec la teneur en PCM. Pour abaisser la température de 35 °C à 12 °C , 2 h10 min sont nécessaires pour l'échantillon de référence, alors que 2h33min, 2h52min, 3h07min et 4h16min le sont pour les échantillons contenant respectivement 2 %, 5 %, 10 % et 20 % de PCM. Cette augmentation dans le temps de transition va certainement influencer la réponse thermique de des parois des bâtiments et par conséquent l'énergie consommée mais aussi le confort des occupants.

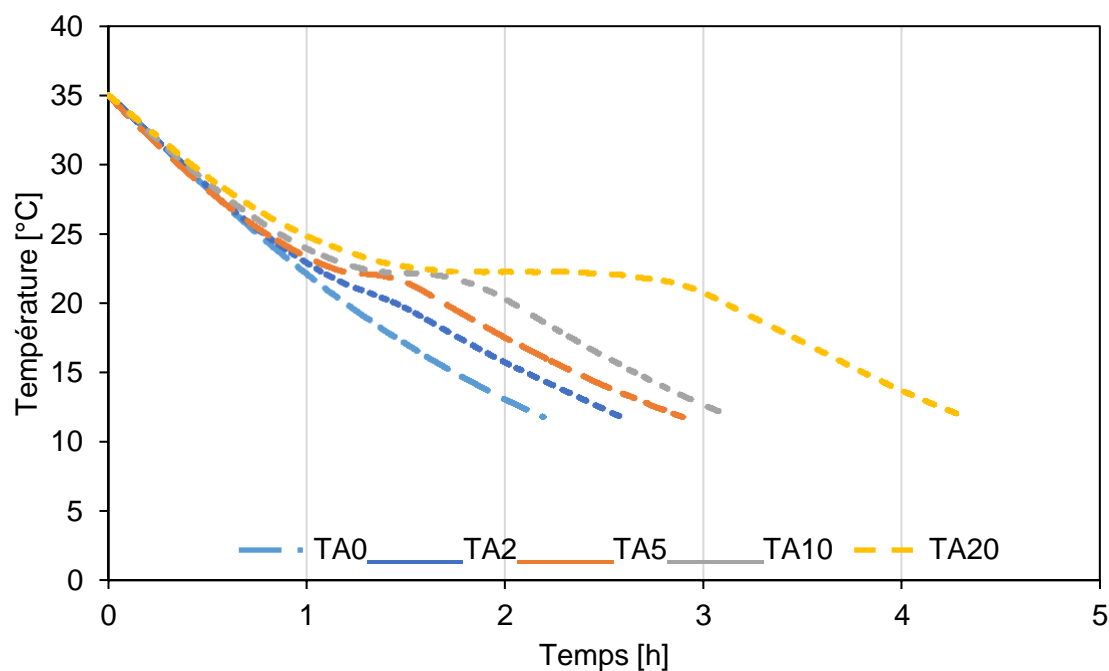


Figure 50: Évolution de la température au cœur des échantillons de terre allégée-PCM en fonction du temps.

Ensuite, une épreuve spécifique est réalisée. Celui-ci a pour objectif de reproduire un cycle de température permettant d'étudier la manière dont une paroi en terre allégée se comporte et son impact sur l'environnement intérieur. Le cyclage thermique considéré est celui d'une température extérieure variant entre 16 et 29 °C. La réponse suivie est la variation de la température interne de l'échantillon, voir la Figure 51.

Tout d'abord, la présence des échantillons de terre allégée-PCM modifie l'amplitude de la réponse au cyclage thermique imposé. L'amplitude de la température a diminué légèrement. Une réduction maximale de 0.5 °C est observée avec 20 % de PCM ajouté.

En plus de leur diminution, les pics de température sont décalés dans le temps. Ce déphasage dépend clairement de la teneur en PCM. Il est à souligner ici que ce déphasage est plus important dans la partie inférieure des courbes (lorsque les températures sont sous le point de fusion, c'est-à-dire après que le PCM ait subi une transition et ait passé de l'état liquide à l'état solide). Cette différence entre le déphasage des températures supérieures et inférieures est supposée être liée au polymorphisme du Nextek 24D [71]. Sur la Figure 48, il est observé que le processus de solidification s'étend sur une plage de température plus grande que celle du processus de fusion. Même si le déphasage aux hautes températures demeure assez faible, les échantillons dont la teneur en PCM est de 2 %, 5 %, 10 % et 20 %, voient leurs pics se décaler vers la droite de 3, 18, 29 et 34 min, respectivement. Lorsque les températures sont inférieures au point de fusion du PCM, le déphasage des pics devient plus important. Il est d'environ 28min, 31min, 1h17min et 1h50min pour les échantillons ayant une teneur en PCM de 2 %, 5 %, 10 % et 20 %, respectivement.

D'autre part, l'avantage de l'incorporation de PCM dans la terre allégée est également démontré par le temps écoulé autour de la température de changement de phase. Si l'on considère que le point réel de changement de phase du PCM est à environ 22,5 °C et il se situe dans une zone de confort thermique comprise entre 21 °C et 24 °C, le temps passé dans cette zone se trouve considérablement amélioré. La durée de présence des températures des échantillons dans cette zone de confort thermique est toujours plus importante lorsque la teneur en PCM dans la terre allégée est élevée. En effet, la durée où la température de la face intérieure de la terre allégée est comprise entre 21 °C et 24 °C passe de 3h24min pour l'échantillon de référence à 3h34min, 3h53min, 4h20min et 5h24min pour une teneur en

PCM de 2 %, 5 %, 10 % et 20 %, respectivement. Les températures considérées ont été mesurées sur la surface interne des échantillons.

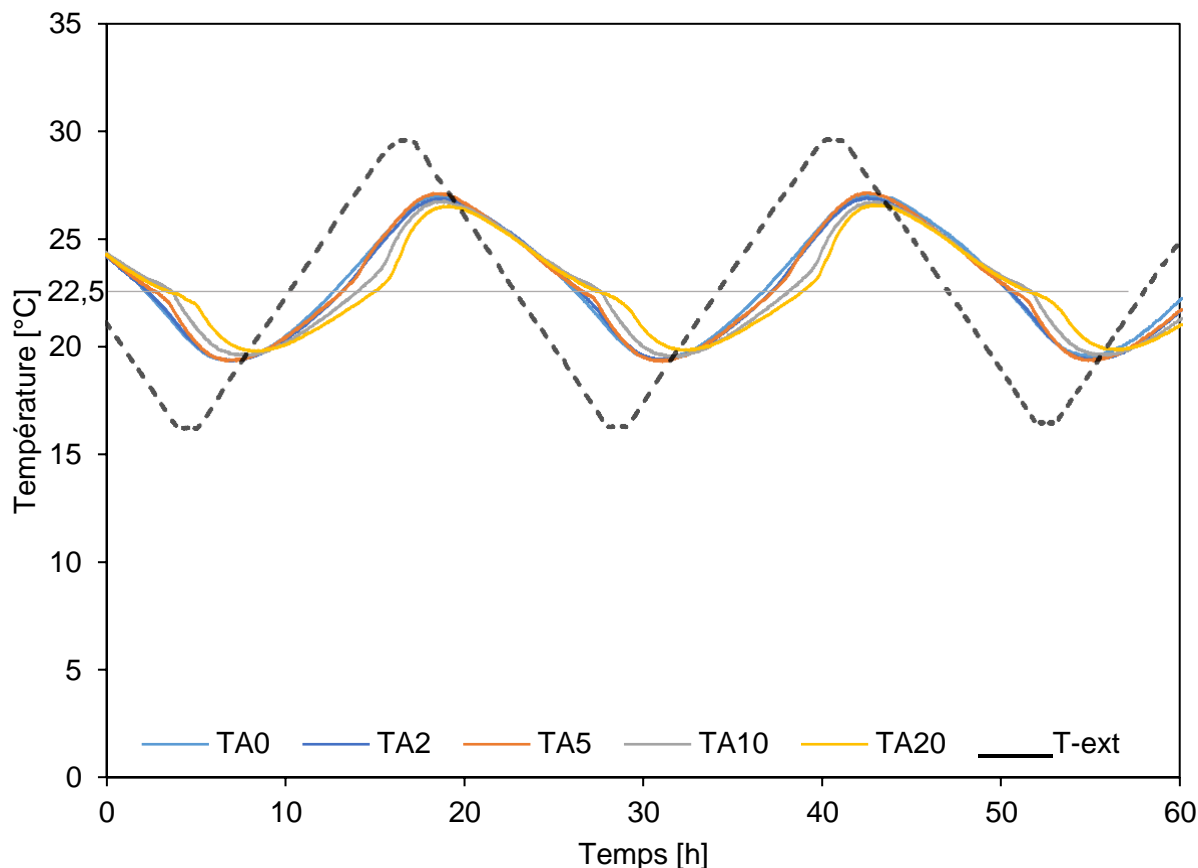


Figure 51: Évolution de la température intérieure des mélanges terre allégée-PCM lors d'un cycle thermique.

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'effet de l'incorporation de PCM sur les propriétés thermiques, hygroscopiques et mécaniques de la terre allégée. Des échantillons avec différentes teneurs en PCM ont été élaborés. Le comportement de sorption/désorption, la perméabilité à la vapeur d'eau et la résistance à la compression, la conductivité thermique, la capacité thermique massique ainsi que la réponse thermique à des changements de conditions limites ont été étudiés.

D'abord, il a été constaté que la terre allégée présente une faible résistance à la compression. L'ajout de PCM n'a pratiquement pas eu d'effet sur la résistance mécanique des mélanges terre-paille.

En ce qui concerne les propriétés thermiques, l'étude a montré que la conductivité thermique des mélanges diminue lorsque la teneur en PCM augmente. Ceci est supposé être dû à la faible conductivité thermique du PCM et à l'augmentation du désordre lorsque le changement de phase a lieu à l'intérieur des microcapsules. De plus, l'incorporation du PCM a montré un effet intéressant sur la capacité thermique massique de la terre allégée. Même hors zone de changement de phase, ce paramètre a considérablement augmenté.

De même, l'impact du PCM est notable sur la réponse thermique des mélanges aux changements de conditions aux limites. En fait, une diminution de l'amplitude des oscillations de température, un déplacement des pics de température (déphasage) et une augmentation du temps écoulé dans la zone de confort thermique ont été observés. En combinant toutes ces propriétés, on peut affirmer que l'ajout

de PCM dans la terre allégée améliorera éventuellement la sensation de confort dans les maisons qui seront construites avec ce type de mélange.

En ce qui concerne les propriétés hygroscopiques, les résultats obtenus indiquent que l'incorporation du PCM dégrade les propriétés hygroscopiques de la terre allégée. En effet, son pouvoir de sorption/désorption et sa perméabilité à la vapeur d'eau sont inversement proportionnels à la teneur en PCM. Cela est supposé être dû à la nature hydrophobe du PCM et à la diminution de la porosité contenue dans la terre allégée.

Chapitre **4** **Effet de l'incorporation de PCM
sur les propriétés de la bauge**

Chapitre 4 : Effet de l'incorporation de PCM sur les propriétés de la bauge

4.1. Introduction

La bauge, ou quel que soit son nom, est présente dans les différentes régions du monde. Selon les cultures et les savoir-faire locaux, elle a été largement utilisée et mise en œuvre de diverses manières. À cet égard, on trouve des maisons en bauge notamment au Canada, aux États-Unis, au Mexique, au Mali, etc. [149,150]. La bauge est la première technique de construction en terre dans toute la partie Nord-Ouest de la France et le Sud-Ouest de l'Angleterre.

Le présent chapitre vise à étudier l'effet de l'incorporation de matériaux à changement de phase (PCM) sur les propriétés physiques de la bauge. En incorporant des PCM directement dans les parois verticales externes d'un bâtiment en bauge, son effet tampon thermique pourrait être amélioré. Ainsi, la modification des propriétés thermiques du matériau pourrait entraîner une réduction de la consommation d'énergie d'un bâtiment en bauge.

Tout d'abord, des PCM microencapsulés ont été introduits dans les mélanges terre-paille. Des échantillons contenant 0 %, 2 %, 5 % et 10 % massique de PCM ont été confectionnés, voir Tableau 19. Ensuite, les performances mécaniques (résistance à la compression), thermiques (conductivité thermique et capacité thermique massique) et hygroscopiques (isotherme de sorption/désorption, perméabilité à la vapeur d'eau) des mélanges ont été étudiées en fonction de la teneur en PCM.

Tableau 19: Formulations de bauge étudiées [%wt].

Formulation	Sol 2	Sol 3	Paille de lin	Eau	Micronal 5038 X	
Bauge	B0	67	33	2,5	25	0
	B2	67	33	2,5	25	2
	B5	67	33	2,5	25	5
	B10	67	33	2,5	25	10

Note : B = Bauge, le numéro indique la teneur en PCM.

Le pourcentage de la paille et de l'eau est référé à la masse de la terre.

Le pourcentage de PCM est référé à la masse de la terre et de la paille.

4.2. Propriétés physico-mécaniques

4.2.1. Porosité et masse volumique apparente

Dans cette partie, la porosité et la masse volumique apparente des mélanges bauge-PCM sont évaluées. Les résultats de ces études sont représentés sur la Figure 52. Cette dernière montre que la porosité de la bauge diminue avec la quantité de PCM incorporée. Ce constat est similaire à celui qui a été fait dans la section traitant de la terre allégée. Du fait que le PCM est une particule fine, il se retrouve inséré entre les agrégats de la bauge (paille de roseau et agrégats) et comble les pores susceptibles d'être formés.

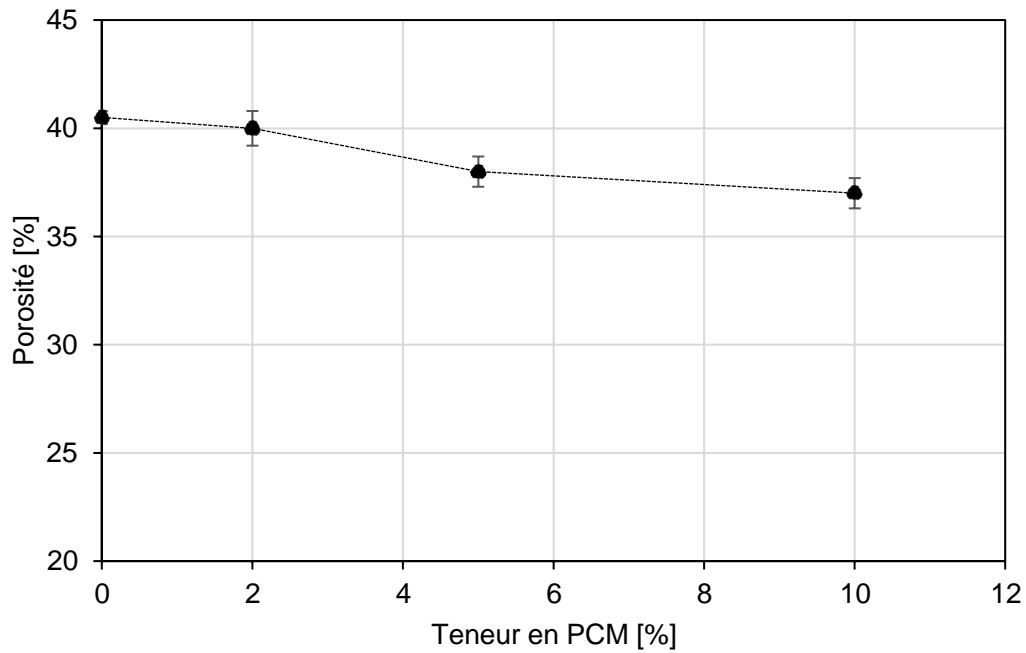


Figure 52: Evolution de la porosité de la bauge en fonction de sa teneur en PCM.

D'autre part, la masse volumique apparente de la bauge est présentée dans la Figure 53. Les résultats révèlent une baisse de cette masse volumique en fonction de la teneur en PCM. Pour rappel, la méthode d'incorporation du PCM est faite par substitution, voir Tableau 19. Ainsi, en ajoutant des PCM, une quantité équivalente de sol et de fibres est retirée. Cette substitution a permis de remplacer de la bauge (environ 1500 kg/m^3) par des particules plus légères ($300\text{-}400 \text{ kg/m}^3$) entraînant ainsi une diminution de la masse volumique des mélanges.

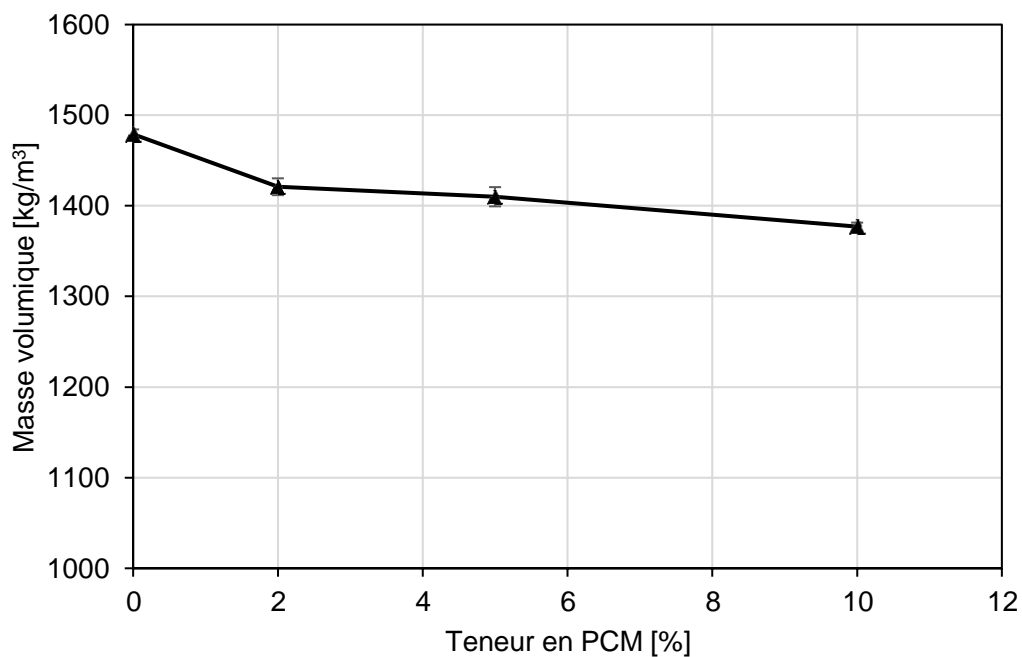


Figure 53: Evolution de la masse volumique apparente de la bauge en fonction de la teneur en PCM.

4.2.2. Résistance à la compression

L'incorporation de Micronal DS 5038 X a entraîné une diminution de la résistance mécanique de la bauge sèche, voir Figure 54. Ce comportement est cohérent avec l'évolution de la masse volumique de la bauge. En effet, la baisse de ce paramètre physique provoque une diminution des propriétés mécaniques [151,152].

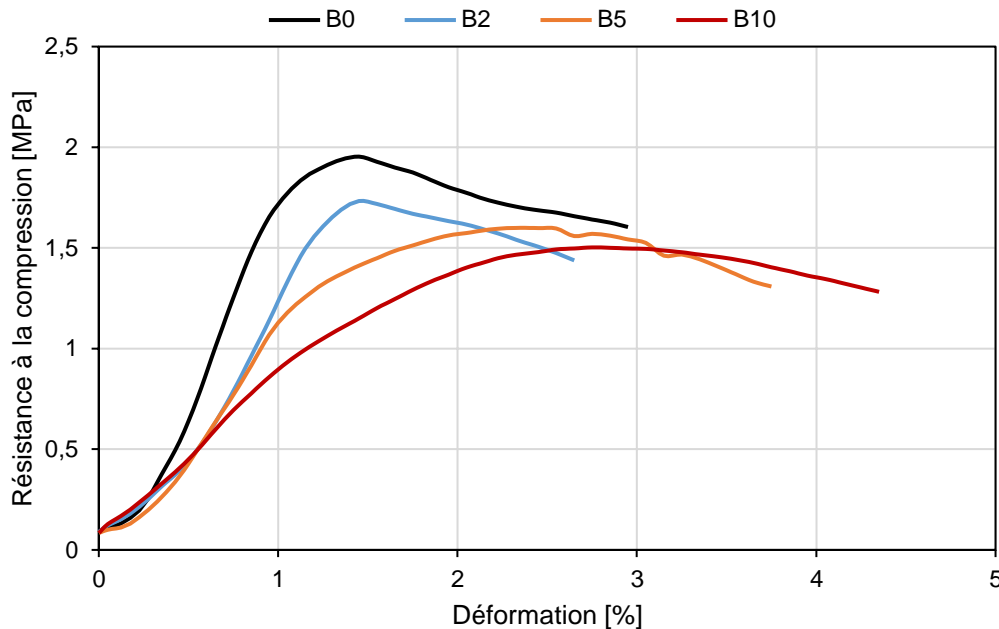


Figure 54: Courbe contrainte-déformation de la bauge à différentes teneurs en PCM.

En plus, de diminution de la résistance à la compression, le matériau devient plus ductile. Cela pourrait être dû au fait que l'ajout de PCM réduit la cohésion entre les particules de sol et la paille de lin. La Figure 55 montre la distribution des PCM entre les granulats du sol.

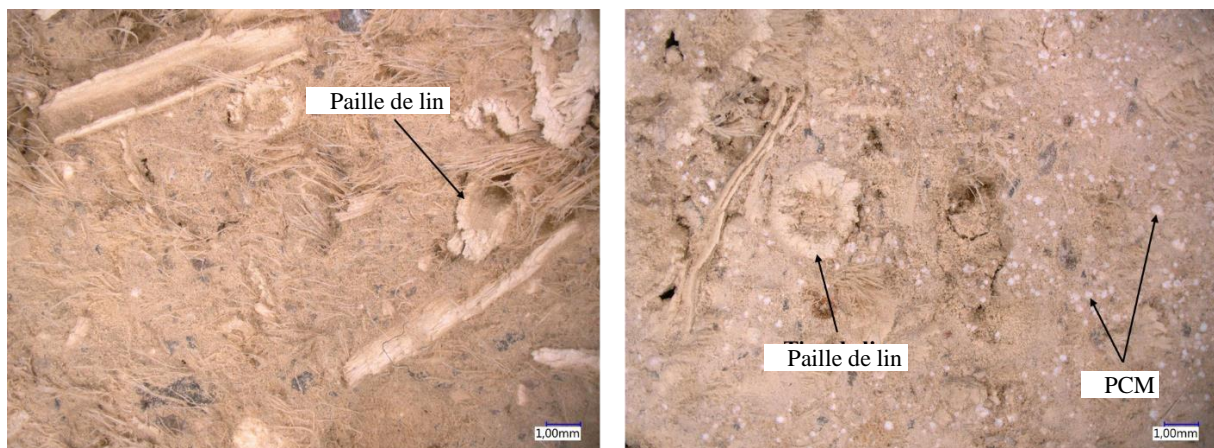


Figure 55: Observation sous microscope de la bauge ; B0 (gauche) et B10 (droite).

La résistance à la compression de la bauge a été beaucoup étudiée dans la littérature. Les résultats rapportés montrent une résistance à la compression variante entre 0,12 et 1,6 MPa. Les valeurs suivantes ont été rapportées : 0,12 MPa [153], 0,6 MPa [154], 1,2 MPa [155] et 1,6 MPa [156]. Cependant, dans le présent travail, la plus faible résistance à la compression mesurée (B10) est égale à 1,5 MPa, voir Tableau 20. Cette résistance est considérée comme suffisante pour construire une

habitation de deux ou même trois étages [153,154]. Les valeurs des contraintes citées ici sont atteintes à une déformation maximale de 2,75 %. Comme déjà évoqué dans le chapitre précédent, il n'y a pas d'exigence de déformation pour les constructions en terre. Les études évaluent la résistance à la compression à une déformation pouvant varier de 1 % à 7,5 % [35,155].

Tableau 20: Résistance à la compression maximale de la bauge et déformation correspondante en fonction de la teneur en PCM.

Formulation	B0	B2	B5	B10
Déformation à la contrainte maximale [%]	1,45	1,45	2,35	2,75
Résistance à la compression [MPa]	1,95	1,73	1,60	1,50
Résistance à la compression pour 1 % de déformation	1,66	1,30	1,17	0,86

4.3. Propriétés hygroscopiques

4.3.1. Isotherme de sorption/désorption

Les isothermes de sorption/désorption de la bauge sont présentées en fonction de plusieurs humidités relatives, pour les différentes teneurs en PCM. Les courbes de la Figure 56 représentent l'évolution de la teneur en humidité des mélanges bauge-PCM en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant à une température constante de 23 °C.

Tout d'abord, il peut être constaté que la quantité d'humidité absorbée par la bauge varie de manière significative dans les 24 heures suivant le changement d'humidité relative. Ensuite, le phénomène d'absorption ralentit jusqu'à l'équilibre, voir Figure 56. Cette forte réactivité est observée à la fois dans les segments de sorption et de désorption. Comme déjà signalé, cette réponse rapide de la bauge à un changement d'humidité relative constitue éventuellement une des caractéristiques les plus intéressantes dans la régulation de l'humidité à l'intérieur d'un bâtiment.

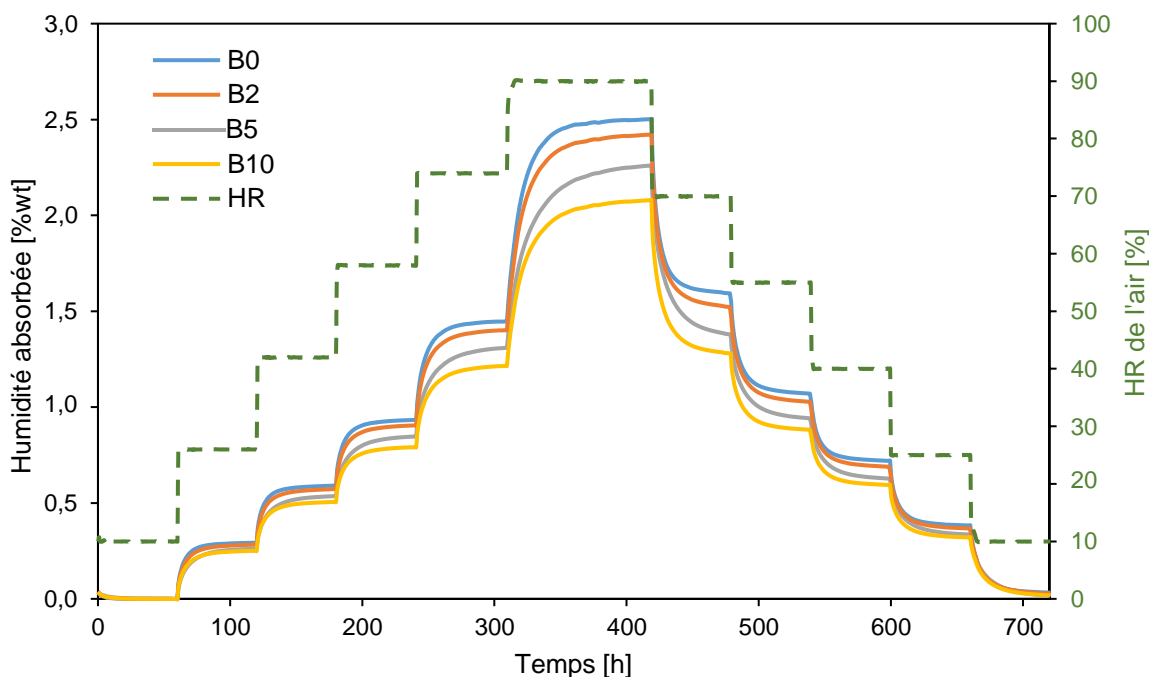


Figure 56: Courbes de sorption dynamique des différents mélanges bauge-PCM étudiés.

De la Figure 57, il peut être constaté que l'ajout du PCM dans la bauge implique une diminution de la quantité d'humidité absorbée. Ceci est probablement dû à la nature hydrophobe du Micronal 5038 X. A titre d'illustration, à une HR de 90 %, l'humidité absorbée par la bauge atteint 2,5 % de la masse de l'échantillon. À une humidité relative égale à 90 %, la baisse due à l'incorporation du PCM est égale à 3 %, 10 % et 17 % pour le B2, B5 et B10, respectivement.

Par ailleurs, en examinant les courbes de sorption et de désorption, une hystérésis peut être observée. Cette dernière diminue légèrement avec l'ajout de PCM en accord avec la diminution de la porosité. Par ailleurs, après le processus de désorption, tous les mélanges retrouvent leur état initial. Cela signifie que les mélanges bauge-PCM peuvent libérer la totalité de la vapeur d'eau absorbée et retrouver leur état initial.

Enfin, l'ajout de PCM dégrade légèrement le caractère hygroscopique de la bauge, mais ces propriétés restent comparables à celles d'autres matériaux à base de terre. Selon la littérature, à 90 % d'humidité relative, le taux d'humidité absorbé par la bauge varie entre 2,8 % et 4,1 % [29,157].

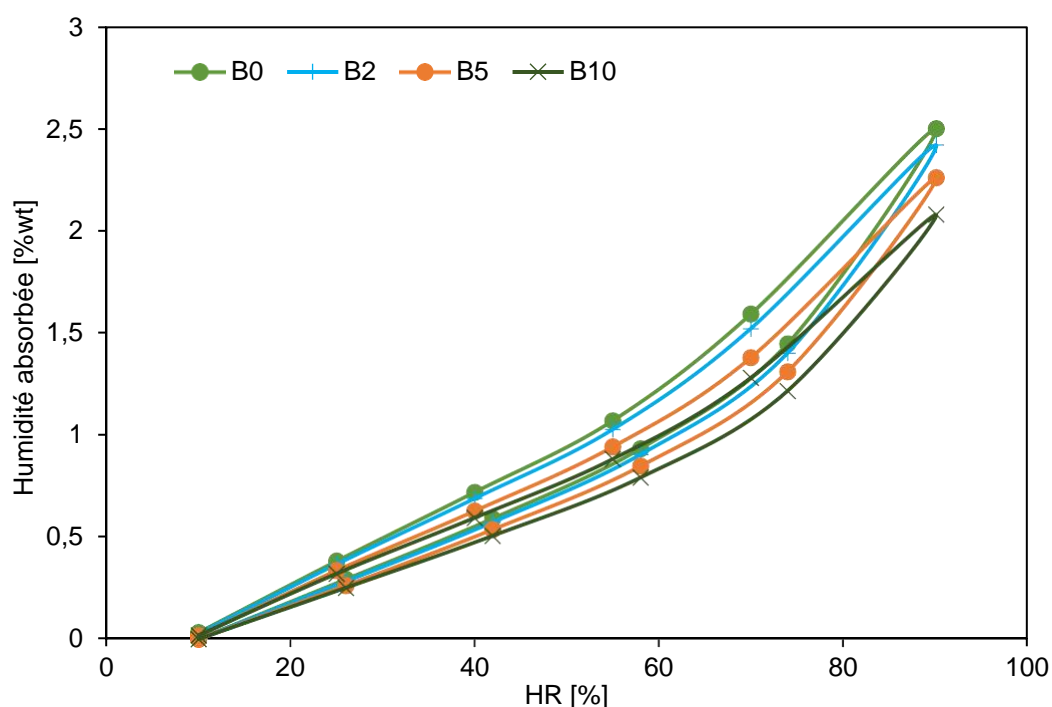


Figure 57: Isotherme de sorption/désorption de la bauge à différentes teneurs en PCM.

4.3.2. Perméabilité à la vapeur d'eau

La Figure 58 présente l'évolution de la perméabilité à la vapeur d'eau et du facteur de résistance à la diffusion de vapeur de la bauge en fonction de sa teneur en PCM. Tout d'abord, la valeur de la perméabilité à la vapeur d'eau de la bauge de référence (B0) est comparée à celles rapportées dans la littérature, voir Tableau 2. Ainsi, des similitudes ont été constatées. La valeur du facteur de résistance à la vapeur d'eau (μ) de la bauge de référence est relativement proche de celle rapportée par Phung ($7 < \mu < 10$) [29] ou celle rapportée par Oliva et Courgey ($4 < \mu < 10$) [158] et elle est non loin de celle déterminée par Stazi $\mu = 8$ [159] ou Collet $\mu = 13,3$ [160].

Ensuite, l'effet de l'incorporation de PCM sur la perméabilité de la bauge est examiné. Il en ressort également que la perméabilité à la vapeur d'eau diminue proportionnellement avec la teneur en PCM. La baisse de la perméabilité à la vapeur d'eau est égale à 11 %, 16 % et 33 % pour B2, B5 et B10, respectivement.

En effet, une augmentation peut être observée sur la courbe représentant l'évolution du facteur de

résistance à la vapeur d'eau. Concrètement, cela signifie que la bauge perd sa capacité à laisser passer l'humidité. Cette diminution de la perméabilité à la vapeur d'eau peut être corrélée à la baisse de la porosité. En effet, le réseau poreux constitue les canaux de passage de l'humidité. De plus, comme le Micronal DS 5038 X présente une enveloppe hydrophobe, cette caractéristique est supposée affecter le comportement hygroscopique de la bauge, y compris sa perméabilité à la vapeur d'eau.

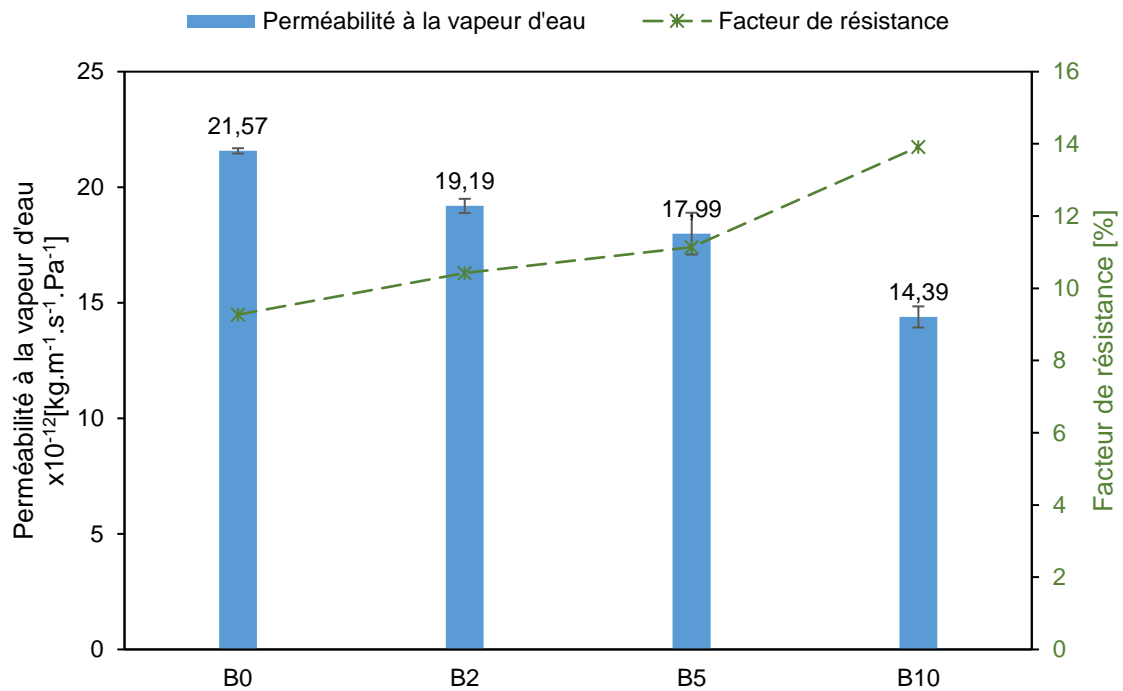


Figure 58: Evolution de la perméabilité à la vapeur d'eau et le facteur de résistance à la diffusion de vapeur de la bauge en fonction de la teneur en PCM.

4.4. Propriétés thermiques

4.4.1. Conductivité thermique

La Figure 59 et le Tableau 21 montrent l'évolution de la conductivité thermique de la bauge en fonction de sa teneur en PCM. Cette dernière a été mesurée à trois températures différentes (14 °C, 24 °C et 34 °C), c'est-à-dire avant, pendant et après le changement de phase. Le PCM microencapsulé est sous forme solide à 14 °C et sous forme liquide à 34 °C. Les résultats montrent une conductivité thermique comprise entre 0,64 et 0,76 W/(m.K) est proche des (valeurs rapportées pour la bauge par Collet-Foucault (entre 0,4 et 0,7 W/(m.K)) [160]. Les résultats obtenus ici indiquent que la conductivité thermique de la bauge diminue avec le taux du PCM. Ceci est supposé être dû à la faible conductivité thermique intrinsèque du PCM. En effet, le Micronal DS 5038 X présente une conductivité thermique d'environ 0,08 W/(m.K). Cette valeur a été donnée par le fournisseur et vérifiée au laboratoire.

De plus, la diminution de la conductivité thermique est liée à la baisse de la masse volumique de la bauge. Des études antérieures [33] ont démontré la corrélation existante entre la conductivité thermique et la masse volumique d'un matériau.

Au-delà de 5% de PCM incorporé, la conductivité thermique de la bauge se limite à une diminution d'environ 15%. Cela donne une indication sur la quantité optimale de PCM à ajouter dans ce type de mélanges. Ainsi, la définition de la teneur optimale en PCM doit tenir compte de la nature et des

différentes propriétés des matériaux. En exemple, pour un mortier de ciment standard, 20 % de PCM est considéré comme optimum [82] et pour la terre allégée, c'est un taux de 10 % qui a été trouvé dans le chapitre précédent. Ces taux sont strictement basés sur la conductivité thermique. Cependant, pour déterminer l'optimum idéal, les différents comportements d'un matériau doivent être considérés. À cette fin, la simulation numérique pourrait être d'une utilité certaine. Enfin, on peut affirmer que le Micronal DS 5038 X améliore les propriétés isolantes de la bauge.

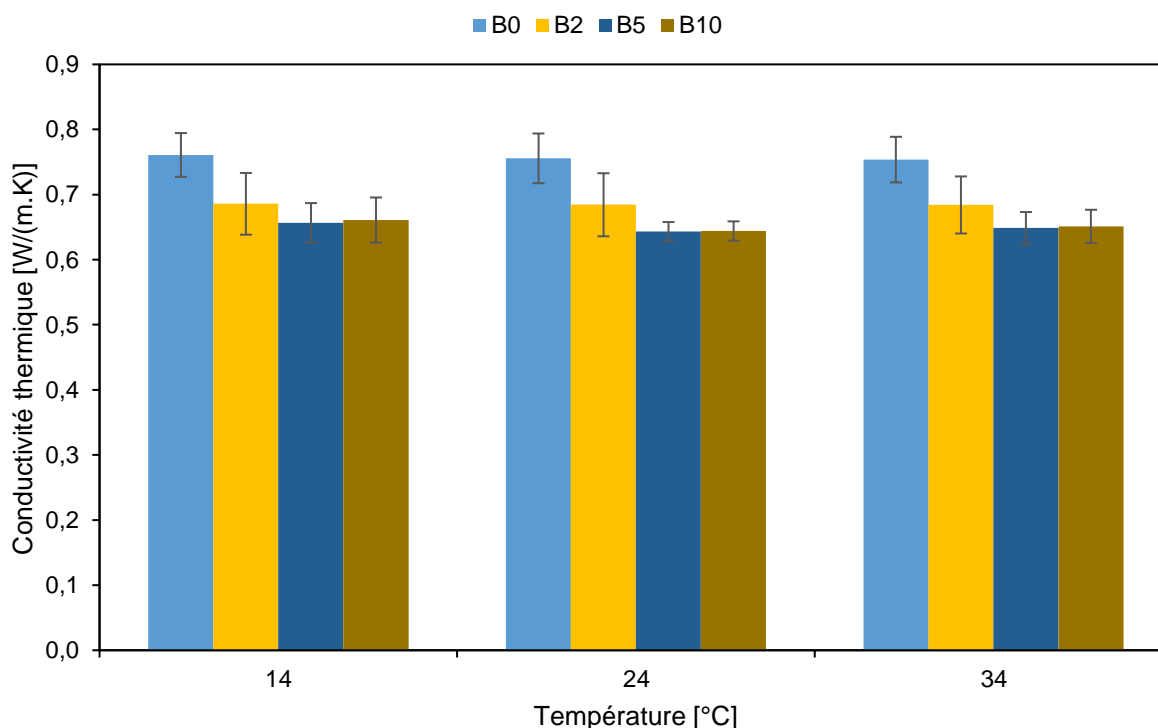


Figure 59: Evolution de la conductivité thermique de la bauge pour différentes teneurs en PCM et de la température.

Par ailleurs, il peut être constaté sur le Tableau 21 que la température n'a pas un effet remarquable sur la conductivité thermique de la bauge incorporant des PCM. En fait, aux trois températures (14 °C, 24 °C et 34 °C) pour lesquelles la conductivité thermique a été mesurée, aucune évolution significative n'a été observée. Malgré le changement de phase attendu à 24 °C, conduisant à plus de désordres dans le PCM, aucune variation notable n'a été enregistrée comme dans le cas de la terre allégée incorporant le Nextek 24D. Cela pourrait être dû au fait qu'à cette température, le Micronal DS 5038 X est déjà fondu.

Tableau 21: Valeurs de la conductivité thermique de la bauge en fonction de la teneur en PCM et de la température

Température [°C]	14	24	34
B0	0,761	0,756	0,754
B2	0,686	0,685	0,684
B5	0,657	0,643	0,649
B10	0,661	0,644	0,651

4.4.2. Capacité thermique massique

L'évolution de la capacité thermique massique des matières premières et des mélanges bauge-PCM en fonction de la température est présentée sur les Figure 60 et Figure 61, respectivement. Conformément aux attentes, la capacité thermique massique (C_p) des mélanges augmente avec la température. Par

ailleurs, le Micronal 5038 X présente une capacité thermique massique supérieure à celle de la paille de lin et de la terre. Son incorporation dans la bauge contribuera à améliorer considérablement cette propriété thermique.

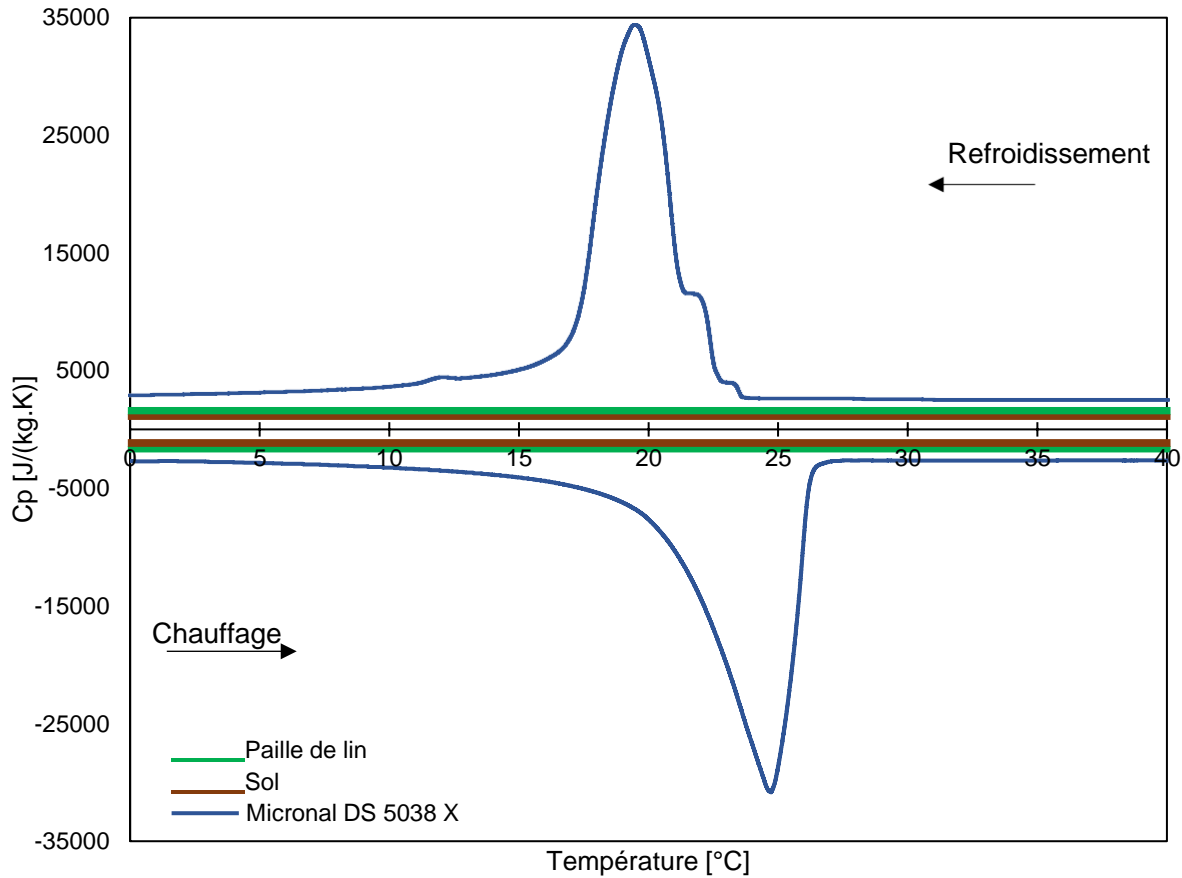


Figure 60: Evolution de la capacité thermique massique de la paille de lin, du sol et du Micronal 5038 X en fonction de la température.

En ce qui concerne l'effet de l'incorporation de PCM, l'analyse des résultats est menée en considérant deux situations, à savoir : en dehors et dans la zone de changement de phase. En dehors de cette zone, l'ajout de Micronal 5038 X améliore la valeur C_p de la bauge. L'augmentation est linéaire avec la teneur en PCM. La capacité thermique massique est environ 3 %, 7 % et 14 % plus élevée que celle de l'échantillon témoin pour une teneur en PCM de 2 %, 5 % et 10 %, respectivement.

Des pics de valeurs C_p sont observés dans la zone de changement de phase. Les valeurs maximales de B2, B5 et B10 sont environ 55 %, 132 % et 252 % plus élevées que la valeur C_p de la bauge de référence à la même température (moyenne des températures des fusion/solidification). Par exemple, la capacité thermique massique du la bauge passe de $1164 J.kg^{-1}.K^{-1}$ pour B0 à $3862 J.kg^{-1}.K^{-1}$ avec 10 % de PCM ajouté (B10) à environ $24^{\circ}C$. Cette amélioration est due non seulement à la chaleur sensible du matériau, mais aussi à la chaleur latente libérée/absorbée pendant le changement de phase du matériau. La chaleur latente peut être déterminée en intégrant la courbe de la capacité thermique massique dans la zone de changement de phase.

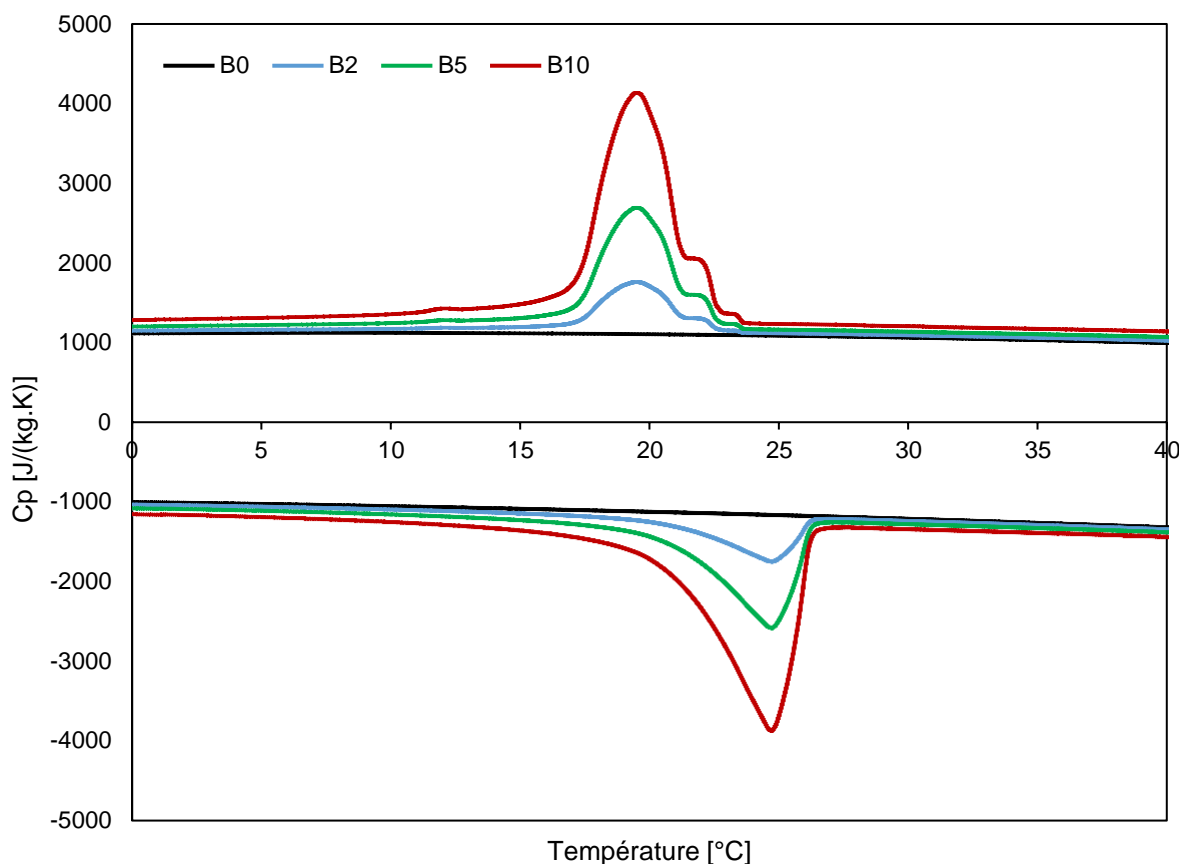


Figure 61: Evolution de la capacité thermique massique des formulation bauge-PCM en fonction de la température.

4.5. Réponse thermique à des conditions aux limites variables

Un cycle de température est appliqué à une paroi en bauge pour examiner son comportement et ses conséquences sur l'environnement intérieur. La boucle thermique considérée porte sur une température externe variant entre 16 et 29 °C. Le résultat obtenu correspond à la variation de la température interne de l'échantillon, voir la Figure 62.

La première observation concerne l'amplitude de la réponse au cycle thermique. Une légère diminution des températures de pointe supérieures est observée. Cette diminution atteint 0,5 °C maximum avec 10% de PCM incorporé. En revanche, aucune différence n'est observée sur les températures de pointe inférieures. Cependant, toutes les pointes de température, supérieures et inférieures, ont subi un faible décalage dans le temps. Un déphasage d'environ 12 min est détecté sur les pointes de température dans le cas de B10 par rapport à la référence.

Par ailleurs, l'avantage que représente l'incorporation de PCM dans les parois de la bauge est également démontré par la durée aux alentours de la température de changement de phase. Lorsqu'on considère une zone de température comprise entre 21 et 25 °C, la durée de passage dans cette zone augmente avec la teneur en PCM de la bauge. En effet, la durée où la température de la face intérieure de la bauge est comprise entre 21 °C et 25 °C passe de 4h7min pour l'échantillon de référence à 4h13min, 4h23min et 5h30min pour une teneur en PCM de 2 %, 5 %, et 10 %, respectivement. Les températures considérées ont été mesurées sur la surface interne des échantillons.

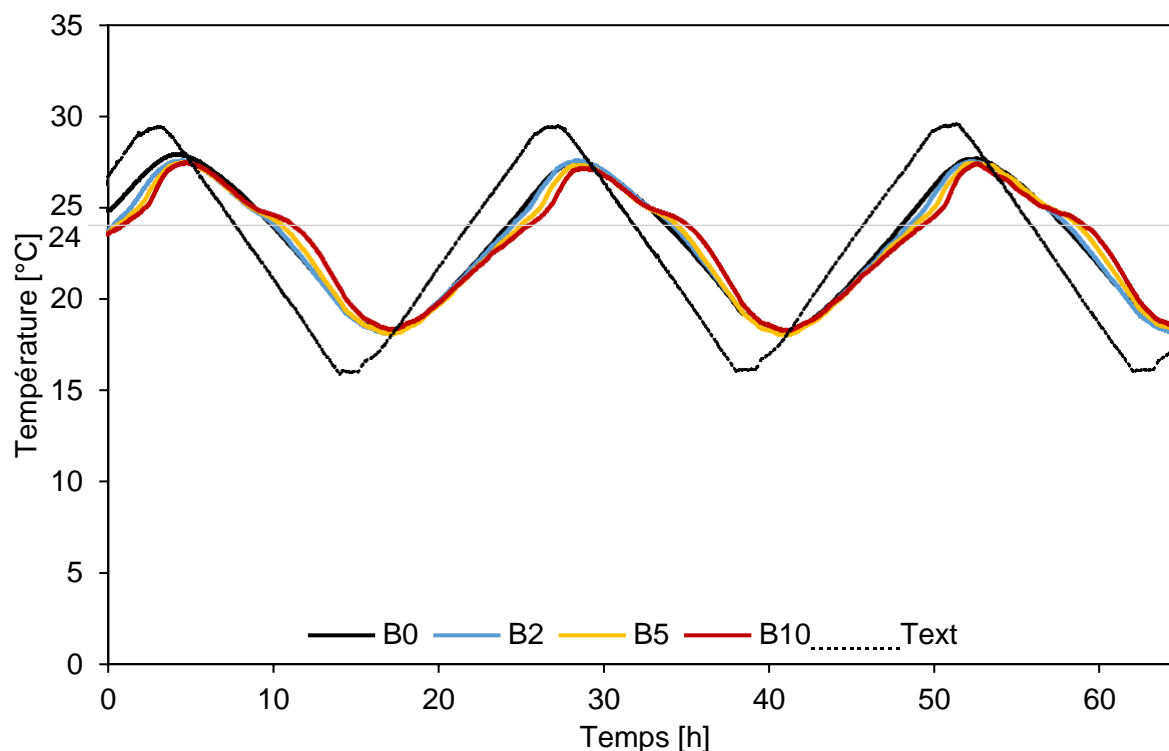


Figure 62: Évolution de la température intérieure des mélanges bauge-PCM lors d'un cyclage thermique.

4.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à l'étude de l'effet de l'ajout de PCM sur les propriétés thermiques, hygroscoPIques et mécaniques de la bauge. Ainsi, des échantillons de bauge incorporant différentes teneurs en PCM ont été formulés et étudiés. La conductivité thermique, la capacité thermique massique, les isothermes de sorption/désorption de l'humidité, la perméabilité à la vapeur d'eau et la résistance à la compression ont été étudiées expérimentalement.

L'étude expérimentale a révélé que l'incorporation de PCM dans la bauge améliore sa capacité d'isolation et de stockage de la chaleur tout en dégradant ses propriétés mécaniques et hygroscoPIques. Malgré cela, la bauge incorporant des PCM reste suffisamment résistante pour supporter des bâtiments de deux niveaux et conserve un bon comportement hygroscoPIque par rapport à d'autres matériaux conventionnels et à base de terre. Ainsi, une bauge incorporant 10 % de PCM perd presque 20 % de sa résistance à la compression (par rapport à une bauge sans PCM). Cette perte de résistance est associée à un comportement ductile de la bauge.

Par ailleurs, la bauge est considérée comme un matériau hygroscoPIque (perméable à la vapeur d'eau et capable d'absorber et de libérer l'humidité ambiante). L'ajout de PCM dégrade le comportement hygroscoPIque de la bauge. En effet, le pouvoir de sorption/désorption de la bauge et sa perméabilité à la vapeur d'eau sont inversement proportionnels à la teneur en PCM. La perméabilité à la vapeur d'eau diminue de 11 %, 16 % et 33 %, et le comportement de sorption/désorption diminue de 3 %, 10 % et 17 % à une HR égale à 90 % pour les mélanges B2, B5 et B10, respectivement. Cette baisse est supposée être due à la nature hydrophobe du PCM et à la diminution de la porosité ouverte du mélange.

Les études expérimentales ont montré que l'ajout de Micronal DS 5038 X dans la bauge diminue sa conductivité thermique d'environ 9 % pour B2 et 15 % pour B5 et B10. Le pouvoir isolant du mélange est donc augmenté en conséquence. Cette diminution est supposée due à la conductivité thermique du PCM beaucoup plus faible que celle de la bauge. Si l'on considère l'effet de la température, à 14 °C, 24

°C et 34 °C, la conductivité thermique n'a pas montré de changement significatif. Par ailleurs, l'incorporation du PCM a eu un impact sur la capacité thermique massique de la bauge. En effet, on observe que le Cp augmente linéairement avec la teneur en PCM en dehors de la zone de changement de phase. Lorsque la teneur en PCM est de 2 %, 5 % et 10 %, le Cp est de 3 %, 7 % et 14 % plus élevé que celui de l'échantillon de référence lors du chauffage ou du refroidissement. Ces améliorations sont presque identiques avant et après la zone de changement de phase. Au pic du changement de phase, la capacité thermique massique (combinaison de la chaleur latente du changement de phase et de la chaleur sensible) peut atteindre environ 252 % de la valeur de l'échantillon de référence lorsque 10 % de PCM est ajouté. Toutes ces propriétés thermiques se traduisent par une augmentation du temps nécessaire à un changement de température des faces intérieures de la bauge de 21 à 25 °C soumises à un cycle thermique.

Au vu de ces résultats, le travail expérimental a été complété par une simulation numérique. Les calculs visent à évaluer les économies d'énergie résultant de l'incorporation du PCM dans la bauge et également à déterminer la température de changement de phase optimale pour deux différents climats.

Chapitre

5

Simulation de l'impact de l'incorporation de PCM dans les façades d'un logement à usage d'habitation sur la consommation d'énergie et le confort des occupants

Chapitre 5 : Simulation de l'impact de l'incorporation de PCM dans les façades d'un logement à usage d'habitation sur la consommation d'énergie et le confort des occupants

5.1. Introduction

L'efficacité énergétique des bâtiments est un facteur clé pour répondre à la croissance de la demande énergétique mondiale *i.e. Green deal, Accord de Paris etc.* Divers logiciels sont utilisés pour simuler la consommation d'énergie dans les bâtiments. Parmi ceux-ci, nous pourrions citer DesignBuilder et EnergyPlus. Ce dernier est un logiciel développé par le département américain de l'énergie et il devient de plus en plus utilisé dans le domaine de la simulation et de la conception de bâtiments économes en énergie. DesignBuilder est un logiciel de simulation dynamique, possédant une interface graphique offrant de nombreuses fonctionnalités non disponibles simultanément dans les autres logiciels existants. Ce logiciel dispose de diverses fonctionnalités, telles que la modélisation, l'évaluation, l'optimisation et l'analyse des impacts environnementaux. L'intégration d'EnergyPlus à DesignBuilder permet de simuler de façon précise les performances énergétiques et thermiques des bâtiments incorporant des PCM.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier la consommation d'énergie d'un logement qui serait construit avec de la terre allégée ou de la bauge incorporant des PCM dans leurs parois extérieures. Ceci permettrait de montrer une éventuelle réduction résultant du processus de stockage de l'énergie par chaleur latente. Ainsi, une simulation numérique est entreprise. Elle détaille la consommation énergétique du logement et le confort hygrothermique de ses occupants dans un environnement climatique donné. Deux différents climats sont considérés, à savoir : un climat plutôt océanique dans le nord-ouest de la France et un climat méditerranéen.

5.2. Mode de résolution

EnergyPlus utilise un algorithme permettant de résoudre des problèmes de conduction unidimensionnelle par la méthode des différences finies (CondFD). Ce dernier permet de simuler les transferts de chaleur dans des milieux incorporant des PCM [161]. L'algorithme CondFD a été intégré à EnergyPlus pour surmonter les limitations associées à la fonction de transfert de chaleur par conduction (CTF) utilisée par de nombreux programmes de simulation de la performance énergétique des bâtiments [162]. Ainsi, le CondFD ne remplace pas mais complète la fonction de transfert par conduction pour simuler l'impact des PCM et les matériaux aux propriétés thermiques variables [163,164].

Parmi les schémas de résolution à utiliser pour l'algorithme CondFD, on cite le schéma implicite complet du premier ordre, *FullyImplicitFirstOrder* (à partir de la version 7). Dans EnergyPlus, ce schéma repose sur l'utilisation de l'équation (14).

$$c_p \rho \Delta x \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \left(k_w \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_e \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} \right) \quad (14)$$

où Δx est l'épaisseur de couche par différence finie ; Δt est le pas de temps de calcul ; T est la température du nœud ; ρ est la masse volumique du matériau ; i représente un nœud modélisé ; $i+1$ est le nœud adjacent à l'intérieur de la construction ; $i-1$ est le nœud adjacent à l'extérieur de la construction ; j est le pas de temps précédent ; $j+1$ est le nouveau pas de temps ; et k_w et k_e sont les

conductivités thermiques des interfaces entre les nœuds i et $i+1$ et entre les nœuds $i-1$ et i , respectivement

Les éléments sont discrétisés à l'aide de l'équation (15) [161], qui dépend d'une constante de discrétisation de l'espace (c), de la diffusivité thermique du matériau (α), et du pas de temps. La valeur par défaut de la constante de discrétisation est 3 [165]. Une valeur typique peut être comprise entre 1 et 3. Une valeur plus faible de cette constante entraîne un plus grand nombre de nœuds et un maillage plus fin.

$$\Delta x = \sqrt{c\alpha\Delta t} \quad (15)$$

Pour les matériaux avec hystérésis, la chaleur spécifique dépend de l'état momentané et de l'état précédent, car cette dernière tient compte des phénomènes d'hystérésis prenant place suite aux processus de fusion et de solidification [164]. Avant la version 8.8 d'EnergyPlus, le PCM ne pouvait être défini qu'au moyen de l'objet *MaterialProperty:PhaseChange*, qui calcule la chaleur spécifique à partir des données d'entrée tabulées des couples enthalpie-température par l'équation (16).

$$c_p = \frac{n_{i,new} - n_{i,old}}{T_{i,new} - T_{i,old}} \quad (16)$$

La principale limite de cette approche était l'utilisation d'une seule courbe enthalpie-température. Par conséquent, des problèmes de précision peuvent survenir lors de la simulation d'un PCM présentant une hystérésis prononcée [166]. Un nouvel objet *MaterialProperty:PhaseChangeHysteresis* remédie à cette limitation en prenant en compte non seulement l'état actuel mais aussi l'état précédent pour déterminer la chaleur spécifique du PCM. L'équation (17) fournit le calcul de la chaleur spécifique à chaque étape par EnergyPlus [163].

$$c_p = f(T_{i,new}; T_{i,prev}; PhaseState_{new}; PhaseState_{prev}) \quad (17)$$

En outre, l'approche par hystérésis nécessite d'autres paramètres d'entrée. L'un d'entre eux est la chaleur latente pendant tout le processus de changement de phase (J/kg). C'est la quantité totale de chaleur latente absorbée ou déchargée par le matériau pendant le processus de fusion et de solidification. Bien que les courbes d'enthalpie de fusion/solidification présentent des allures différentes, la quantité totale d'énergie absorbée/dégagée lors de la transition d'un état à l'autre est la même [167]. D'autres paramètres concernent les températures maximales de fusion et de solidification (°C), etc.

5.3. Modèle de simulation

L'analyse énergétique a porté sur une maison individuelle typique d'un étage avec des murs extérieurs verticaux en terre allégée ou en bauge incorporant des PCM et une surface utile de 95,11 m², présentée à la Figure 63. Pour simuler numériquement les PCM incorporés dans la terre allégée ou la bauge, on considère un composite unique d'une épaisseur de 50 cm. Les propriétés du composite (masse volumique, conductivité thermique, capacité thermique massique et perméabilité à la vapeur d'eau) sont issues des données expérimentales. La chaleur latente du composite est considérée égale à celle du PCM multipliée par la quantité de ce dernier dans le composite.

La méthode avec l'hystérésis est l'option de modélisation appropriée des matériaux à base de PCM dans EnergyPlus. En choisissant cette méthode, il est possible pour les PCM de suivre différentes courbes de température/enthalpie pendant les processus de fusion/solidification. Par conséquent, il en résulte une approximation plus représentative du comportement réel de l'enveloppe. Pendant les

simulations, on considère que les autres éléments de construction de la maison restent inchangés et ne contribuent pas aux changements de la consommation d'énergie. Les différentes configurations d'éléments sont présentées dans la Figure 64.

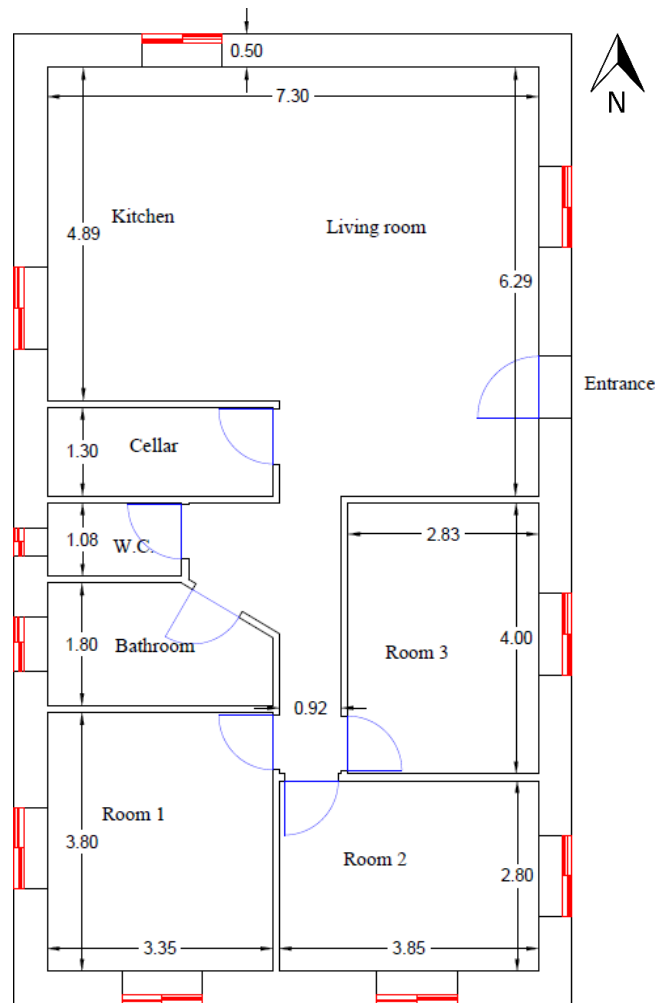


Figure 63: Plan 2D de la maison individuelle simulée.

La maison est supposée occupée par une famille de quatre personnes à raison de 0,042 personne/m² pendant toute l'année de 16h à 9h et tous les week-ends. La norme RT2012 définit des seuils d'étanchéité à l'air de l'enveloppe [168]. Ainsi, la perméabilité à l'air de l'enveloppe sous 4 Pa (Q4Pa) doit être inférieure ou égale à 0,60 m³/(h.m²) en maison individuelle. Dans ces simulations, cette dernière est considérée égale à 0,5 m³/(h.m²).

La simulation numérique est réalisée sur une année complète. Deux scénarios thermiques sont considérés et évalués :

- Un premier scénario où la température de la maison n'est pas contrôlée afin d'évaluer le confort thermique des occupants,
- Un second où le chauffage/la climatisation est comptabilisé afin de simuler la consommation d'énergie.

Les simulations sont effectuées en considérant deux climats différents comme rappelé en introduction. Un climat plutôt océanique dans le nord-ouest de la France (Caen) et un climat méditerranéen (Nice). Cela permettra de mettre en évidence l'effet du climat sur l'adéquation du stockage d'énergie par PCM dans les bâtiments en terre allégée et en bauge. Toutes les données météo horaires fournies avec DesignBuilder sont fournies par le ministère américain de l'énergie [165,169].

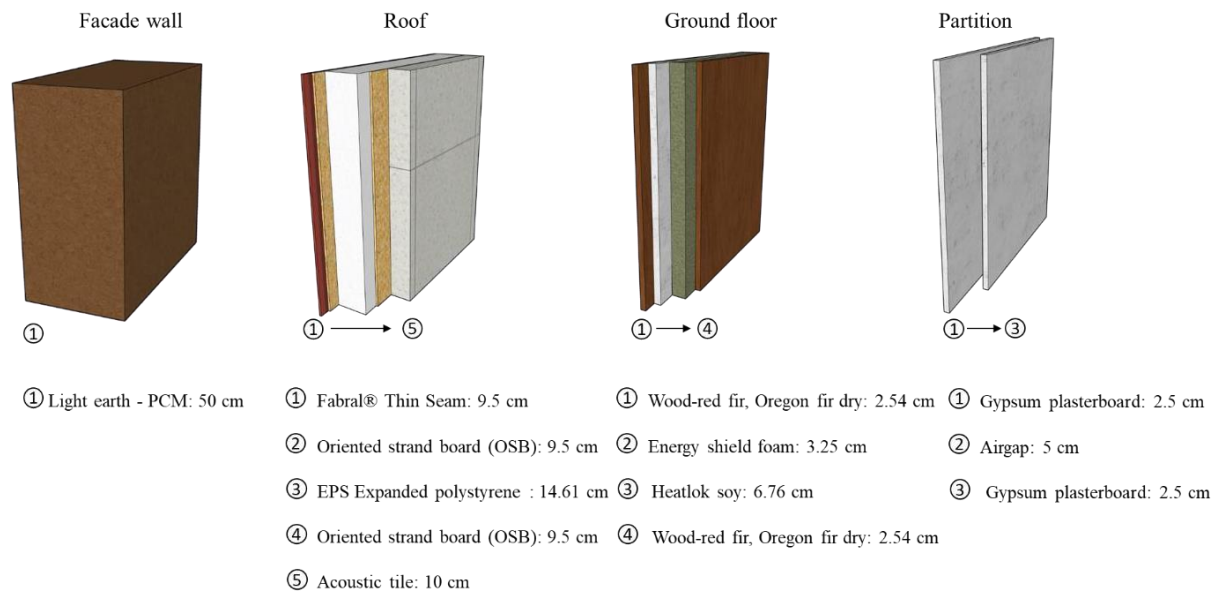


Figure 64: Combinaisons d'éléments de la maison [165].

5.4. Confort thermique, hygrothermique et simulation énergétique

De manière générale, le confort thermique désigne les situations dans lesquelles les mouvements et les positions du corps humain sont considérés comme agréables, c'est-à-dire lorsqu'aucun effort n'est nécessaire pour que le corps humain se sente bien. La notion de confort a évolué au fil du temps. De nombreux chercheurs sont passés du confort thermique au confort adaptatif (diagramme de Brager) et au confort hygrothermique (diagramme de Givoni), etc.

5.4.1. Confort thermique adaptatif

Le confort thermique des occupants est défini comme l'état psychologique d'être satisfait de la température du milieu environnant. Cet état est obtenu en maintenant un équilibre thermique entre le corps humain et son environnement [170]. La sensation thermique peut être affectée par plusieurs facteurs, notamment les caractéristiques personnelles, psychologiques, culturelles et contextuelles de chaque région. Ces derniers peuvent influencer la perception thermique et la façon dont une personne s'adapte à l'environnement thermique, comme le choix des vêtements, etc. [171–173]. Dans les bâtiments résidentiels, les occupants ont une plus grande liberté en termes de contrôle de cet environnement en ajustant leurs vêtements, en ouvrant les fenêtres, ainsi qu'en activant les systèmes de refroidissement ou de chauffage, par rapport à d'autres environnements tels que les maisons de retraite [174–176]. Dans les espaces ventilés naturellement, les températures de confort intérieur dépendent des températures de l'air extérieur [176–180]. D'où le terme adaptatif, où l'être humain adapte les températures intérieures en fonction des températures extérieures. Par exemple, en période de chaleur, un occupant acceptera une température plus élevée qu'en période de froid. C'est l'hypothèse qui caractérise le diagramme de confort de Brager [176,180–182].

Le diagramme de Brager indique les plages de températures opératives intérieures recommandées pour les bâtiments non équipés de systèmes de refroidissement mécanique en fonction de la température de l'air extérieur. La méthode est destinée à être utilisée uniquement dans les bureaux, les habitations ou les bâtiments occupés de manière similaire avec des activités essentiellement sédentaires comme les maisons individuelles ayant un accès facile aux fenêtres où les occupants sont libres d'adapter leurs vêtements aux conditions thermiques intérieures et/ou extérieures, et où les conditions thermiques sont contrôlées principalement par l'ouverture et la fermeture de l'enveloppe des fenêtres.

Comme le diagramme de Brager, divers modèles de confort thermique adaptatif existent. Certains de ces modèles sont inclus dans des normes telles que : EN 15251 [183,184], EN 16798-1 [181], et ASHRAE 55 [170]. La norme EN 15251 est la première norme de confort thermique adaptatif applicable en Europe. Cette norme a été mise à jour et remplacée par la norme EN 16798-1, apportant des changements sur les plages de température. Enfin, la norme ASHRAE 55 est le modèle de confort thermique adaptatif le plus utilisé au niveau mondial. Il établit deux niveaux de limites basés sur le pourcentage d'acceptabilité dans l'espace intérieur, 80 % et 90 %.

Selon la norme EN 16798-1, des limites de température supérieures et inférieures sont définies en fonction de la catégorie du bâtiment. Ces catégories représentent des critères d'environnement intérieur. La maison modèle dans cette étude est une maison conventionnelle de catégorie II *i.e. catégorie de qualité d'ambiance intérieure moyenne* [181]. La température de l'air extérieur est définie par l'équation (18) et les limites supérieures/inférieures sont définies par les équations (19) et (20), respectivement. Ces équations ne sont appliquées que lorsque la température extérieure est comprise entre 10 et 30 °C. À titre d'illustration, la Figure 65 présente les limites de température de confort ainsi que des données indicatives d'échantillons d'essai. Les lignes bleues et rouges font référence aux limites inférieures et supérieures selon la norme EN 16798-1 [181]. Chaque point correspond à une heure de l'année.

$$\theta_{rm} = (\theta_{ed-1} + 0.8 \theta_{ed-2} + 0.6 \theta_{ed-3} + 0.5 \theta_{ed-4} + 0.4 \theta_{ed-5} + 0.3 \theta_{ed-6} + 0.2 \theta_{ed-7})/3.8 \quad (18)$$

$$\text{Limite supérieure} \quad \theta_0 = 0.33 \theta_{rm} + 18.8 + 3 \quad (19)$$

$$\text{Limite inférieure} \quad \theta_0 = 0.33 \theta_{rm} + 18.8 - 4 \quad (20)$$

où :

- θ_{rm} Température moyenne glissante extérieure pour le jour considéré [°C]
- θ_{ed-i} Température moyenne quotidienne de l'air extérieur pour le $i^{\text{ème}}$ jour précédent [°C]
- θ_0 Température opérative intérieure [°C]

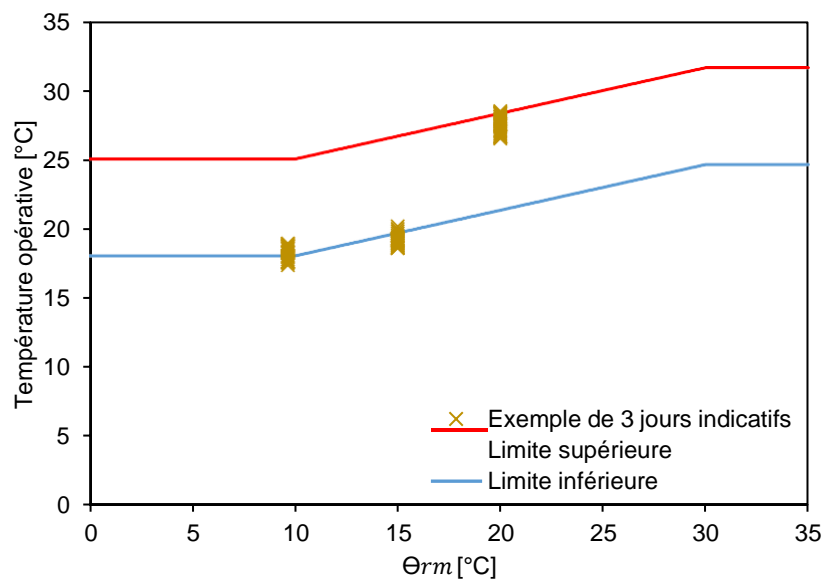


Figure 65: Illustration du confort thermique adaptatif basé sur la norme EN 16798-1 [181].

5.4.2. Confort hygrothermique : Diagramme de Givoni

Pour étudier graphiquement le confort hygrothermique, plusieurs diagrammes bioclimatiques ont été développés au fil des années, notamment le diagramme de Givoni qui est basé sur les conditions intérieures du bâtiment [175,185,186]. Givoni a utilisé le tableau psychrométrique comme base de référence pour son diagramme bioclimatique. Ce dernier cartographie la zone de confort et définit les mesures de conception bioclimatique pour atteindre cette zone [187–191].

Dans cette étude, la température du bulbe sec et l'humidité relative constituent les données d'entrée du diagramme. La zone de confort est définie entre 20 et 27 °C de température du bulbe sec et entre 20 et 80 % d'humidité relative en été, et jusqu'à 18 °C en hiver [187,192]. Par ailleurs, les zones de confort thermique dépendent de la vitesse de l'air (généralement jusqu'à 1,5 m/s, au-delà de laquelle un risque de perturbation existe). Dans ce travail, le modèle de confort classique avec un "air immobile" est considéré. Ainsi la vitesse de l'air est supposée être inférieure à 0,25 m/s [186]. Les résultats numériques ont été introduits dans un diagramme psychrométrique pour évaluer le confort en utilisant la méthodologie de Givoni et déterminer un temps de confort pour une année dans le bâtiment considéré.

5.4.3. Simulation énergétique

Dans cette section, un scénario de chauffage et de refroidissement est établi. En cas d'occupation de la maison en dehors des heures de sommeil, le point de consigne du chauffage est fixé à 19 °C et celui du refroidissement à 28 °C, voir la Figure 66. En cas d'inoccupation ou de sommeil, les points de consigne sont ajustés à 16 °C et 30 °C pour le chauffage et le refroidissement, respectivement. La simulation est réalisée pour les deux villes françaises proposées. Enfin, la température de changement de phase optimale des PCM (température correspondante au gain d'énergie le plus important) pour chaque ville sera évaluée.

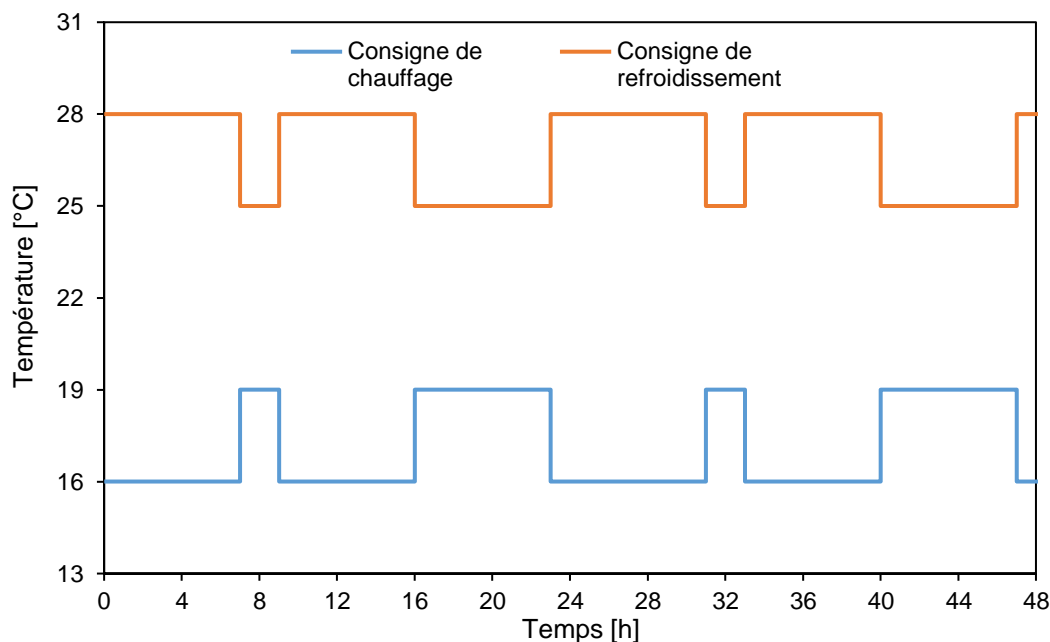
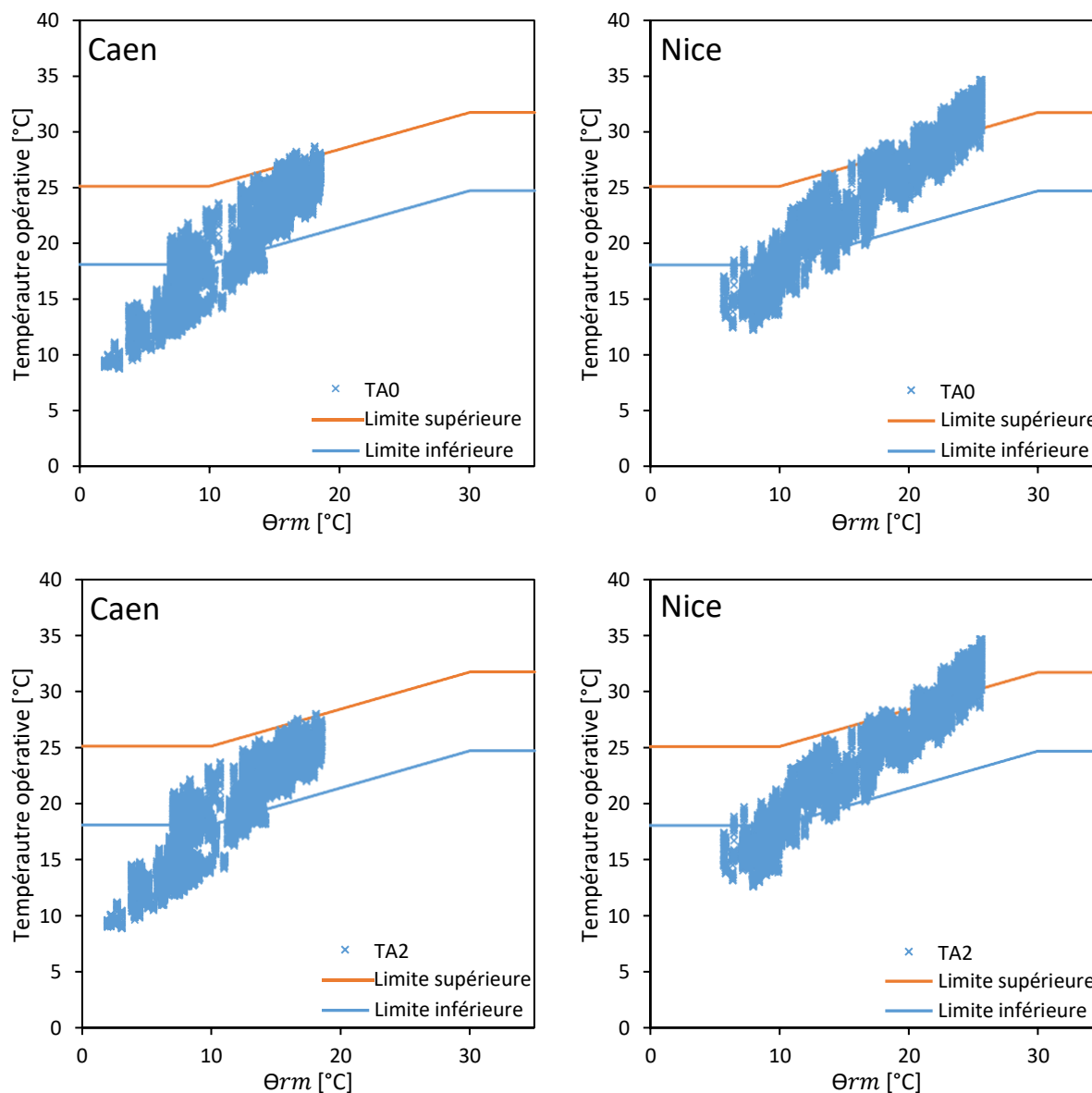


Figure 66: Scénario du chauffage/refroidissement adopté en jours de semaine (sauf le week-end).

5.5. Effet de l'incorporation de PCM dans une maison individuelle en terre allégée

5.5.1. Confort thermique adaptatif dans une maison individuelle

Sur une période d'un an, il y a 8760 heures. La simulation donne la température moyenne sur une heure simulée tout au long de l'année. Autrement dit, 8760 températures sur une année. Ainsi, le confort thermique adaptatif est calculé en fonction du nombre de points sur 8760 heures sont situés dans la zone de confort. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 67.



Note : TA = Terre allégée, le numéro indique la teneur en PCM dans la terre allégée.

Figure 67: Évolution du confort adaptatif dans une maison individuelle en terre allégée incorporant des PCM à Caen et à Nice, (suite de la figure, page suivante).

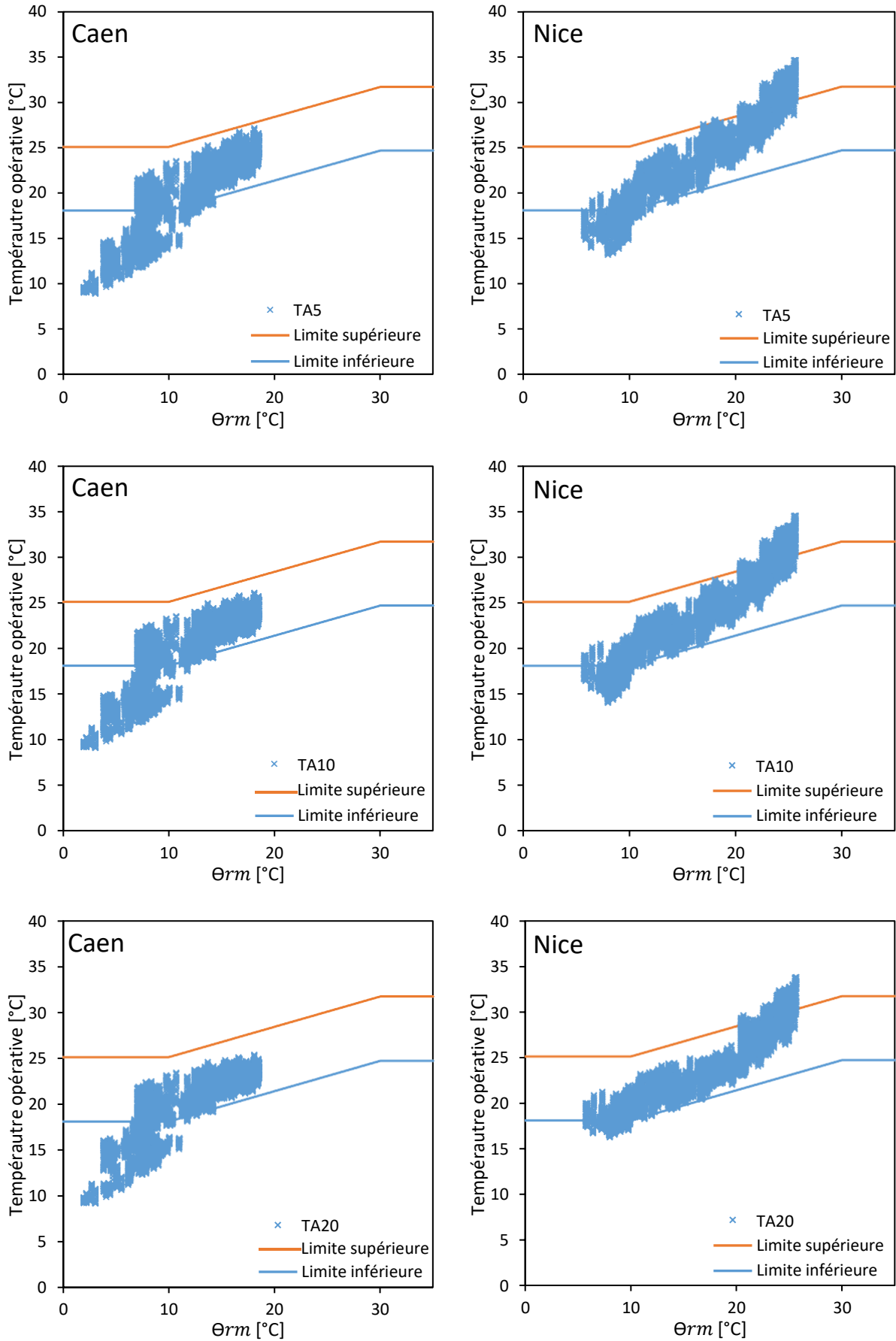


Figure 67 : suite et fin.

La distribution des points sur la carte de confort de Brager révèle un réarrangement autour de la température de fusion/solidification des PCM, à savoir 20-24 °C. Le PCM permet de stabiliser les températures sur une longue durée autour de sa température de changement de phase. Aux alentours de 24°C, la chaleur venant de l'extérieur ne pénètre pas dans la maison, mais elle est absorbée par le PCM pour fondre causant cette stabilisation de température intérieure. Par conséquent, dans les deux villes, une augmentation du confort thermique est constatée. Le confort dans une maison en terre allégée, sans conditions de chauffage/refroidissement, augmente de 47 % à 62 % à Caen et de 52 % à 84 % à Nice, en fonction de la teneur en PCM, voir le Tableau 22.

Tableau 22: Confort thermique adaptatif dans une maison individuelle en considérant les différentes formulations terre allégée-PCM à Caen et à Nice.

Ville	Confort thermique adaptatif [%]				
	TA0	TA2	TA5	TA10	TA20
Caen	47	51	56	60	62
Nice	52	57	62	70	84

Note : TA = Terre allégée, le numéro indique la teneur en PCM.

Le chapitre 3 montre que la terre allégée est un matériau hygroscopique ayant une bonne capacité de sorption/désorption et une perméabilité à la vapeur d'eau élevée. Compte tenu du caractère hygroscopique de la terre allégée, il est aussi intéressant d'étudier le confort hygrothermique dans une habitation réalisée avec un tel matériau.

5.5.2. Confort hygrothermique (diagramme de Givoni) dans une maison individuelle en terre allégée

Les résultats de la simulation DesignBuilder correspondent à des températures et des humidités horaires moyennes tout au long de l'année. Ces résultats sont ensuite insérés dans le diagramme psychrométrique afin d'identifier les points situés dans la zone de confort de Givoni. Les résultats obtenus dans le cas de la terre allégée sont présentés à Caen et à Nice dans la Figure 68.

Le rôle du PCM est de stabiliser la température aux alentours de son point de changement de phase grâce à sa chaleur latente. Cet effet est visible sur les graphes concernant le confort dans la maison en terre allégée incorporant des PCM dans ses parois externes. Sur la Figure 68, il est possible d'apercevoir une augmentation significative de la densité des points au voisinage de la température de changement de phase du PCM. Par conséquent, le confort hygrothermique s'en trouve amélioré, voir Tableau 23. Le confort passe d'environ 50% (TA0) à 61% (TA20) et de 47% (TA0) à 73%(TA20) à Caen et à Nice, respectivement.

L'amélioration est plus importante à Nice qu'à Caen en raison du nombre de fois où le phénomène de changement de phase est déclenché. A Nice, la température parvient plus souvent à la température de transition du Nextek 24D qu'à Caen, expliquant cette différence.

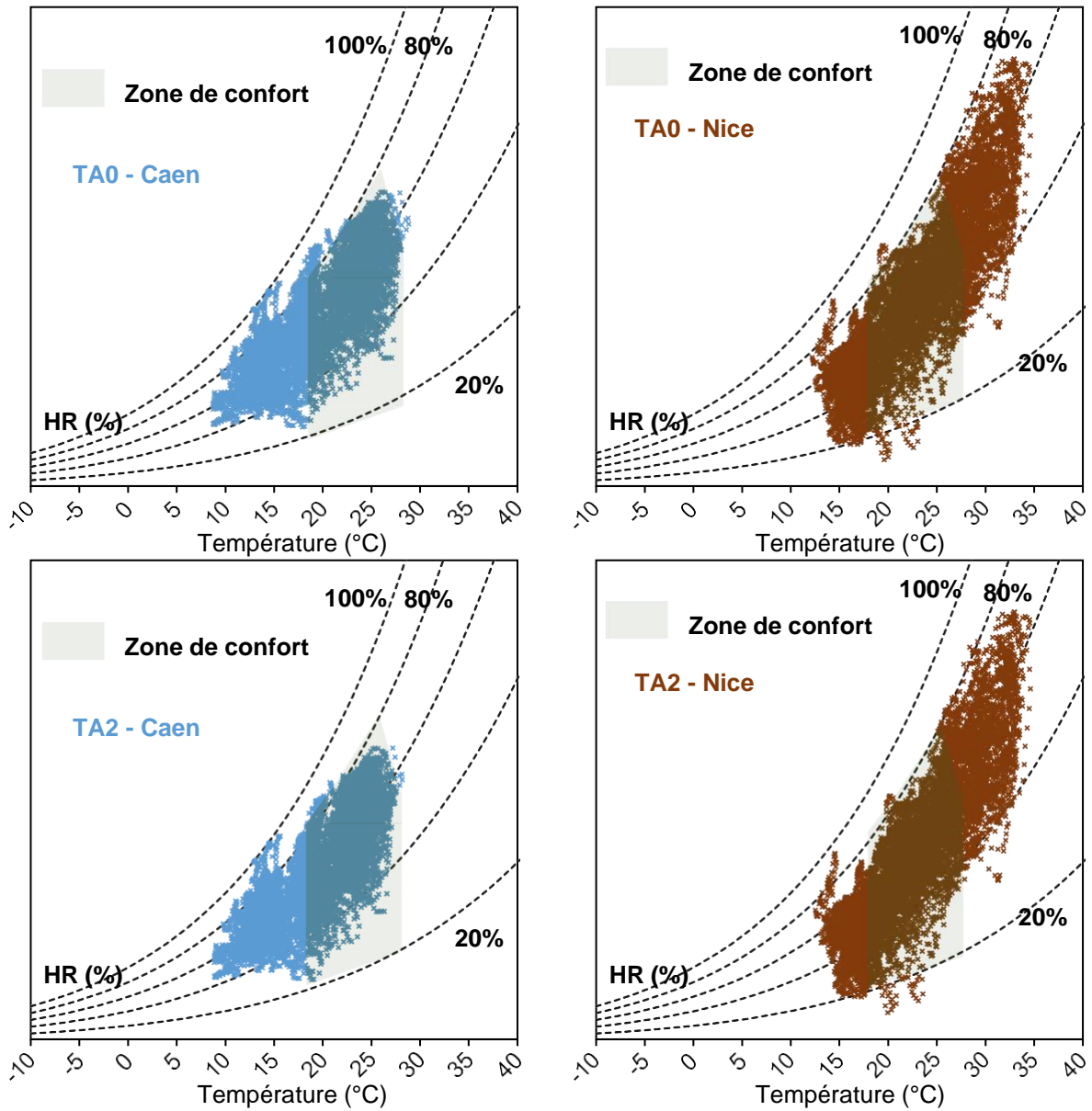


Figure 68: Évolution du confort hygrothermique dans une maison individuelle en terre allégée incorporant des PCM à Caen et à Nice, (suite de la figure, page suivante).

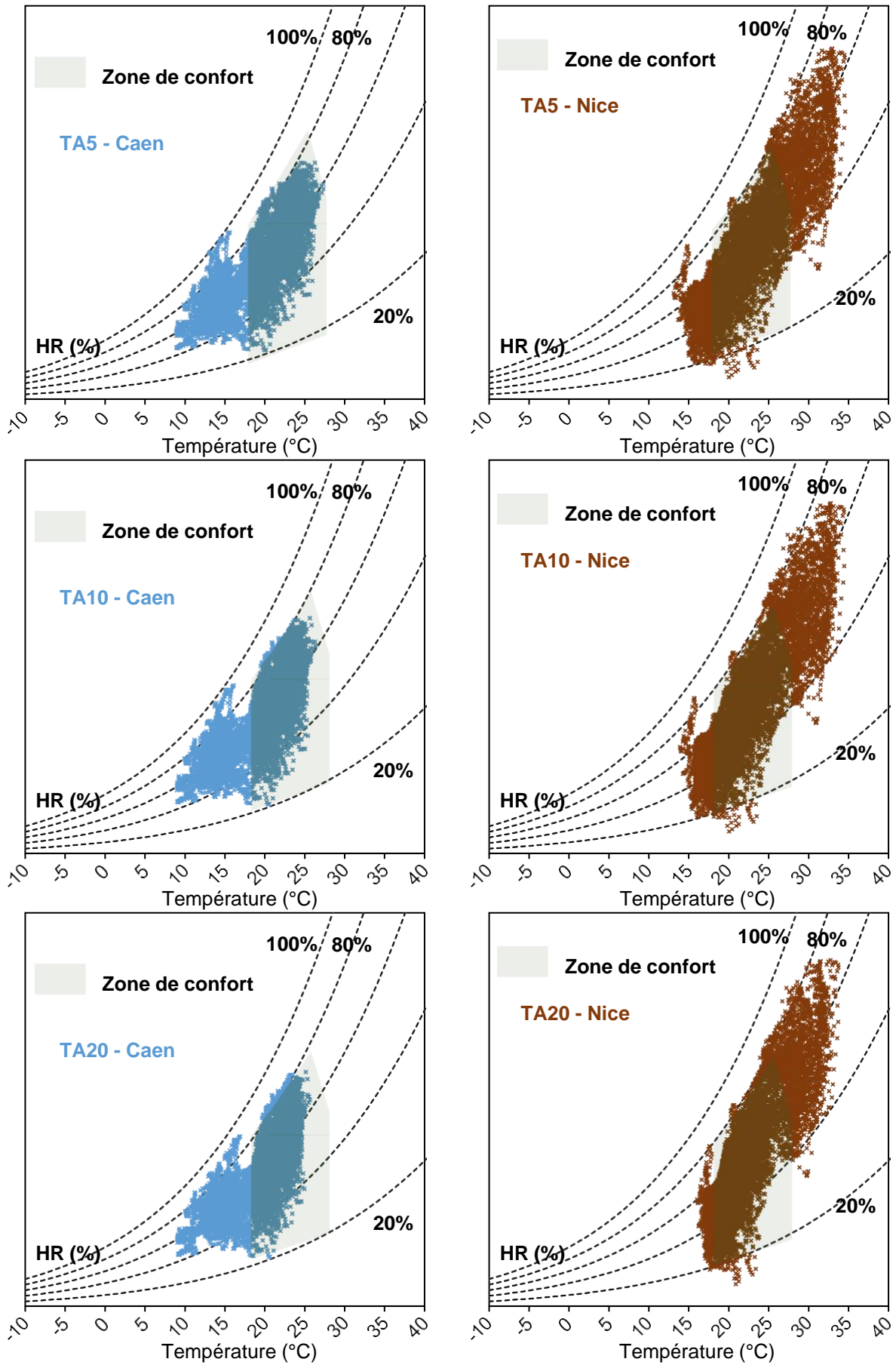


Figure 68 : Suite et fin.

Les valeurs de confort hygrothermique (diagramme de Givoni) sont relativement faibles comparées à celles du confort adaptatif (diagramme Brager). Ceci pourrait-être dû au fait que le diagramme de Givoni est plus exigeant et relie le confort non seulement à la température mais aussi à l'humidité relative de la pièce de l'habitation.

Tableau 23: Valeurs du confort hygrothermique permises par les différentes formulations de terre allégée-PCM à Caen et Nice.

Ville	Confort selon Givoni [%]				
	TA0	TA2	TA5	TA10	TA20
Caen	49,7	54,7	57,9	60,1	60,6
Nice	46,7	52,5	56,9	62,7	72,6

Les diagrammes de Brager et de Givoni montrent tous deux une amélioration du confort par l'incorporation de PCM dans la terre allégée. Les écarts entre les confort hygrothermique et adaptatif sont supposés être dues à la prise en compte de l'humidité relative en plus de la température dans le confort hygrothermique. Malgré cette amélioration, les résultats révèlent un besoin de chauffage et de refroidissement pour approcher un confort de 100 % pour les deux villes. L'impact du gain de confort sur la consommation d'énergie de la maison étudiée est décrit dans la section suivante.

5.5.3. Consommation d'énergie d'une maison individuelle en terre allégée

La consommation d'énergie *i.e. besoins de chauffage et de refroidissement*, ainsi que le gain énergétique généré par les différentes formulations de la terre allégée étudiées dans des climats océanique et méditerranéen sont présentées sur la Figure 69.

Comme attendu, les résultats montrent qu'à Caen les besoins en chauffage dominant, à l'inverse de ce qui peut être rencontré à Nice où les besoins en refroidissement prédominent. La Figure 69 montre une diminution presque linéaire de la consommation d'énergie consacrée au chauffage et au refroidissement en fonction de la teneur en PCM dans la terre allégée pour les deux villes. Pour une teneur en PCM de 20 %, les économies d'énergie peuvent atteindre environ 42 % et 50 % à Caen et à Nice, respectivement. Ces résultats sont cohérents avec les évolutions déjà constatées sur le confort calculé des occupants. Le gain énergétique est plus élevé à Nice qu'à Caen car le processus PCM a été déclenché davantage dans la première ville que dans la seconde.

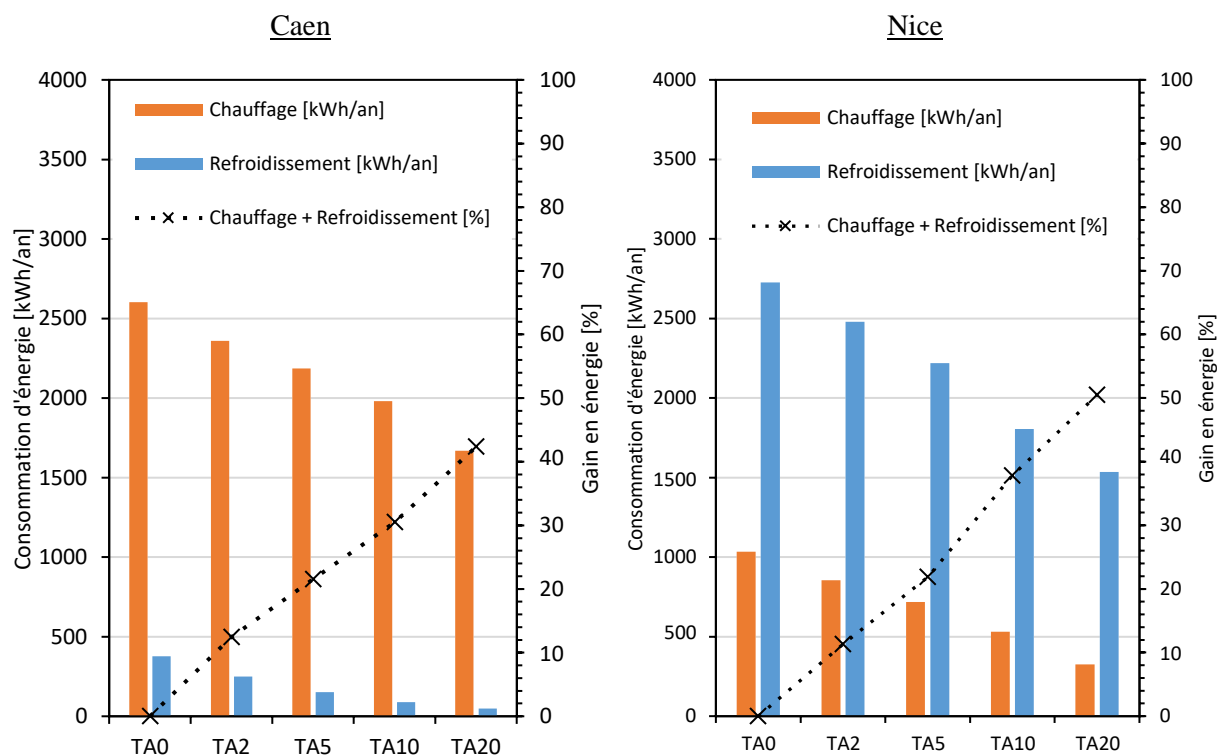


Figure 69: Consommation et gains annuels d'énergie (refroidissement et chauffage) dans une maison individuelle en terre allégée incorporant des PCM dans ses parois extérieures à Caen et à Nice.

5.5.4. Température optimale de changement de phase

Les bénéfices pourront être différents si les températures de changement de phase du PCM varient. Concernant cette température optimale de fusion/solidification, les résultats représentés sur la Figure 70 montrent qu'une plage de température comprise entre 18,75 et 20,75 °C sera idéale pour le climat de Caen, tandis qu'une plage comprise entre 20,75 et 22,75 °C sera plus adaptée au climat de Nice. Ceci est valable en considérant la formulation TA10 (terre allégée incorporant 10 % de PCM). Ces températures sont susceptibles d'être atteintes fréquemment pour chacune des régions, que ce soit à Caen ou à Nice. Par conséquent, et en combinaison avec les conditions intérieures, les oscillations autour de ces températures activeront le processus de stockage de l'énergie par la chaleur latente du PCM.

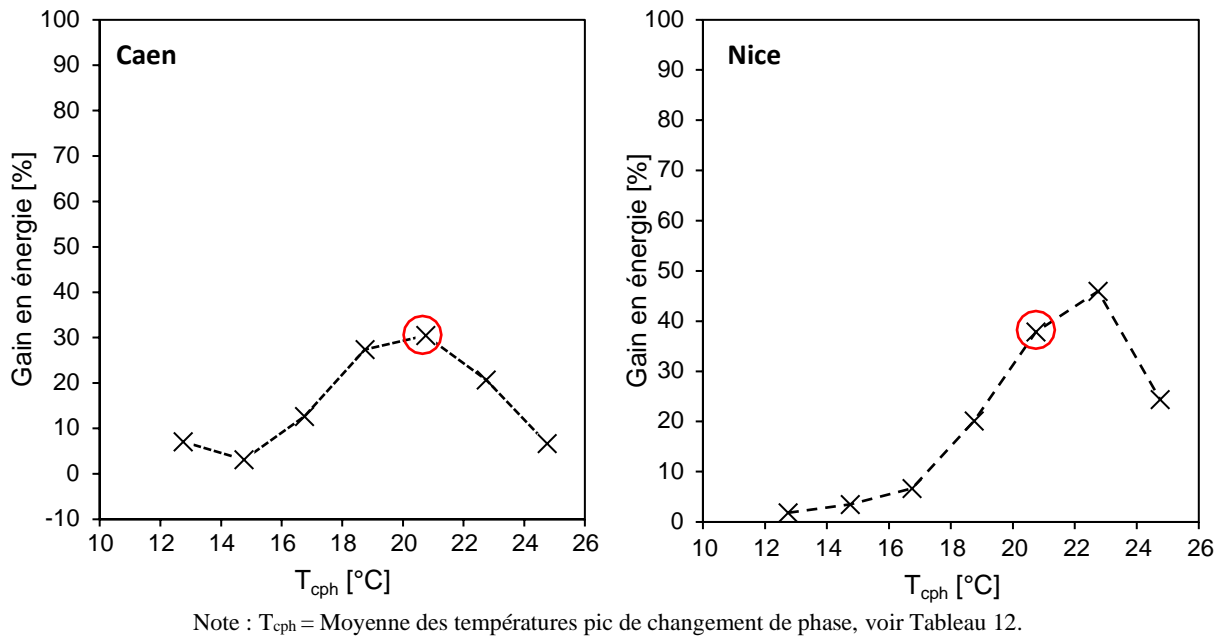


Figure 70: Gain d'énergie en fonction de la température maximale de fusion/solidification des PCM à Caen et Nice dans le cas du mélange TA10.

5.6. Effet de l'incorporation de PCM dans une maison individuelle en bauge

5.6.1. Confort thermique adaptatif dans une maison individuelle

De même pour le cas d'une maison en bauge, DesignBuilder fournit des températures opératives horaires tout au long de l'année. Ces températures sont reproduites sur la Figure 71 en fonction de la température extérieure moyenne quotidienne glissante.

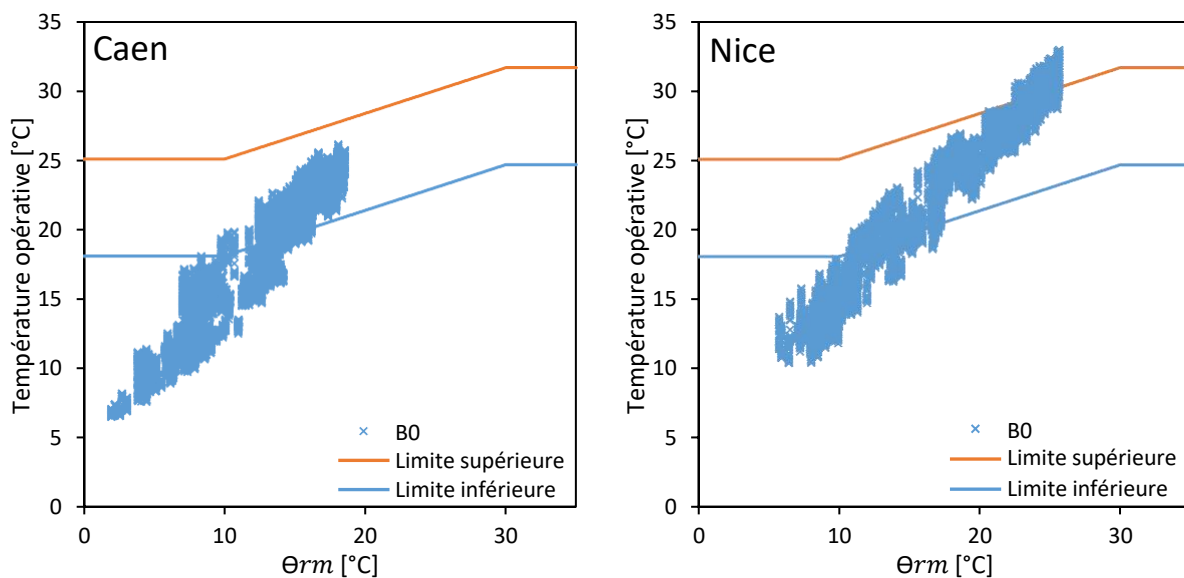


Figure 71: Confort adaptatif dans une maison en bauge à Caen et à Nice, (suite de la figure, page suivante).

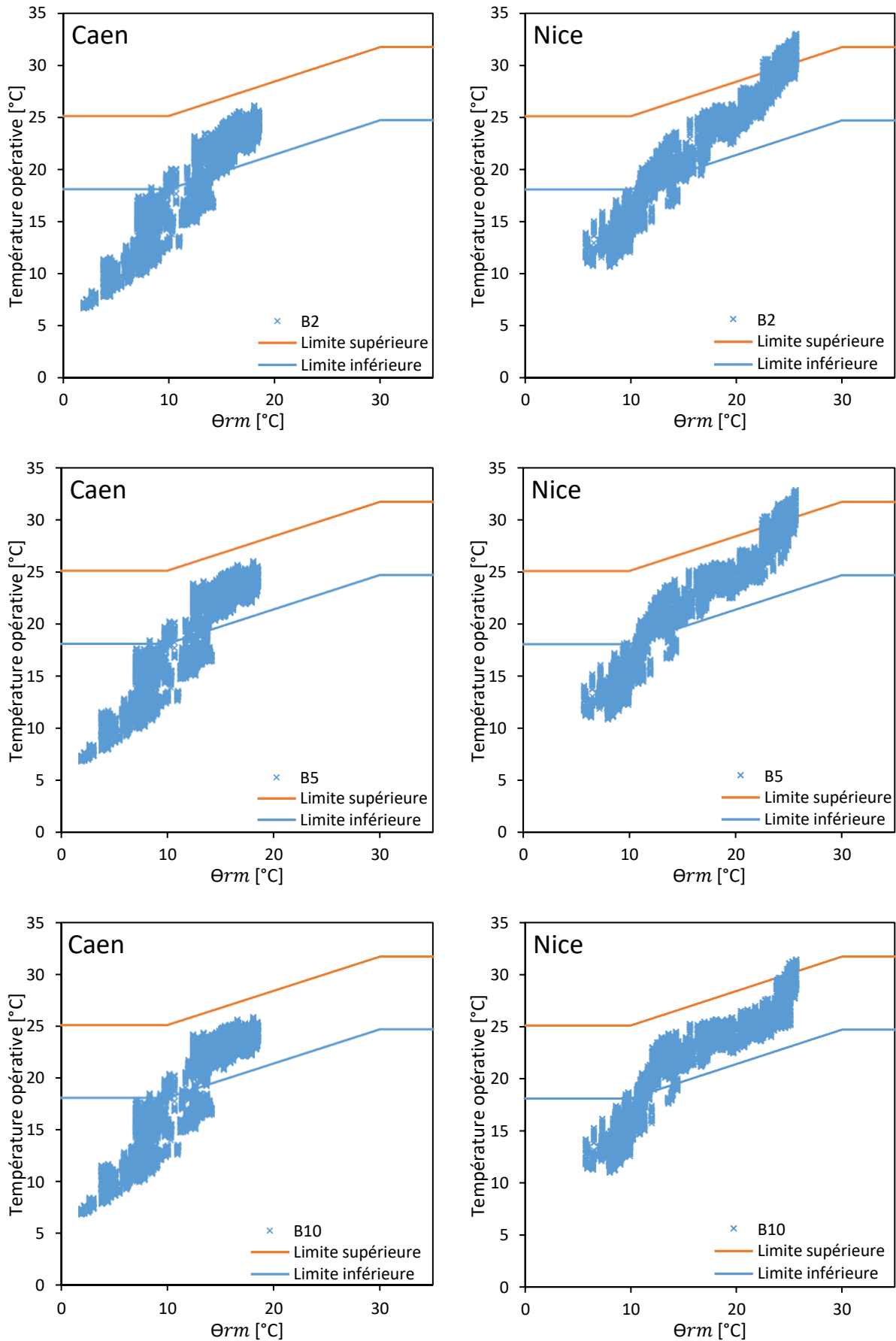


Figure 71 : Suite et fin.

La répartition des points figurant sur la carte de confort de Brager témoigne d'un réarrangement aux alentours de la température de fusion/solidification du Micronal 5038 X, à savoir (22-24 °C). Comparées au PCM Nextek 24D, les températures réelles de fusion/solidification du Micronal sont légèrement plus élevées. Les résultats des Figure 67 et Figure 71 témoignent de ces évolutions : les points de réarrangement sont un peu plus élevés dans le cas de la bauge.

En effet, le PCM offre de plus longues périodes de stabilité de la température autour de sa température de changement de phase. À environ 24 °C, la chaleur extérieure est absorbée par le PCM qui fond ou se solidifie, créant ainsi une stabilisation de la température intérieure. Par conséquent, dans les deux villes, le confort thermique s'accroît. Le confort dans une maison en bauge, sans conditions de chauffage/refroidissement, se voit augmenter de 35% à 40% à Caen et de 47% à 64% à Nice, en fonction de la teneur en PCM, voir le Tableau 24.

En effet, le confort thermique d'une maison construite en bauge est inférieur à celui d'une maison construite en terre allégée. Cette différence est compréhensible étant donné que la terre allégée a des propriétés thermiques supérieures. De plus, avec l'ajout de 10% de PCM à titre explicatif dans les parois d'une maison située à Caen, le confort thermique s'est amélioré de 11 points pour la terre allégée de référence. Tandis que pour la maison en bauge, cette amélioration n'est que de 5 points. Ces écarts d'amélioration sont liés à la différence de chaleur latente du PCM. Micronal 5038 X, le PCM utilisé avec la bauge, a une chaleur latente moins élevée que Nextek 24D utilisé avec la terre allégée.

Tableau 24: Confort thermique adaptatif par les différentes formulations bauge-PCM à Caen et à Nice.

Ville	Confort thermique adaptatif [%]			
	B0	B2	B5	B10
Caen	35	37	39	40
Nice	47	52	56	64

La bauge constitue un matériau structurel mais hygroscopique disposant d'une bonne capacité de sorption/désorption et une importante perméabilité à la vapeur d'eau. En considérant le caractère hygroscopique de la bauge, il est donc pertinent d'étudier le confort hygrothermique dans une maison conçue avec ce genre de matériau.

5.6.2. Le confort hygrothermique (diagramme de Givoni) dans une maison individuelle en bauge

En sortie de la simulation DesignBuilder, la température de l'air et l'humidité moyennes horaires sont données tout au long de l'année. A partir de là, ces résultats sont déployés dans le diagramme psychrométrique afin d'identifier le positionnement des points situés par rapport à la zone de confort de Givoni. Pour Caen et Nice, le diagramme psychrométrique est présenté sur la Figure 72, pour les cas d'une maison individuelle en bauge.

Les résultats présentés pour la maison construite avec des murs en bauge incorporant du PCM dans ses parois extérieures témoignent d'une stabilisation de certaines valeurs de la température autour de la température de fusion du Micronal 5038 X. Dans la Figure 72, une augmentation significative de la densité des points à proximité de la température de fusion du PCM est perceptible. Il en résulte une augmentation du confort hygrothermique, voir Tableau 25. Ce dernier passe d'environ 11 % à 14,5 % et de 31 % à 38 % en ajoutant à la bauge 10 % massique de PCM à Caen et à Nice, respectivement. Le gain est plus important à Nice qu'à Caen au regard du nombre de fois où se produit le phénomène de changement de phase. Ce gain est dû au fait que le Micronal 5038 X parvient à sa phase de transition plus souvent à Nice qu'à Caen.

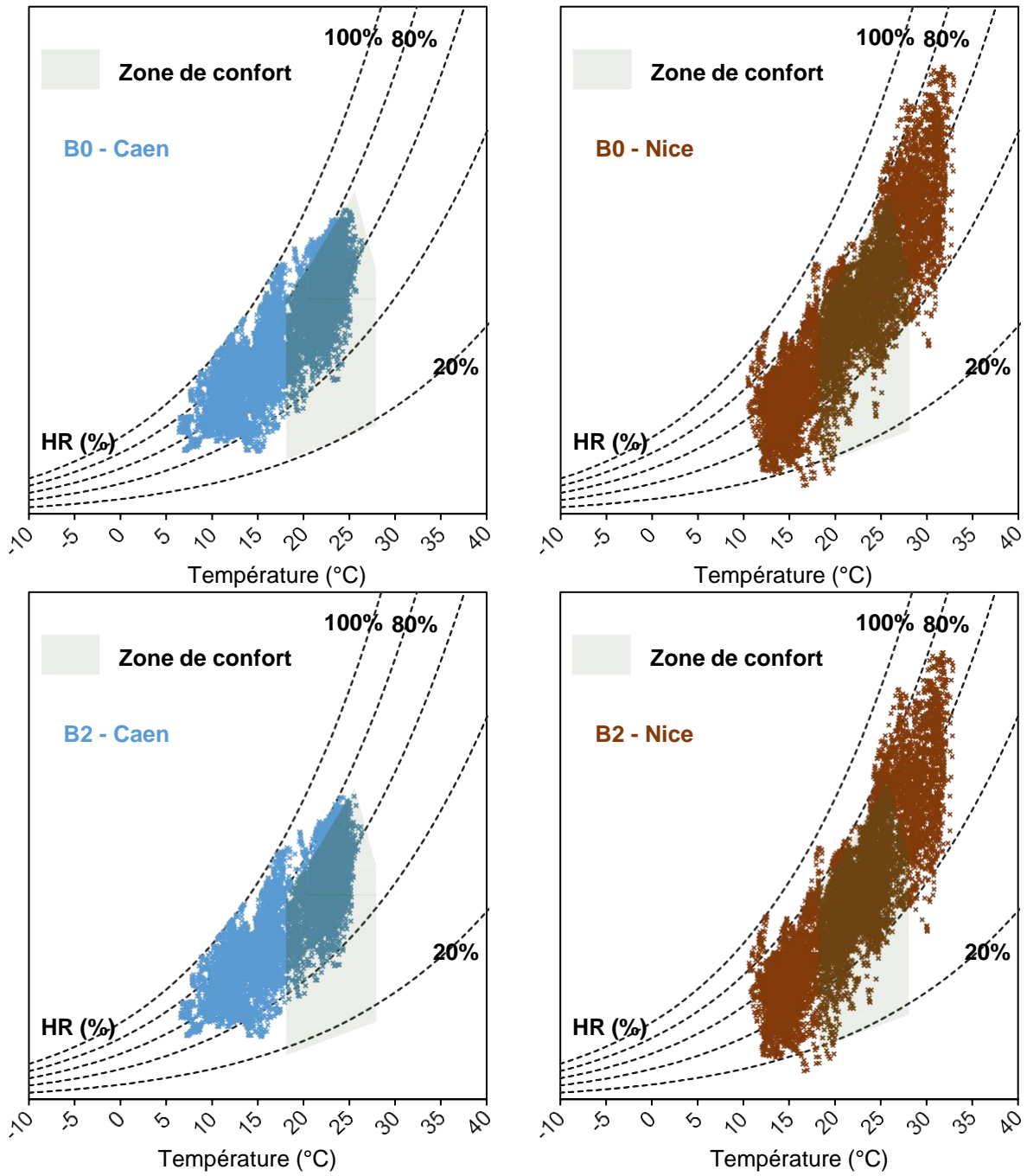


Figure 72: Évolution du confort hygrothermique dans une maison individuelle en bauge incorporant des PCM à Caen et à Nice, (suite de la figure, page suivante).

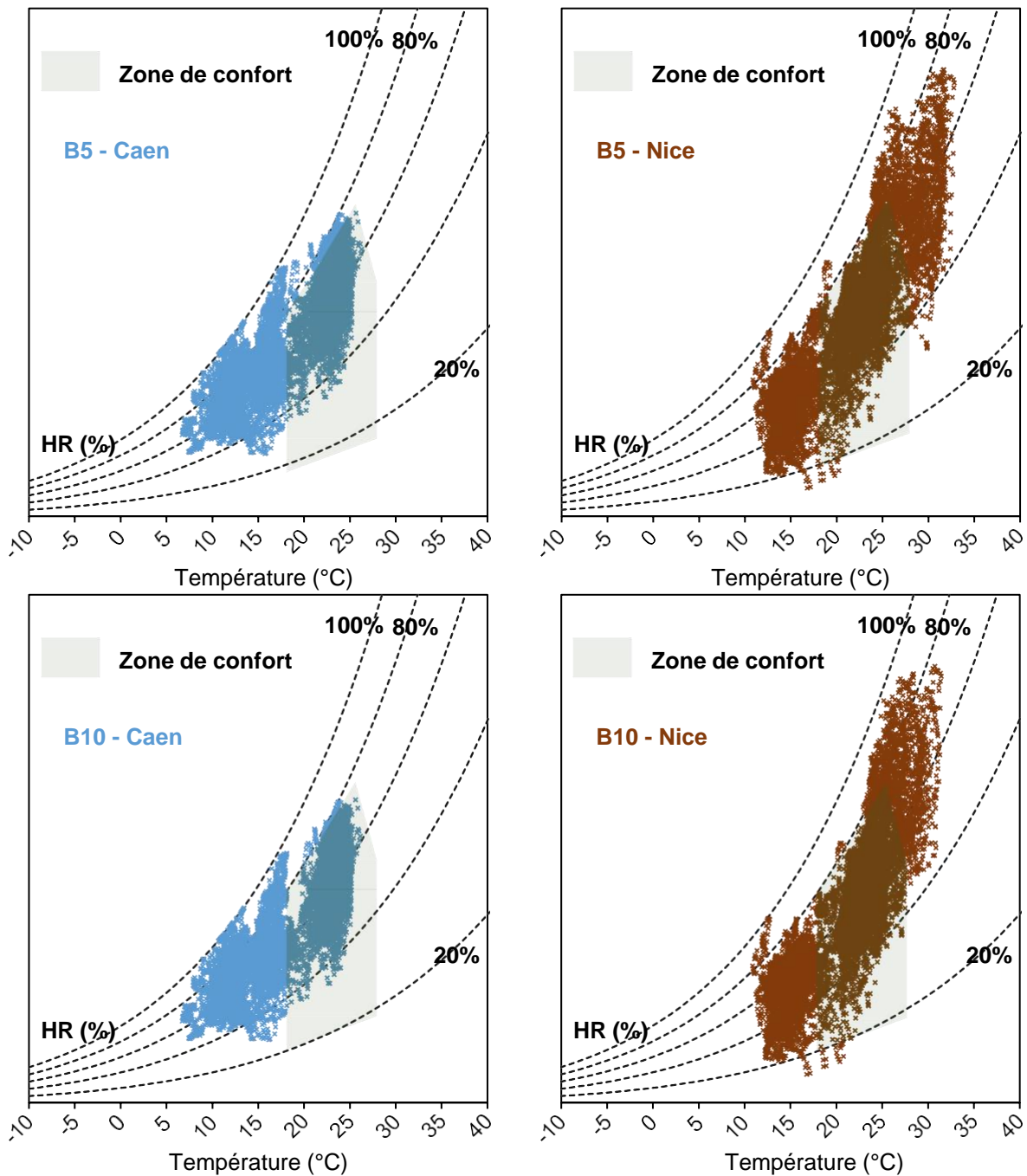


Figure 72 : Suite et fin.

Les valeurs de confort hygrothermique basées sur le diagramme de Givoni sont nettement inférieures au confort adaptatif de Brager. Comme mentionné précédemment, cette différence résulte de la prise en compte par Givoni de l'humidité, un critère supplémentaire dans son calcul.

Comparées à la terre allégée, les valeurs de confort de Givoni sont plus faibles dans les maisons construites en bauge. La raison réside dans la nature moins hygroscopique de la bauge quand comparée à celle de la terre allégée.

Tableau 25: Valeur de confort hygrothermique permises par les différentes formulations de bauge-PCM à Caen et Nice.

Ville	Givoni confort [%]			
	B0	B2	B5	B10
Caen	11	12	13	14,5
Nice	31	32,5	34	38

Enfin, avec ces faibles valeurs de confort, un conditionnement de la température est nécessaire pour obtenir un confort permanent. La consommation d'énergie des différentes formulations de bauge est décrite dans la section suivante.

5.6.3. Consommation d'énergie d'une maison individuelle en bauge

La Figure 73 détaille la consommation d'énergie, *i.e.* les besoins en chauffage et en climatisation, mais également le gain énergétique généré par les différentes formulations de bauge étudiées sous des climats océaniques et méditerranéens.

À Caen, où le climat est plus froid, la demande de chauffage est importante, tandis que celle de refroidissement est quasiment absente. À Nice, les demandes de chauffage et de refroidissement sont pratiquement comparables. En ajoutant du PCM dans les parois, la consommation d'énergie diminue. Cette baisse atteint environ 6, 10 et 11 % à Caen et 11, 23 et 44 % à Nice pour B2, B5 et B10, respectivement. Toujours selon le même principe d'analyse, le processus de changement de phase fréquemment déclenché à Nice conduit à cette différence d'économie d'énergie.

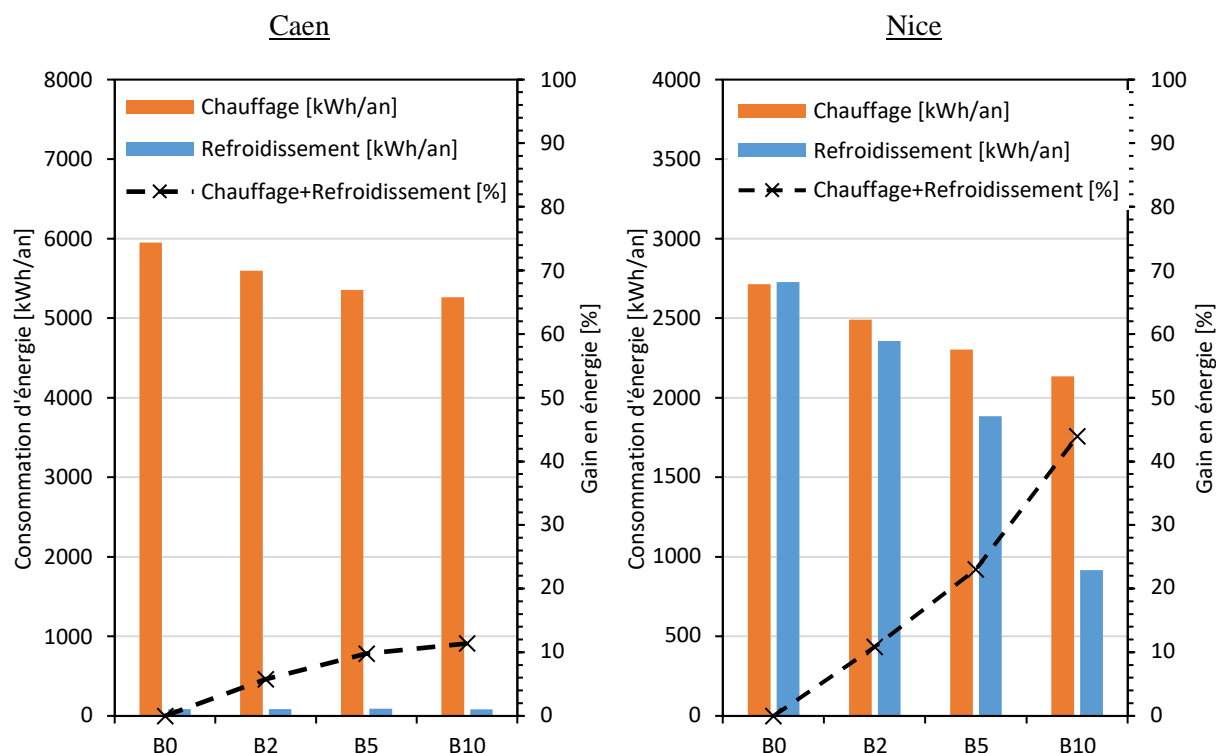
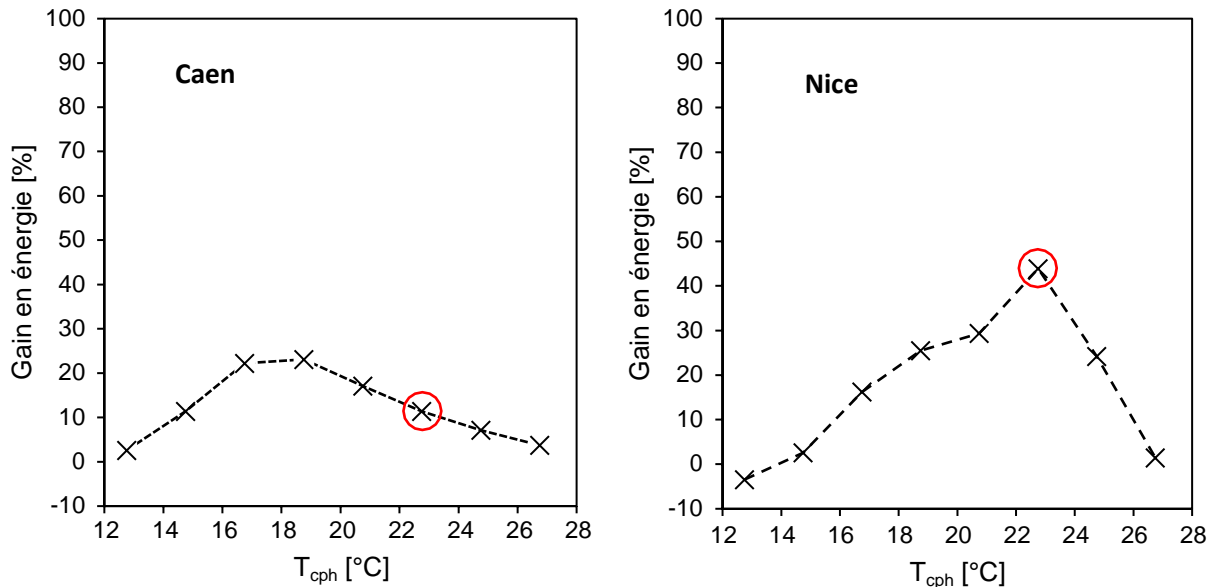


Figure 73: Consommation et gains annuels d'énergie (refroidissement/chauffage) quand les murs extérieurs sont en bauge incorporant du Micronal 5038 X à Caen et à Nice.

5.6.4. Température optimale de changement de phase

Pour la température optimale de fusion/solidification du PCM, et conformément aux résultats de la Figure 74, une gamme de température comprise entre 16,75 et 18,75 °C convient parfaitement au climat de Caen. Tandis qu'une gamme comprise entre 18,75 et 24,75 °C est plus appropriée au climat de Nice. Ces résultats sont valables en considérant la formulation B10, la bauge incorporant 10 % en masse de PCM. Dans chaque région, que ce soit à Caen ou à Nice, ces températures sont susceptibles d'être fréquemment enregistrées.



Note : T_{cph} = Moyenne de température pic de changement de phase voir Tableau 12. (Le rond correspond au cas étudié).

Figure 74: Gain d'énergie en fonction de la température maximale de fusion/solidification des PCM à Caen et Nice dans le cas du B10.

5.7. Effet des données d'entrée sur les résultats de simulation

Les données d'entrée de tout logiciel sont basées sur des valeurs expérimentales représentatives de phénomènes ou événements réels. Par rapport à Design Builder et à l'utilisation de PCM, les valeurs d'entrée sont les suivantes [165,167]:

- Chaleur latente
- Largeur de la zone de changement de phase
- Température pic de changement de phase
- Hystérésis entre le processus de fusion et celui de solidification.

Ainsi, les 3 dernières valeurs dépendent du conditionnement de l'essai, en particulier la vitesse de balayage. La caractérisation du PCM est réalisée par la méthode de calorimétrie différentielle à balayage. Elle consiste à balayer la température à une vitesse constante. Cette vitesse a une incidence sur la détection du pic de changement de phase et par la suite sur les données d'entrée dans Design Builder. Avec une vitesse élevée, le pic de changement de phase s'élargit et se déplace et l'hystérésis augmente. Comme le montre la Figure 75, plus la vitesse est élevée, plus les mesures semblent changer et s'éloigner de la réalité.

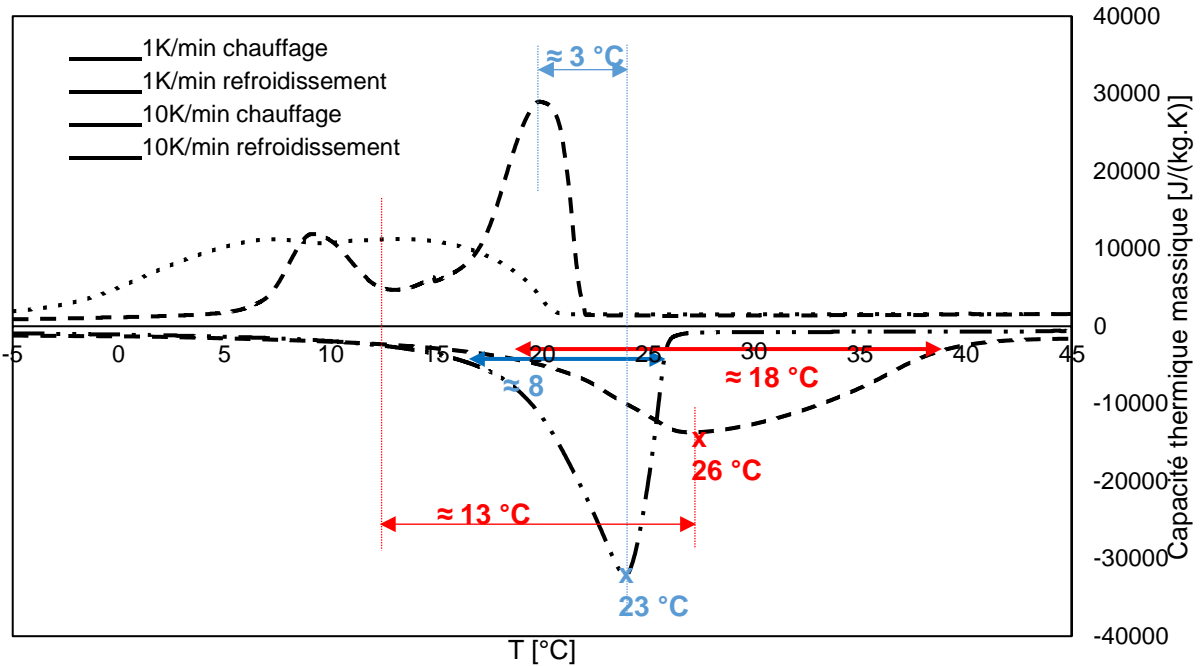


Figure 75: Effet de la vitesse de chauffage/refroidissement sur les pics de changement de phase étudiés par DSC.

Dans notre cas, la caractérisation a été faite à une vitesse de chauffage/refroidissement de 1K/min. Cette vitesse de changement de température est supérieure à celle des fluctuations quotidiennes de la température réelle.

Afin d'évaluer l'effet de la prise en compte de l'hystérésis sur les résultats des simulations numériques, une étude est menée.

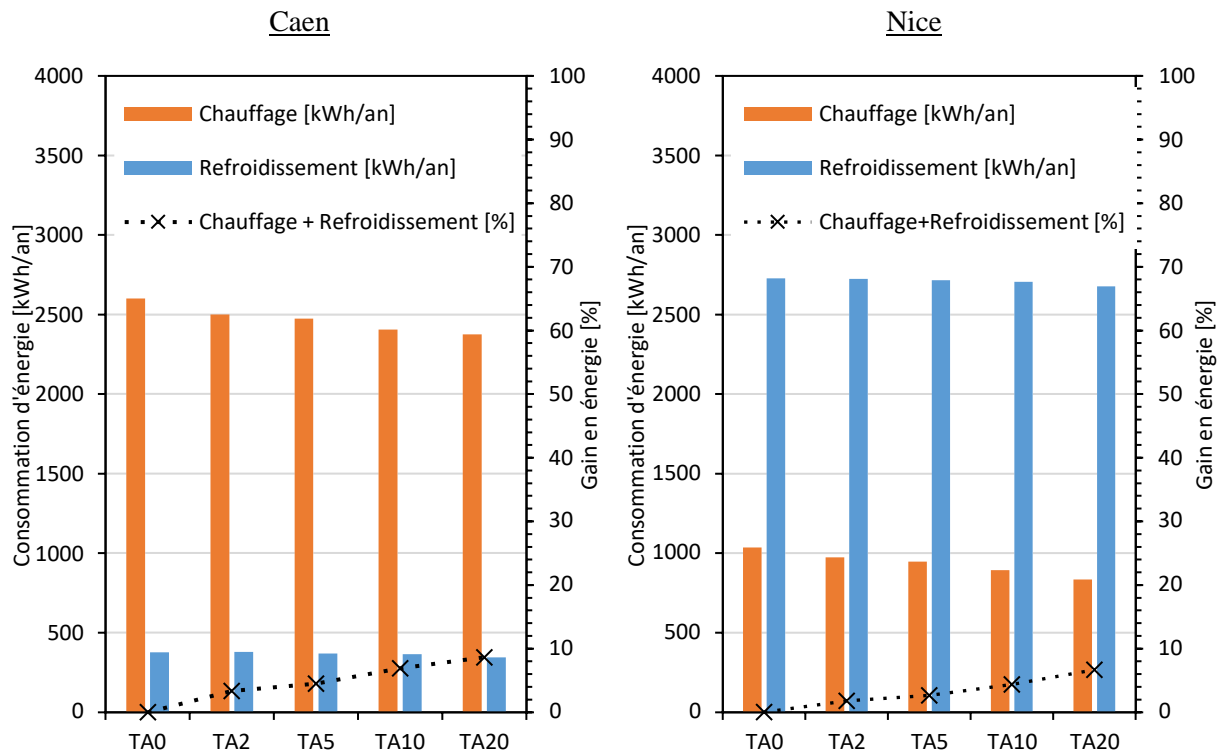


Figure 76: Consommation et gains annuels d'énergie quand les murs extérieurs sont en terre allégée incorporant du Nextek 24D sans considération de l'hystérésis à Caen et à Nice.

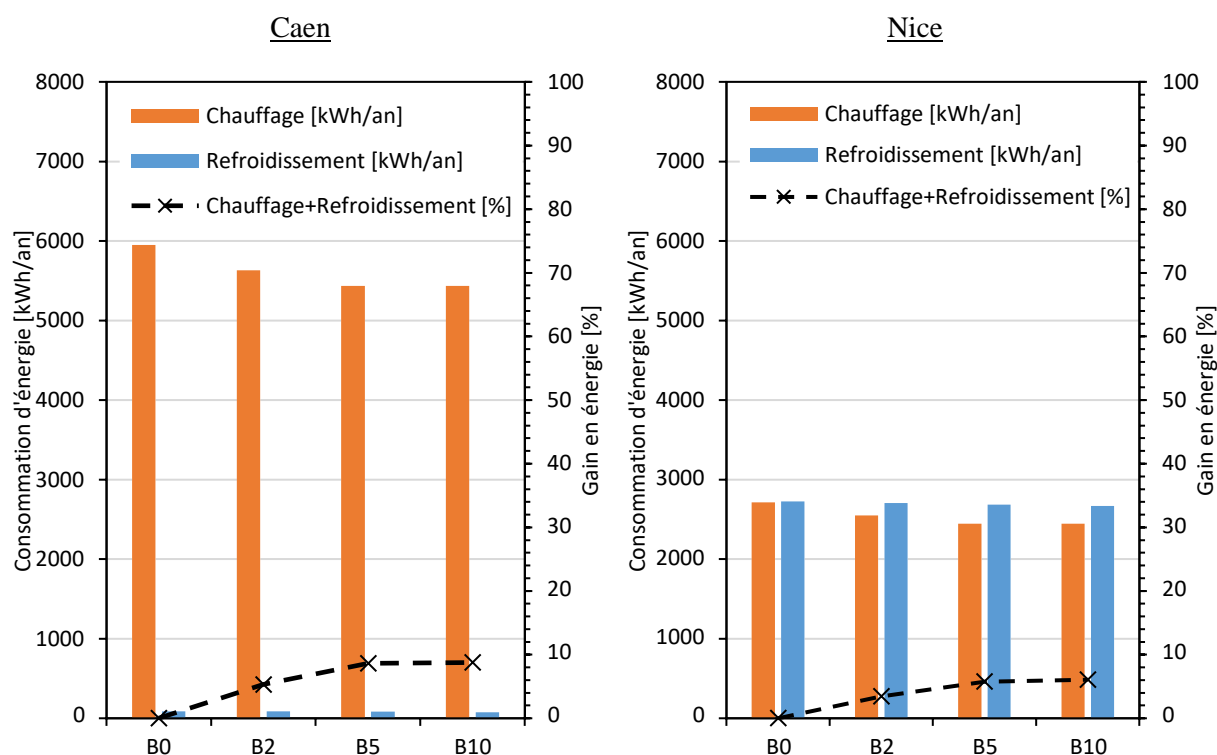


Figure 77: Consommation et gains annuels d'énergie quand les murs extérieurs sont en bauge incorporant du Micronal 5038 X sans considération de l'hystérésis à Caen et à Nice.

Dans les sections précédentes où l'effet d'hystérésis des PCM est considéré, les gains énergétiques ont atteint parfois les 50%. Lorsque l'hystérésis n'est pas prise en compte, ces valeurs diminuent significativement et atteignent environ 10% dans le cas de la terre allégée et de la bauge. Ceci montre que la prise en compte de l'hystérésis affecte significativement les résultats des simulations numériques. Par conséquent, dans le cadre d'une pareille étude, il est nécessaire de caractériser les matériaux dans des conditions aussi proches que possible de la réalité de leur usage final. Cette démarche permettra aux simulations de se rapprocher des valeurs réelles de gain énergétique.

5.8. Conclusion

Ce chapitre vise à évaluer numériquement l'effet de l'utilisation du PCM dans les constructions en terre. Les résultats expérimentaux présentés dans les chapitres précédents sont utilisés comme des entrées pour la simulation numérique de la consommation d'énergie dans une maison individuelle et du confort thermique de ses occupants. Ensuite, la température de changement de phase optimale en fonction du climat dans lequel évolue le bâtiment a été étudiée.

Les simulations numériques ont été réalisées pour estimer comment l'ajout de PCM affecte le confort thermique des occupants et, par conséquent, les économies d'énergie dans une maison individuelle typique avec des mélanges terre allégée-PCM et bauge-PCM dans ses murs verticaux extérieurs.

En conséquence, lorsqu'aucun système mécanique de chauffage/refroidissement n'est installé, le confort adaptatif et celui de Givoni augmentent avec l'ajout de PCM. Par conséquent, les économies d'énergie ont atteint environ 42 % en besoins de chauffage/refroidissement à Caen et environ 50 % à Nice, lorsque la terre allégée contient 20 % du PCM Nextek 24D. Dans le cas de la bauge incorporant 10 % en masse du PCM Micronal 5038 X, le gain énergétique atteint environ 11 % et 44 % à Caen et Nice, respectivement.

Parallèlement, il a été constaté que des températures de fusion/solidification du Nextek 24D incorporé dans la terre allégée comprises entre 18,75 °C et 20,75 °C serait plus adaptées à Caen (climat océanique), tandis que des températures comprises entre 20,75-22,75 °C conviendraient plus à Nice (climat méditerranéen). Dans le cas de la bauge incorporant du Micronal 5038X, ces températures optimales seraient comprises entre 16,75 et 18,75 °C pour le climat de Caen. Tandis qu'une gamme comprise entre 18,75 et 24,75 °C conviendrait parfaitement au climat de Nice.

Conclusion générale et perspectives

Le but des travaux présentés dans ce manuscrit consistait à étudier l'impact de l'amélioration de la masse thermique sur la consommation d'énergie et le confort hygrothermique dans des bâtiments qui seraient construits avec des mélanges terre-paille. Ainsi, des composites en terre-paille végétale incorporant des matériaux à changement de phase (PCM) ont été formulés puis étudiés expérimentalement. Les résultats issus des études expérimentales sont ensuite exploités pour étudier numériquement l'impact des PCM sur la consommation d'énergie et le confort thermique dans une maison individuelle qui serait construite avec les mélanges terre-paille-PCM.

Dans la première partie de ce manuscrit, nous avons rappelé les différentes techniques de construction en terre. Parmi ces dernières, un accent est particulièrement mis sur la terre allégée et la bauge. La terre allégée est considérée comme un matériau isolant non structural. Tandis que la bauge est considérée comme un matériau porteur offrant la possibilité de construire des maisons avec quelques étages. Au-delà de leur caractère géosourcé/biosourcé, les matériaux à base de terre présentent un bon comportement hygrothermique. Ainsi, ces matériaux sont retenus comme support pour les PCM microencapsulés. L'étude bibliographique a repris aussi les utilisations et moyens d'incorporation des PCM dans les constructions. La plupart de ces études ont porté sur l'incorporation des PCM dans les matrices cimentaires. Il a été constaté que les PCM modifient les différentes propriétés de ces matrices : ils dégradent notamment leurs propriétés mécaniques mais améliorent leurs performances thermiques. Ces effets ont été constatés également lorsque le PCM est incorporé dans des matrices à base de terre. Cependant, l'effet des PCM sur le comportement hygroscopique des matériaux est rarement étudié.

Dans ce contexte, l'effet de l'incorporation de PCM sur les propriétés thermiques, hygroscopiques et mécaniques de la terre allégée a été étudié. De nombreux échantillons contenant différentes teneurs en PCM ont été conçus. Des études ont été menées sur le comportement de sorption/désorption, la perméabilité à la vapeur d'eau et la résistance à la compression, la conductivité thermique, la capacité thermique massique ainsi que la réponse thermique aux changements des conditions aux limites.

En effet, le premier constat est que la terre allégée a une faible résistance à la compression. La présence de PCM n'a quasiment aucun effet sur la résistance mécanique des mélanges terre-paille. Au niveau des propriétés thermiques, la conductivité thermique des mélanges diminue avec l'augmentation de la teneur en PCM. En plus, le PCM impacte significativement la capacité thermique massique de la terre allégée. Cela est visible même en dehors de la zone de changement de phase. Parallèlement, l'impact du PCM est significatif sur la réponse thermique des mélanges aux changements des conditions aux limites. En effet, une baisse des oscillations de la température, un déphasage des pics de température et une durée plus longue dans la zone de confort thermique ont été relevés. A propos des propriétés hygroscopiques, et conformément aux résultats obtenus, l'incorporation de PCM entraîne une dégradation des propriétés hygroscopiques de la terre allégée. La nature hydrophobe du PCM et la diminution de la porosité contenue dans la terre allégée sont supposés être à l'origine de ce phénomène. Pour conclure, on peut affirmer que l'incorporation de matériaux à changement de phase microencapsulés dans la terre allégée améliore le niveau d'isolation, la capacité de stockage de la chaleur et maintient la résistance à la compression presque inchangée. Par ailleurs, l'incorporation de PCM dégrade les propriétés hygroscopiques de ce matériau. Cependant, qu'il s'agisse du comportement de sorption/désorption ou de la perméabilité à la vapeur d'eau, la terre allégée incorporant des PCM reste comparable aux autres matériaux à base de terre et avec un meilleur comportement hygroscopique que les matériaux de construction conventionnels.

L'étude a continué avec un deuxième matériau à base de terre, la bauge. L'effet de l'ajout du PCM sur les propriétés thermiques, hygroscopiques et mécaniques de la bauge est donc étudié

expérimentalement. De même, des échantillons de bauge incorporant différents teneurs en PCM ont été formulés. Cette étude a révélé que l'incorporation du PCM dans la bauge améliore son pouvoir isolant et sa capacité de stockage de la chaleur mais provoque une dégradation de ses propriétés mécaniques et hygroscopiques. Néanmoins, la bauge incorporant du PCM reste suffisamment solide pour soutenir des bâtiments de deux étages et garde des propriétés hygroscopiques intéressantes quand elle est comparée à d'autres matériaux de construction conventionnels ou à base de terre. La bauge est en outre considérée comme un matériau hygroscopique (perméable à la vapeur d'eau et capable d'absorber et de libérer l'humidité ambiante). Le comportement hygroscopique de la bauge est légèrement dégradé par l'ajout de PCM. En effet, la capacité de sorption/désorption de la bauge et sa perméabilité à la vapeur d'eau sont inversement proportionnelles à la teneur en PCM. Par ailleurs, les travaux expérimentaux ont mis en évidence que l'ajout de PCM à la bauge entraîne une diminution de sa conductivité thermique. Le pouvoir isolant du mélange se trouve donc amélioré en conséquence. Cette diminution est supposée être due à la conductivité thermique du PCM nettement inférieure à celle de la bauge. Concernant l'effet de la température, à 14 °C, 24 °C et 34 °C, la conductivité thermique n'a pas montré de changement significatif. En revanche, l'incorporation de PCM a eu un impact sur la capacité thermique massique de la bauge. En effet, on observe que cette dernière augmente avec la teneur en PCM à l'extérieur et à l'intérieur de la zone de changement de phase. Toutes ces évolutions dans les propriétés thermiques ont pour conséquence une augmentation du temps pendant lequel la température de la face interne d'une paroi de bauge se trouve entre 21 et 25°C (supposé comme zone de confort) quand cette paroi est soumise à un cyclage thermique sur sa paroi extérieure.

Le travail expérimental est suivi par des simulations numériques. Le but de ces simulations est de quantifier l'effet des changements des propriétés hygrothermiques sur la consommation d'énergie et le confort des occupants dans une maison individuelle construite en terre (bauge ou terre allégée). Les calculs ont reposé sur les données expérimentales relatives aux matériaux. Les mélanges terre allégée-PCM et bauge-PCM sont considérés dans les murs verticaux extérieurs d'une maison individuelle. Deux climats différents sont envisagés, respectivement un climat plutôt océanique dans le nord-ouest de la France et un climat méditerranéen.

Ainsi, il a été constaté que lorsqu'aucun système mécanique de chauffage/refroidissement n'est installé, le confort adaptatif et de Givoni augmente avec l'ajout de PCM. Par conséquent, la consommation d'énergie liée au chauffage/refroidissement diminue. Le taux de cette diminution varie entre les deux climats considérés. Les simulations ont montré également que certaines températures de fusion/solidification des PCM sont plus adaptées à un climat qu'à un autre. En fait, cela dépend du rythme auquel le processus de changement de phase est sollicité.

Une série de propositions qui permettrait de compléter, voire améliorer les contributions apportées dans ce travail est donnée pour d'éventuelles recherches à mener dans le futur. Ainsi, les travaux pourraient porter sur :

- Etant donné que la plupart des PCM commercialisés aujourd'hui sont d'origine pétrolière, il est fort probable que leur incorporation dans les mélanges terre-paille augmentera l'impact environnemental des mélanges et éléments qui en résultent. Ainsi, l'étude de l'impact environnemental des matériaux incorporant des PCM seraient d'une utilité certaine. Il serait aussi très intéressant de considérer PCM biosourcés et de préférence non encapsulés pour réduire l'impact environnemental des mélanges terre-paille-PCM.
- Les mélanges étudiés étant hygroscopiques, leur interaction avec l'humidité ambiante est importante et porte atteinte à la qualité de l'air. Ainsi, l'inclusion de matériaux hydrophobes tels que le PCM nécessite une réflexion.
- Etant donné que les simulations numériques dépendent de plusieurs paramètres et postulats, il serait très intéressant de faire une étude des gains énergétiques à l'échelle réelle dans des conditions climatiques réelles.

- L'évaluation de la durabilité des matériaux dans le temps et l'étude du recyclage des matériaux en fin de vie.
- La réalisation d'une étude de prix et l'établissement d'un bilan entre le gain économique de la consommation d'énergie par rapport au prix de l'installation.

Références

- [1] X. Cao, X. Dai, J. Liu, Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade, *Energy Build.* 128 (2016) 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>.
- [2] E. Hache, D. Leboulenger, V. Mignon, Beyond average energy consumption in the French residential housing market: A household classification approach, *Energy Policy.* 107 (2017) 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.038>.
- [3] ADEME, feuille de route stratégique sur les systèmes de stockage d'énergie, (2011). http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/6919_stockageenergie.pdf.
- [4] L. Wells, B. Rismanchi, L. Aye, A review of Net Zero Energy Buildings with reflections on the Australian context, *Energy Build.* 158 (2018) 616–628. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.055>.
- [5] G. Semprini, R. Gulli, A. Ferrante, Deep regeneration vs shallow renovation to achieve nearly Zero Energy in existing buildings: Energy saving and economic impact of design solutions in the housing stock of Bologna, *Energy Build.* 156 (2017) 327–342. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.044>.
- [6] A. Brambilla, G. Salvalai, M. Imperadori, M.M. Sesana, Nearly zero energy building renovation: From energy efficiency to environmental efficiency, a pilot case study, *Energy Build.* 166 (2018) 271–283. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.002>.
- [7] D. D'Agostino, D. Parker, A framework for the cost-optimal design of nearly zero energy buildings (NZEBS) in representative climates across Europe, *Energy.* 149 (2018) 814–829. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.020>.
- [8] A. Toleikyte, L. Kranzl, A. Müller, Cost curves of energy efficiency investments in buildings – Methodologies and a case study of Lithuania, *Energy Policy.* 115 (2018) 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.043>.
- [9] L.F. Cabeza, C. Barreneche, L. Miró, M. Martínez, A.I. Fernández, D. Urge-Vorsatz, Affordable construction towards sustainable buildings: review on embodied energy in building materials, *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 5 (2013) 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.05.005>.
- [10] T.H. Oliver, M.D. Morecroft, Interactions between climate change and land use change on biodiversity: attribution problems, risks, and opportunities, *WIREs Clim. Change.* 5 (2014) 317–335. <https://doi.org/10.1002/wcc.271>.
- [11] A. Koezjakov, D. Urge-Vorsatz, W. Crijns-Graus, M. van den Broek, The relationship between operational energy demand and embodied energy in Dutch residential buildings, *Energy Build.* 165 (2018) 233–245. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.036>.
- [12] A. Lupišek, M. Vaculíková, Š. Mančík, J. Hodková, J. Růžička, Design Strategies for Low Embodied Carbon and Low Embodied Energy Buildings: Principles and Examples, *Energy Procedia.* 83 (2015) 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.205>.
- [13] NRG-STORAGE, (2020). <https://nrg-storage.eu/> (accessed August 18, 2021).
- [14] Powerskin+, (2019). <https://www.powerskinplus.eu/> (accessed August 18, 2021).
- [15] PoroPCM Project, (2019). <https://starfos.tacr.cz/en/project/8I19001> (accessed August 18, 2021).
- [16] Ministère de la Transition écologique, Réglementation thermique RT2012, Ministère Transit. Écologique. (2020). <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-thermique-rt2012> (accessed November 15, 2021).
- [17] Ministère de la Transition écologique, Réglementation environnementale RE2020, (2020). <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-environnementale-re2020> (accessed November 15, 2021).
- [18] H. Houben, H. Guillaud, *Traité de construction en terre*, CRATerre, Parenthèses, Marseille, 2006. <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/traite-de-construction-en-terre-9782863641613/> (accessed January 7, 2021).
- [19] CRATerre:: Construire en terre, une autre voie pour loger la planète - Secteur Privé & Développement, la revue de PROPARCO n°10, (2011). <http://craterre.org/diffusion:articles/view/id/437b24a482d7126df422d40d1777127e> (accessed January 7, 2021).

- [20] R. Proterra, *Técnicas Mixtas de Construcción con Tierra*, (2003). https://www.academia.edu/35702016/Técnicas_Mixtas_de_Construcción_con_Tierra (accessed October 7, 2021).
- [21] R. Busbridge, R. Rhydwen, An investigation of the thermal properties of hemp and clay monolithic walls, (2010) 10.
- [22] S. Goodhew, J. Carfrae, K. Hood-Cree, M. Fox, M. Boutouil, F. Streiff, Building with earth: How we are working to revive an ancient, sustainable building technique, *Constr. Res. Innov.* 10 (2019) 105–108. <https://doi.org/10.1080/20450249.2019.1700077>.
- [23] T. Vineslas, *Caractérisation d'éco-matériaux terre-chanvre en prenant en compte la variabilité des ressources disponibles localement*, 2019.
- [24] B. Mazhoud, F. Collet, S. Pretot, C. Lanos, Development and hygric and thermal characterization of hemp-clay composite, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 22 (2018) 1511–1521. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1327894>.
- [25] A. Simons, A. Laborel-Préneron, A. Bertron, J.E. Aubert, C. Magniont, C. Roux, C. Roques, Development of bio-based earth products for healthy and sustainable buildings: characterization of microbiological, mechanical and hygrothermal properties, *Matér. Tech.* 103 (2015) 206. <https://doi.org/10.1051/mattech/2015011>.
- [26] Documentation technique, CobBauge. (2018). <http://www.cobbauge.eu/documentation-technique/> (accessed February 13, 2020).
- [27] H. Morris, M. Allen, T. Drupsteen, B. Gilkison, G. North, R. Walker, M. Hall, J. Christie, *Earth building materials and workmanship*, NZS 4298:1998, 1998.
- [28] L. Zhang, G. Sang, W. Han, Effect of hygrothermal behaviour of earth brick on indoor environment in a desert climate, *Sustain. Cities Soc.* 55 (2020) 102070. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102070>.
- [29] T.A. Phung, *Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales: la bauge*, PhD Thesis, Normandie Université, 2018. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01938827> (accessed January 5, 2021).
- [30] M. Labat, C. Magniont, N. Oudhof, J.-E. Aubert, From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential, *Build. Environ.* 97 (2016) 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.004>.
- [31] I. Niang, C. Maalouf, T. Moussa, C. Bliard, E. Samin, C. Thomachot-Schneider, M. Lachi, H. Pron, T.H. Mai, S. Gaye, Hygrothermal performance of various Typha–clay composite, *J. Build. Phys.* 42 (2018) 316–335. <https://doi.org/10.1177/1744259118759677>.
- [32] H. Cagnon, J.E. Aubert, M. Coutand, C. Magniont, Hygrothermal properties of earth bricks, *Energy Build.* 80 (2014) 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.024>.
- [33] T. Colinart, T. Vineslas, H. Lenormand, A.H.D. Menibus, E. Hamard, T. Lecompte, Hygrothermal properties of light-earth building materials, *J. Build. Eng.* 29 (2020) 101134. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101134>.
- [34] G. Giuffrida, R. Caponetto, F. Nocera, Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials: A Literature Review, *Sustainability*. (2019). <https://doi.org/10.3390/su11195342>.
- [35] A. Laborel-Préneron, J.E. Aubert, C. Magniont, C. Tribout, A. Bertron, Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review, *Constr. Build. Mater.* 111 (2016) 719–734. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119>.
- [36] V. Cérézo, *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*, Thèse de doctorat, Lyon, INSA, 2005. <http://www.theses.fr/2005ISAL0037>.
- [37] E. Hamard, *Rediscovering of vernacular adaptative construction strategies for sustainable modern building : application to cob and rammed earth*, Université de Lyon, 2017. https://www.researchgate.net/publication/323387530_Rediscovering_of_vernacular_adaptative_construction_strategies_for_sustainable_modern_building_application_to_cob_and_rammed_earth.
- [38] S. Serrano, C. Barreneche, L. Rincón, D. Boer, L.F. Cabeza, Stabilized rammed earth incorporating PCM: Optimization and improvement of thermal properties and Life Cycle Assessment, *Energy Procedia.* 30 (2012) 461–470. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.055>.

- [39] K. Holzhueter, K. Itonaga, The Potential for Light Straw Clay Construction in Japan: An Examination of the Building Method and Thermal Performance, *J. Asian Archit. Build. Eng.* 16 (2017) 209–213. <https://doi.org/10.3130/jaabe.16.209>.
- [40] C. Flament, Valorisation des fines de lavage de granulats : application à la construction en terre crue, Thèse de doctorat, Artois, 2013. <http://www.theses.fr/2013ARTO0202>.
- [41] A.V. Arundel, E.M. Sterling, J.H. Biggin, Indirect health effects of relative humidity in indoor environments., *Environmental Health Perspectives*. Vol.65 (1986) pp.351-361.
- [42] L. Fang, G. Clausen, P.O. Fanger, Impact of temperature and humidity on chemical and sensory emissions from building materials, *Indoor Air*. 9 (1999) 193–201. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1999.t01-1-00006.x>.
- [43] J. Beckert, Wirkung von Verunreinigungen der Raumluft auf den Menschen, beckert&edition, Düsseldorf, Germany, 1986.
- [44] CRAterre – Ressources en libre accès, ouvrages en vente, (2020). <https://craterre.hypotheses.org/> (accessed February 21, 2022).
- [45] Hubert Guillaud, Compressed earth blocks. Volume II: Manual of design and construction, 1995. http://archive.org/details/CEB_manual_design_construction (accessed October 6, 2021).
- [46] M. Serlet, Architecture en terre d'aujourd'hui: les techniques de la terre crue, CRAterre. (2020). <https://craterre.hypotheses.org/1043> (accessed February 21, 2022).
- [47] Confédération de la construction en terre crue, Guides de bonnes pratiques de la construction en terre crue, (2020).
- [48] Nicolas, Les cloisons en terre paille, Autoconstruction Notre Maison Bois Paille Terre. (2020). <http://autoconstruction-bois-paille-terre.fr/2020/08/les-cloisons-en-terre-paille.html> (accessed November 8, 2021).
- [49] A. Azil, M. Le Guern, K. Touati, N. Sebaibi, M. Boutouil, F. Streiff, S. Goodhew, M. Gomina, Earth construction: Field variabilities and laboratory reproducibility, *Constr. Build. Mater.* 314 (2022) 125591. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125591>.
- [50] M. Bouasria, Y. El Mendili, M.-H. Benzaama, V. Pralong, J.-F. Bardeau, F. Hennequart, Valorisation of stranded *Laminaria digitata* seaweed as an insulating earth material, *Constr. Build. Mater.* 308 (2021) 125068. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125068>.
- [51] U. Müller, L. Miccoli, C. Perrone, C. Ziegert, Vergleich und Modellierung der mechanischen Eigenschaften von Bauteilen aus Lehmsteinmauerwerk, Wellerlehm und Stampflehm, in: *Lehm 2012-6 Int. Fachtag. Für Lehmabau, 2012*: pp. 320–331.
- [52] A. Azil, M. Le Guern, K. Touati, M. Gomina, N. Sebaibi, F. Streiff, S. Goodhew, H. Louahlia, Construction field monitoring of a cob prototype building, in: *Barcelona, 2021*.
- [53] D. Medjeleh, L. Ulmet, F. Dubois, Characterization of hygrothermal transfers in the unfired earth, *Energy Procedia*. 139 (2017) 487–492. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.242>.
- [54] M. Martinelli, Stockage d'énergie thermique par changement de phase – Application aux réseaux de chaleur, PhD Thesis, Université Grenoble Alpes, 2018.
- [55] Commission Européenne, Communication de la commission au parlement européen, au conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions énergie 2020, Stratégie pour une énergie compétitive, durable et sûre, (2010). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX:52010DC0639> (accessed March 1, 2020).
- [56] Commission Innovation 2030 - sous la présidence d'Anne Lauvergeon, (2013). <https://www.economie.gouv.fr/anne-lauvergeon-presidera-commission-innovation-2030> (accessed March 1, 2020).
- [57] R. Jeremy, La troisième révolution industrielle. Comment le pouvoir latéral va transformer l'énergie, l'économie et le monde, Paris, Les Liens qui Libèrent, 2012, 414p., *Dév. Durable Territ. Économie Géographie Polit. Droit Sociol.* (2013). <http://journals.openedition.org/developpementdurable/9646> (accessed March 1, 2021).
- [58] S. Hongois, Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle, Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2011.
- [59] T. Schmidt, D. Mangold, H. Müller-Steinhagen, Central solar heating plants with seasonal storage in Germany, *Sol. Energy*. 76 (2004) 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.025>.

- [60] A. Laghzaoui, D. Peerhossaini, Stockage de chaleur: Energie solaire et autres applications., Etude bibliographique, Ecole des mines de Douai, 2010.
- [61] P. Odru, Le stockage de l'énergie, 2013. <https://www.dunod.com/sciences-techniques/stockage-energie> (accessed March 1, 2021).
- [62] P. Odru, Stockage de chaleur sensible, Tech. Ing. (2017). <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/stockage-de-l-energie-42638210/stockage-de-la-chaleur-be8597/stockage-de-chaleur-sensible-be8597niv10002.html> (accessed February 17, 2020).
- [63] B. Zalba, J.M. Marín, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Appl. Therm. Eng. 23 (2003) 251–283. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8).
- [64] Froid_Clim: Les changements d'état:Un corps physique peut prendre 3 états, Froid_Clim. (2011). <http://climatisationetchauffage.blogspot.com/2011/03/les-changements-detat-un-corps-physique.html> (accessed March 1, 2021).
- [65] L. Farcot, Etude d'un système de stockage de chaleur thermochimique avec réacteur séparé, thesis, Grenoble Alpes, 2018. <http://www.theses.fr/2018GREAA001> (accessed February 17, 2020).
- [66] P. Pardo, Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique, phd, 2013. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00002539/> (accessed February 17, 2020).
- [67] M. Casini, Phase-change materials, in: Smart Build., Elsevier, 2016: p. 40. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00182-4>.
- [68] L.F. Cabeza, L. Navarro, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández, 14 - Phase-change materials for reducing building cooling needs, in: F. Pacheco-Torgal, J.A. Labrincha, L.F. Cabeza, C.-G. Granqvist (Eds.), Eco-Effic. Mater. Mitigating Build. Cool. Needs, Woodhead Publishing, Oxford, 2015: pp. 381–399. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-380-5.00014-5>.
- [69] V.V. Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art, Renew. Sustain. Energy Rev. 11 (2007) 1146–1166. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.002>.
- [70] T.-C. Ling, C.-S. Poon, Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview, Constr. Build. Mater. 46 (2013) 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.031>.
- [71] C. Group, Microtek Laboratories, (2020). <https://www.microteklabs.com> (accessed October 22, 2020).
- [72] Va-Q-Tec. (2020). <https://va-q-tec.com/en/> (accessed December 10, 2020).
- [73] S. Park, Y. Lee, Y.S. Kim, H.M. Lee, J.H. Kim, I.W. Cheong, W.-G. Koh, Magnetic nanoparticle-embedded PCM nanocapsules based on paraffin core and polyurea shell, Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp. 450 (2014) 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.03.005>.
- [74] S.S. Magendran, F.S.A. Khan, N.M. Mubarak, M. Vaka, R. Walvekar, M. Khalid, E.C. Abdullah, S. Nizamuddin, R.R. Karri, Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review, Nano-Struct. Nano-Objects. 20 (2019) 100399. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100399>.
- [75] V.V. Rao, R. Parameshwaran, V.V. Ram, PCM-mortar based construction materials for energy efficient buildings: A review on research trends, Energy Build. 158 (2018) 95–122. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.098>.
- [76] P.K.S. Rathore, S.K. Shukla, Potential of macroencapsulated PCM for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review, Constr. Build. Mater. 225 (2019) 723–744. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.221>.
- [77] P.K. Singh Rathore, S.K. Shukla, N.K. Gupta, Potential of microencapsulated PCM for energy savings in buildings: A critical review, Sustain. Cities Soc. 53 (2020) 101884. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101884>.
- [78] P. Shafiqh, I. Asadi, N.B. Mahyuddin, Concrete as a thermal mass material for building applications - A review, J. Build. Eng. 19 (2018) 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.04.021>.
- [79] L.K. Sahu, D. Mondloe, A. Garhewal, A review on thermal and mechanical properties of concrete containing phase change material, 04 (2017) 12.

- [80] S. Drissi, Développement de nouveaux bétons “accumulateurs d'énergie”: investigations expérimentale, probabiliste et numérique du comportement thermique, phd, l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis et l'Université Paris-EST, 2015. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01271597/document> (accessed November 15, 2019).
- [81] S. Cunha, J. Aguiar, V. Ferreira, A. Tadeu, Mortars based in different binders with incorporation of phase-change materials: Physical and mechanical properties, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 19 (2015) 1216–1233. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1008651>.
- [82] Z. Dakhli, K. Chaffar, Z. Lafhaj, The Effect of Phase Change Materials on the Physical, Thermal and Mechanical Properties of Cement, *Sci.* 1 (2019) 27. <https://doi.org/10.3390/sci1010027>.
- [83] Z.I. Djamai, F. Salvatore, A. Si Larbi, G. Cai, M. El Mankibi, Multiphysics analysis of effects of encapsulated phase change materials (PCMs) in cement mortars, *Cem. Concr. Res.* 119 (2019) 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.002>.
- [84] S. Drissi, A. Eddhahak, J. Neji, S. Caré, Etude de l'impact des Matériaux à Changement de Phase (MCP) sur l'hydratation des bétons-MCP, *Conférence Journ. Sci. Fr.-Maghrébines-CMC Tunis.* (2014) 6.
- [85] M. Kheradmand, R. Vicente, M. Azenha, J.L.B. de Aguiar, Influence of the incorporation of phase change materials on temperature development in mortar at early ages: Experiments and numerical simulation, *Constr. Build. Mater.* 225 (2019) 1036–1051. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.028>.
- [86] P.K. Mehta, *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, Prentice-Hall, 1986.
- [87] Nouvelles performances des bétons, *Infociments.* (2006). <https://www.infociments.fr/b90g-nouvelles-performances-des-betons> (accessed August 18, 2021).
- [88] A.P. Souchu, *Hydratation du ciment Portland*, Site Doc. Lerm. (2009). <http://doc.lerm.fr/lhydratation-du-ciment-portland/> (accessed August 18, 2021).
- [89] NF EN 196-9, Méthodes d'essai des ciments - Partie 9 : chaleur d'hydratation - Méthode semi-adiabatique, NF EN 196-9, 2010. https://cobaz.afnor.org/notice/norme/nf-en-196-9/FA164015?rechercheID=2536957&searchIndex=1&activeTab=all#id_lang_1_descripteur (accessed August 18, 2021).
- [90] S. Drissi, A. Eddhahak, S. Caré, J. Néji, J. Colin, Investigation expérimentale et modélisation multi-échelle des propriétés thermiques des bétons incorporant des Matériaux à Changement de Phase (MCP), (2013) 11.
- [91] S.Y. Kong, Z.H. See, C.L. Lee, X. Yang, L.S. Wong, T.S. Goh, Thermal and mechanical properties of mortar incorporated with paraffin/palm oil fuel ash composite, *J. Build. Eng.* 26 (2019) 100923. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100923>.
- [92] A. Pasupathy, R. Velraj, Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management, *Energy Build.* 40 (2008) 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.016>.
- [93] M. Kheradmand, M. Azenha, J.L.B. de Aguiar, J. Castro-Gomes, Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings, *Energy.* 94 (2016) 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.131>.
- [94] S.-G. Jeong, J. Jeon, J. Cha, J. Kim, S. Kim, Preparation and evaluation of thermal enhanced silica fume by incorporating organic PCM, for application to concrete, *Energy Build.* 62 (2013) 190–195. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.053>.
- [95] S. Cunha, J. Aguiar, F. Pacheco-Torgal, Effect of temperature on mortars with incorporation of phase change materials, *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.077>.
- [96] L. Haurie, J. Mazo, M. Delgado, B. Zalba, Fire behaviour of a mortar with different mass fractions of phase change material for use in radiant floor systems, *Energy Build.* 84 (2014) 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.026>.
- [97] L. Haurie, S. Serrano, M. Bosch, A.I. Fernandez, L.F. Cabeza, Single layer mortars with microencapsulated PCM: Study of physical and thermal properties, and fire behaviour, *Energy Build.* 111 (2016) 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.028>.
- [98] Y. Farnam, H.S. Esmaeeli, P.D. Zavattieri, J. Haddock, J. Weiss, Incorporating phase change materials in concrete pavement to melt snow and ice, *Cem. Concr. Compos.* 84 (2017) 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.002>.

- [99] S. Nayak, G.A. Lyngdoh, S. Das, Influence of microencapsulated phase change materials (PCMs) on the chloride ion diffusivity of concretes exposed to Freeze-thaw cycles: Insights from multiscale numerical simulations, *Constr. Build. Mater.* 212 (2019) 317–328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.003>.
- [100] M. Mahedi, B. Cetin, K.S. Cetin, Freeze-thaw performance of phase change material (PCM) incorporated pavement subgrade soil, *Constr. Build. Mater.* 202 (2019) 449–464. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.210>.
- [101] E. Kravchenko, J. Liu, X. Li, Numerical modeling of the thermal performance of soil containing microencapsulated PCM, *Constr. Build. Mater.* 298 (2021) 123865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123865>.
- [102] E. Kravchenko, J. Liu, D. Chang, Y. Rao, A. Krainiukov, Study of the thermal field of a mixture of soil and PCM materials with simulation of the warming effect during a phase change, *Constr. Build. Mater.* 262 (2020) 120818. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120818>.
- [103] S. Serrano, C. Barreneche, L. Rincón, D. Boer, L.F. Cabeza, Optimization of three new compositions of stabilized rammed earth incorporating PCM: Thermal properties characterization and LCA, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 872–878. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.018>.
- [104] A. Gounni, H. Louahlia, Dynamic behavior and economic analysis of sustainable building integrating cob and phase change materials, *Constr. Build. Mater.* 262 (2020) 120795. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120795>.
- [105] T. Santos, L. Nunes, P. Faria, Production of eco-efficient earth-based plasters: Influence of composition on physical performance and bio-susceptibility, *J. Clean. Prod.* 167 (2017) 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.131>.
- [106] A. de Gracia, C. Barreneche, M.M. Farid, L.F. Cabeza, New equipment for testing steady and transient thermal performance of multilayered building envelopes with PCM, *Energy Build.* 43 (2011) 3704–3709. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.010>.
- [107] F. Kuznik, J. Virgone, K. Johannes, Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM, *Energy Build.* 42 (2010) 1004–1009. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.012>.
- [108] D.P. Bentz, R. Turpin, Potential applications of phase change materials in concrete technology, *Cem. Concr. Compos.* 29 (2007) 527–532. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.007>.
- [109] V.D. Cao, S. Pilehvar, C. Salas-Bringas, A.M. Szczotok, J.F. Rodriguez, M. Carmona, N. Al-Manasir, A.-L. Kjøniksen, Microencapsulated phase change materials for enhancing the thermal performance of Portland cement concrete and geopolymer concrete for passive building applications, *Energy Convers. Manag.* 133 (2017) 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.061>.
- [110] A. de Gracia, L.F. Cabeza, Phase change materials and thermal energy storage for buildings, *Energy Build.* 103 (2015) 414–419. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.007>.
- [111] E. Franquet, S. Gibout, P. Tittlein, L. Zalewski, J.-P. Dumas, Experimental and theoretical analysis of a cement mortar containing microencapsulated PCM, *Appl. Therm. Eng.* 73 (2014) 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.06.053>.
- [112] A. Joulain, L. Zalewski, S. Lassue, H. Naji, Experimental investigation of thermal characteristics of a mortar with or without a micro-encapsulated phase change material, *Appl. Therm. Eng.* 66 (2014) 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.027>.
- [113] S. Kalnæs, B. Jelle, Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities, *Energy Build.* 94 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.023>.
- [114] H. Lin, S. Zheng, S.D.N. Lourenço, P. Jaquin, Characterization of coarse soils derived from igneous rocks for rammed earth, *Eng. Geol.* 228 (2017) 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.08.003>.
- [115] XP P94-041, Soil: investigation and testing. Granulometric description. Wet sieving method., XP P94-041, 1995. <https://sagaweb.afnor.org>.
- [116] NF P11-300, Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, NF P11-300, 1992. <https://cobaz.afnor.org/notice/norme/nf-p11->

- 300/FA024714?rechercheID=3920641&searchIndex=1&activeTab=all (accessed November 22, 2021).
- [117] FAO, ed., Guidelines for soil description, 4. ed, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2006.
- [118] NF P94-051, Soil : investigation and testing. Determination of Atterberg's limits. Liquid limit test using cassagrande apparatus. Plastic limit test on rolled thread., NF P94-051, 1993. https://cobaz.afnor.org/notice/norme/nf-p94-051/FA020765?rechercheID=795218&searchIndex=1&activeTab=all#id_lang_1_descripteur.
- [119] NF P94-068, Soils : investigation and testing. Measuring of the methylene blue adsorption capacity of a rocky soil. Determination of the methylene blue of a soil by means of the stain test., NF P94-068, 1998. <https://sagaweb.afnor.org>.
- [120] ASTM D2487-06, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM D2487-06, 2010. <https://www.astm.org/d2487-06.html> (accessed January 26, 2022).
- [121] S. Gražulis, A. Daškevič, A. Merkys, D. Chateigner, L. Lutterotti, M. Quirós, N.R. Serebryanaya, P. Moeck, R.T. Downs, A. Le Bail, Crystallography Open Database (COD): an open-access collection of crystal structures and platform for world-wide collaboration, *Nucleic Acids Res.* 40 (2012) D420-427. <https://doi.org/10.1093/nar/gkr900>.
- [122] L. Lutterotti, S. Matthies, H.-R. Wenk, A.S. Schultz, J.W. Richardson, Combined texture and structure analysis of deformed limestone from time-of-flight neutron diffraction spectra, *J. Appl. Phys.* 81 (1997) 594–600. <https://doi.org/10.1063/1.364220>.
- [123] L. Lutterotti, H. Pilliere, C. Fontugne, P. Boullay, D. Chateigner, Full-profile search–match by the Rietveld method Full-profile search–match by the Rietveld method Full-profile search–match by the Rietveld method, *J. Appl. Crystallogr.* 52 (2019). <https://doi.org/10.1107/S160057671900342X>.
- [124] Pr.Y. El Mendili, D. Chateigner, B. Orberger, S. Gascoin, J.-F. Bardeau, S. PETIT, C. Duée, M. Guen, H. Pilliere, Combined XRF, XRD, SEM-EDS, and Raman Analyses on Serpentinized Harzburgite (Nickel Laterite Mine, New Caledonia): Implications for Exploration and Geometallurgy, (2019). <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.9b00014>.
- [125] Y. El Mendili, M. Bouasria, M.-H. Benzaama, F. Khadraoui, M. Le Guern, D. Chateigner, S. Gascoin, J.-F. Bardeau, Mud-Based Construction Material: Promising Properties of French Gravel Wash Mud Mixed with Byproducts, Seashells and Fly Ash as a Binder, *Materials.* 14 (2021) 6216. <https://doi.org/10.3390/ma14206216>.
- [126] G. Meinhold, Rutile and its applications in earth sciences, *Earth-Sci. Rev.* 102 (2010) 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.001>.
- [127] K.J. Stanienda, Carbonate phases rich in magnesium in the Triassic limestones of the eastern part of the Germanic Basin, *Carbonates Evaporites.* 31 (2016) 387–405. <https://doi.org/10.1007/s13146-016-0297-2>.
- [128] N. Sivakugan, Basic Structural Units of Clay Minerals. In: claymin.ppt (Editor), Power Point. James Cook University, Townsville. Australia, (2001). https://www.geoengineer.org/storage/education/10/general_file_collection/7626/1557731211-ClayMineralogy-Sivakugan_1_.ppt (accessed June 1, 2022).
- [129] F.A. Andrade, H.A. Al-Qureshi, D. Hotza, Measuring the plasticity of clays: A review, *Appl. Clay Sci.* 51 (2011) 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.028>.
- [130] D. Hillel, 5. Soil physical attributes, in: D. Hillel (Ed.), *Soil Environ.*, Academic Press, San Diego, 2008: pp. 55–77. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348536-6.50010-1>.
- [131] C. Baley, Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites, *Plast. Compos.* (2020). <https://doi.org/10.51257/a-v3-am5130>.
- [132] Le paillis de lin, Gamm Vert. (2018). <https://www.gammvert.fr/conseils/conseils-de-jardinage/le-paillis-de-lin> (accessed November 17, 2021).
- [133] Envirobat Oc - Construction et aménagement durables en Occitanie, Etude filière courte: Roseaux de Camargue, (n.d.). <https://www.envirobat-oc.fr/> (accessed November 17, 2021).
- [134] Météo France, (2019). <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2019/bilan-climatique-de-l-ete-2019#> (accessed October 21, 2020).

- [135] A. Sari, A. Karaipekli, K. Kaygusuz, Capric acid and stearic acid mixture impregnated with gypsum wallboard for low-temperature latent heat thermal energy storage, *Int. J. Energy Res.* 32 (2008) 154–160. <https://doi.org/10.1002/er.1352>.
- [136] NF ISO 5017, Produits réfractaires façonnés denses — Détermination de la masse volumique apparente, de la porosité ouverte et de la porosité totale, NF ISO 5017, 2013. <https://sagaweb.afnor.org>.
- [137] NF EN ISO 12571, Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of hygroscopic sorption properties, NF EN ISO 12571, 2013. <https://sagaweb.afnor.org>.
- [138] NF EN ISO 12572, Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method, NF EN ISO 12572, 2016. <https://sagaweb.afnor.org>.
- [139] ISO 8301, Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Heat flow meter apparatus, ISO 8301, 1991. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/01/54/15421.html>.
- [140] Plastiques — Analyse calorimétrique différentielle (DSC) — Partie 4: Détermination de la capacité thermique massique, NF EN ISO 11357-4, 2014. <https://sagaweb.afnor.org/>.
- [141] NF EN 13286-41, Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 41: test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures, NF EN 13286-41, 2003. <https://sagaweb.afnor.org>.
- [142] J.W. Gooch, Fourier's Law of Heat Conduction, in: J.W. Gooch (Ed.), *Encycl. Dict. Polym.*, Springer, New York, NY, 2011: pp. 323–323. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6247-8_5262.
- [143] P.M. Touré, V. Sambou, M. Faye, A. Thiam, M. Adj, D. Azilinson, Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB), *J. Build. Eng.* 13 (2017) 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.08.012>.
- [144] R. Anger, L. Fontaine, T. Joffroy, E. Ruiz, Construire en terre, une autre voie pour loger la planète, *Sect. Privé Dév. Rev. Bimest. Proparco.* 10 (2011) 18–21.
- [145] F. Alassaad, K. Touati, D. Levacher, N. Sebaibi, Impact of phase change materials on lightened earth hygroscopic, thermal and mechanical properties, *J. Build. Eng.* 41 (2021) 102417. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102417>.
- [146] A. Jayalath, R. San Nicolas, M. Sofi, R. Shanks, T. Ngo, L. Aye, P. Mendis, Properties of cementitious mortar and concrete containing micro-encapsulated phase change materials, *Constr. Build. Mater.* 120 (2016) 408–417. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.116>.
- [147] R. Andrade, C. Pérez, Models of sorption isotherms for food: Uses and limitations, *Vitae Rev. Fac. Quimica Farm.* 18 (2011) 325–334.
- [148] W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, Y.I. Cho, *Handbook of Heat Transfer*, McGraw-Hill Education, 1998. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070535558> (accessed November 2, 2020).
- [149] Cob Houses Are the Ultimate Eco-Friendly Homes—Here's 5 You Can Visit, *Brightly.* (2021). <https://brightly.eco/cob-houses/> (accessed January 24, 2022).
- [150] Cob Homes around the World, (2020). <http://naturalhomes.org/natural-building-cob.htm> (accessed January 24, 2022).
- [151] T. Santos, P. Faria, A. Santos Silva, Eco-efficient earth plasters: The effect of sand grading and additions on fresh and mechanical properties, *J. Build. Eng.* 33 (2021) 101591. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101591>.
- [152] P. Kasinikota, D.D. Tripura, Predicting the effect of crushed brick particle size on anisotropy, physical and mechanical properties of compressed stabilized earth blocks using ultrasonic pulse velocity, *Mater. Struct.* 54 (2021) 112. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01712-y>.
- [153] R. Harries, B. Saxton, K. Coventry, The geological and geotechnical properties of earth material from central Devon in relation to its suitability for building in “cob,” in: *Annual Conference of the Ussher Society*, 1995.
- [154] O. Akinkulore, Cangru Jiang, A.T. Oyediran, O.I. Dele-Salawu, A.K. Elensinnla, Engineering Properties of Cob as a Building Material, *J. Appl. Sci.* 6: 1882-1885 (2006). <https://doi.org/10.3923/jas.2006.1882.1885>.

- [155] E. Quagliarini, G. Maracchini, Experimental and FEM Investigation of Cob Walls under Compression, *Adv. Civ. Eng.* 2018 (2018) e7027432. <https://doi.org/10.1155/2018/7027432>.
- [156] L. Miccoli, U. Müller, P. Fontana, Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob, *Constr. Build. Mater.* 61 (2014) 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.009>.
- [157] F. Collet, M. Bart, L. Serres, J. Miriel, Porous structure and hydric properties of cob, *J. Porous Media - J POROUS MEDIA*. 13 (2010) 111–124. <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v13.i2.30>.
- [158] J.-P. Oliva, S.C. Courgey, L'isolation thermique écologique. Conception, matériaux, mise en oeuvre, 2001.
- [159] F. Stazi, A. Nacci, F. Tittarelli, E. Pasqualini, P. Munafò, An experimental study on earth plasters for earthen building protection: The effects of different admixtures and surface treatments, *J. Cult. Herit.* 17 (2016) 27–41. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.07.009>.
- [160] F. Collet-Foucault, Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux, These de doctorat, Rennes, INSA, 2004. <http://www.theses.fr/2004ISAR0016> (accessed November 26, 2020).
- [161] P.C. Tabares-Velasco, C. Christensen, M. Bianchi, C. Booten, Verification and Validation of EnergyPlus Conduction Finite Difference and Phase Change Material Models for Opaque Wall Assemblies, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2012. <https://doi.org/10.2172/1050120>.
- [162] P.C. Tabares-Velasco, B. Griffith, Diagnostic test cases for verifying surface heat transfer algorithms and boundary conditions in building energy simulation programs, *J. Build. Perform. Simul.* 5 (2012) 329–346. <https://doi.org/10.1080/19401493.2011.595501>.
- [163] A. Al-Janabi, M. Kavgic, Application and sensitivity analysis of the phase change material hysteresis method in EnergyPlus: A case study, *Appl. Therm. Eng.* 162 (2019) 114222. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114222>.
- [164] U.D. EnergyPlus, EnergyPlus Engineering Reference: the reference to EnergyPlus calculations, US Department of Energy, 2010.
- [165] DesignBuilder, (2022). <https://www.batisim.net/designbuilder.html> (accessed March 17, 2022).
- [166] PCM-Enhanced Building Components, n.d. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-14286-9> (accessed June 14, 2022).
- [167] U.S. DoE, EnergyPlus Input output reference, US Dep. Energy. (2010).
- [168] Le test d'étanchéité, Bur. Détudes Therm. RT2012 En Ligne. (n.d.). <https://www.e-rt2012.fr/explications/achevement-travaux/test-etancheite/> (accessed June 21, 2022).
- [169] Building Technologies Office, Energy.Gov. (n.d.). <https://www.energy.gov/eere/buildings/building-technologies-office> (accessed July 12, 2022).
- [170] A. ASHRAE, ASHRAE Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy, (2017). <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>.
- [171] C.K.C. Lam, M. Loughnan, N. Tapper, Visitors' perception of thermal comfort during extreme heat events at the Royal Botanic Garden Melbourne, *Int. J. Biometeorol.* 62 (2018) 97–112. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1125-4>.
- [172] I. Knez, S. Thorsson, Thermal, emotional and perceptual evaluations of a park: Cross-cultural and environmental attitude comparisons, *Build. Environ.* 43 (2008) 1483–1490. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.08.002>.
- [173] D. Ormandy, V. Ezratty, Health and thermal comfort: From WHO guidance to housing strategies, *Energy Policy*. 49 (2012) 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.003>.
- [174] H. Feriadi, N.H. Wong, Thermal comfort for naturally ventilated houses in Indonesia, *Energy Build.* 36 (2004) 614–626. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.011>.
- [175] S. Carlucci, L. Bai, R. de Dear, L. Yang, Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents, *Build. Environ.* 137 (2018) 73–89. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>.
- [176] G.S. Brager, R.J. de Dear, Thermal adaptation in the built environment: a literature review, *Energy Build.* 27 (1998) 83–96. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00053-4).

- [177] M. Nikolopoulou, K. Steemers, Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces, *Energy Build.* 35 (2003) 95–101. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1).
- [178] D. Sánchez-García, D. Bienvenido-Huertas, M. Tristancho-Carvajal, C. Rubio-Bellido, Adaptive Comfort Control Implemented Model (ACCIM) for Energy Consumption Predictions in Dwellings under Current and Future Climate Conditions: A Case Study Located in Spain, *Energies.* 12 (2019) 1498. <https://doi.org/10.3390/en12081498>.
- [179] D. Sánchez-García, C. Rubio-Bellido, J.J.M. del Río, A. Pérez-Fargallo, Towards the quantification of energy demand and consumption through the adaptive comfort approach in mixed mode office buildings considering climate change, *Energy Build.* 187 (2019) 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.002>.
- [180] R. de Dear, G. Schiller Brager, The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment, *Int. J. Biometeorol.* 45 (2001) 100–108. <https://doi.org/10.1007/s004840100093>.
- [181] NF EN 16798-1, Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1 : indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1, NF EN 16798-1, 2019. <https://cobaz.afnor.org/notice/norme/nf-en-16798-1/FA187070?rechercheID=5735943&searchIndex=1&activeTab=all> (accessed March 9, 2022).
- [182] N. Valente, Le diagramme de confort de Brager, pour de meilleures STD/SED | BBS Slama, (2020). <https://www.bbs-slama.com/le-diagramme-de-confort-de-brager-pour-de-meilleures-std-sed/> (accessed March 10, 2022).
- [183] EN 15251:2007, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, EN 15251:2007, 2008. <https://cobaz.afnor.org/notice/norme/bs-en-152512007/EU102305?rechercheID=5758463&searchIndex=1&activeTab=all> (accessed March 10, 2022).
- [184] Norme NBN EN 15251:2007 : Critères d'ambiance intérieure, *Energ. Plus Site.* (2014). <https://energieplus-lesite.be/reglementations/confort44/norme-nbn-en-15251-2007-criteres-d-ambiance-interieure/> (accessed March 10, 2022).
- [185] P.O. Fanger, Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering., *Therm. Comf. Anal. Appl. Environ. Eng.* (1970). <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19722700268> (accessed March 11, 2022).
- [186] K.J. Lomas, D. Fiala, M.J. Cook, P.C. Cropper, Building bioclimatic charts for non-domestic buildings and passive draught evaporative cooling, *Build. Environ.* 39 (2004) 661–676. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.12.011>.
- [187] B. Givoni, Comfort, climate analysis and building design guidelines, *Energy Build.* 18 (1992) 11–23. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K).
- [188] M. Košir, Bioclimatic Potential—A Way to Determine Climate Adaptability, in: M. Košir (Ed.), *Clim. Adapt. Build. Bioclimatic Des. Light Clim. Change*, Springer International Publishing, Cham, 2019: pp. 117–139. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18456-8_4.
- [189] Gh.R. Roshan, M. Farrokhzad, S. Attia, Defining thermal comfort boundaries for heating and cooling demand estimation in Iran's urban settlements, *Build. Environ.* 121 (2017) 168–189. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.023>.
- [190] N. Al-Azri, Y. Zurigat, N. Al-Rawahi, Development of bioclimatic chart for passive building design in Muscat-Oman, *Renew. Energy Power Qual. J.* (2012) 1809–1815. <https://doi.org/10.24084/repqj10.841>.
- [191] Santy, H. Matsumoto, K. Tsuzuki, L. Susanti, Bioclimatic Analysis in Pre-Design Stage of Passive House in Indonesia, *Buildings.* 7 (2017) 24. <https://doi.org/10.3390/buildings7010024>.
- [192] A. Mohamad, Semi-structural insulating and waterproof biobased concrete, These de doctorat, Normandie, 2021. <http://www.theses.fr/2021NORMC236> (accessed February 2, 2022).

Liste des figures

Figure 1: Classification des principales techniques de construction en terre, selon le mode d'utilisation, [20]	14
Figure 2: Plages d'humidité relative optimales pour minimiser les effets nocifs sur la santé [41]	15
Figure 3: Démarche de construction en pisé [44]	16
Figure 4: Démarche de fabrication des briques adobe [44]	17
Figure 5: Des briques de terre comprimées [44]	17
Figure 6: La construction en bauge [44,46].....	18
Figure 7: Un exemple de bâtiment construit avec de la terre allégée [46,48].....	20
Figure 8: Différentes techniques de stockage thermique.....	22
Figure 9: Différentes techniques de stockage de chaleur sensible [59]	23
Figure 10: Comportement de l'eau à la température en termes de chaleur [64]	24
Figure 11: Diagramme de transition de phase [67]	25
Figure 12: Différents types de matériaux PCM.....	26
Figure 13: Micro [71] et macro [72] capsules de PCM.....	27
Figure 14: Exemple de résultats mécaniques (compression et flexion) en fonction de la teneur en PCM ajoutée dans une matrice cimentaire [85]	28
Figure 15: Relation porosité - ajout de PCM dans un mortier [82]	29
Figure 16: Relation entre résistance, perméabilité et porosité d'un béton [86].....	29
Figure 17: Température (a) et chaleur d'hydratation (b) observées sur des mortiers étudiés par Drissi et al (2014) [84].....	30
Figure 18: Images MEB d'un mortier + 10 wt% PCM (INERTEK 23) montrant l'effet du PCM sur l'hydratation [83]	30
Figure 19: Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la température [90]	31
Figure 20: Evolution de la conductivité thermique en fonction du taux de PCM [82].....	32
Figure 21: Températures mesurées dans un scénario d'été et d'hiver [93].....	33
Figure 22: (a, b, c) Température en profondeur - (d) Dégagement de chaleur, [98]	35
Figure 23: Distribution de la concentration en chlorure d'un mortier endommagé par le gel à 30 jours: (à gauche) mortier (à droite) mortier-PCM, [99].....	35
Figure 24: Variations de la température de mélanges sol-PCM [102].....	37
Figure 25: Composition des murs pour la simulation numérique réalisée par Gounni et Louahlia [104].	39
Figure 26: Capacité thermique du PCM ENERGAIN [104,107].	40
Figure 27: Zone climatique définie selon la réglementation RT2012	40
Figure 28: Courbes granulométriques des différents sols.....	48
Figure 29: Texture des sols selon ses constituants : Sol 1 (orange) – Sol 2 (bleu) – Sol 3 (noir) [117].	48
Figure 30: Différentes combinaisons de feuilles tétraédriques et octaédriques [128]	51
Figure 31: Image MEB de la paille de roseau (à gauche) et la paille de lin (à droite).....	53
Figure 32: Fraction biochimique de la paille de roseau (à gauche) et de la paille de lin (à droite)	53
Figure 33: Courbe DSC du Nextek 24D [71]	55
Figure 34: Courbe DSC du Micronal 5038 X [71].....	55
Figure 35: Protocole de confections des éprouvettes	57
Figure 36: Appareil de mesure de la sorption dynamique de la vapeur.....	59
Figure 37: Illustration du dispositif de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau.....	60
Figure 38: Principe de mesure de la conductivité thermique avec l'appareil Netzsch HFM 436 Lambda.....	61
Figure 39: Dispositif du système de mesure par DSC.....	62
Figure 40: La presse d'essai INSTRON SCHENCK.....	64

Figure 41: Coupe d'une vue 3D du dispositif expérimental permettant l'étude de la réponse thermique d'un matériau à des conditions aux limites variables	65
Figure 42: Courbe résistance à la compression-déformation de la terre allégée en fonction de la teneur en PCM.....	71
Figure 43: Isothermes de sorption du sol1, de la paille de roseau et du PCM Nextek 24D.....	72
Figure 44: Courbes de sorption dynamiques des différents mélanges de la terre allégée.....	73
Figure 45: Isothermes de sorption/désorption de la terre allégée à différents teneurs en PCM.....	74
Figure 46: Perméabilité à la vapeur d'eau et facteur de résistance à la vapeur d'eau mesurés sur les différents mélanges terre légère-PCM.....	75
Figure 47: Conductivité thermique de la terre allégée en fonction de la teneur en PCM et de la température.....	76
Figure 48: Evolution de la capacité thermique massique des matériaux bruts de la terre allégée.....	77
Figure 49: Evolution de capacité thermique de la terre allégée en fonction de la température et la teneur en PCM.....	78
Figure 50: Évolution de la température au cœur des échantillons de terre allégée-PCM en fonction du temps.....	79
Figure 51: Évolution de la température intérieure des mélanges terre allégée-PCM lors d'un cyclage thermique.....	80
Figure 52: Evolution de la porosité de la bauge en fonction de sa teneur en PCM.....	86
Figure 53: Evolution de la masse volumique apparente de la bauge en fonction de la teneur en PCM.....	86
Figure 54: Courbe contrainte-déformation de la bauge à différentes teneurs en PCM.....	87
Figure 55: Observation sous microscope de la bauge ; B0 (gauche) et B10 (droite)	87
Figure 56: Courbes de sorption dynamiques des différents mélanges bauge-PCM étudiés	88
Figure 57: Isotherme de sorption/désorption de la bauge à différentes teneurs en PCM.....	89
Figure 58: Evolution de la perméabilité à la vapeur d'eau et le facteur de résistance à la diffusion de vapeur de la bauge en fonction de la teneur en PCM.....	90
Figure 59: Evolution de la conductivité thermique de la bauge en fonction de la teneur en PCM et de la température.....	91
Figure 60: Evolution de la capacité thermique massique de la paille de lin, du sol et du Micronal 5038 X en fonction de la température	92
Figure 61: Evolution de la capacité thermique massique des formulation bauge-PCM en fonction de la température.....	93
Figure 62: Évolution de la température intérieure des mélanges bauge-PCM lors d'un cyclage thermique.....	94
Figure 63: Plan 2D de la maison individuelle simulée.....	101
Figure 64: Combinaisons d'éléments de la maison [165]	102
Figure 65: Illustration du confort thermique adaptatif basé sur la norme EN 16798-1 [181]	103
Figure 66: Scénario du chauffage/refroidissement adopté en jours de semaine (sauf le week-end) ...	104
Figure 67: Évolution du confort adaptatif dans une maison individuelle en terre allégée incorporant des PCM à Caen et à Nice, (suite de la figure, page suivante)	105
Figure 68: Évolution du confort hygrothermique dans une maison individuelle en terre allégée incorporant des PCM à Caen et à Nice, (suite de la figure, page suivante).....	108
Figure 69: Consommation annuelle d'énergie (refroidissement et chauffage) et gain d'énergie dans une maison individuelle en terre allégée incorporant des PCM dans ses parois extérieures à Caen et à Nice.....	111
Figure 70: Gain d'énergie en fonction de la température maximale de fusion/solidification des PCM à Caen et Nice dans le cas du mélange TA10.....	112
Figure 71: Confort adaptatif dans une maison en bauge à Caen et à Nice, (suite de la figure, page suivante)	112
Figure 72: Évolution du confort hygrothermique dans une maison individuelle en bauge incorporant des PCM à Caen et à Nice, (suite de la figure, page suivante)	115

Figure 73: Consommation annuelle d'énergie (refroidissement et chauffage) et gain d'énergie quand les murs extérieurs sont en bauge incorporant du Micronal 5038 X à Caen et à Nice.....	117
Figure 74: Gain d'énergie en fonction de la température maximale de fusion/solidification des PCM à Caen et Nice pour B10.	118
Figure 75: Effet de la vitesse sur la détection du changement de phase par DSC.....	119
Figure 76: Consommation annuelle d'énergie et gain d'énergie quand les murs extérieurs sont en terre allégée incorporant du Nextek 24D sans hystérésis à Caen et à Nice	119
Figure 77: Consommation annuelle d'énergie et gain d'énergie quand les murs extérieurs sont en bauge incorporant du Micronal 5038 X sans hystérésis à Caen et à Nice.....	120

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques mécano-hygro-thermiques de la bauge [47].....	19
Tableau 2: Propriétés mécaniques et hygrothermiques de différents matériaux à base de terre.....	21
Tableau 3: Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur [66].....	24
Tableau 4: Comparaison des matériaux organiques et inorganiques pour le stockage de la chaleur [68].	26
Tableau 5: Composition des différents pisés stabilisé étudiés [38,103].....	38
Tableau 6: Propriétés thermiques et mécaniques de différentes formulations de pisé stabilisé dopé avec différents taux de PCM [38,103].....	38
Tableau 7: Les propriétés thermo-physiques des composants du mur extérieur de la maison en bauge [104].....	40
Tableau 8: Distributions des particules pour les différents sols.....	49
Tableau 9: Valeur au bleu de méthylène et limites d'Atterberg des différents sols.....	49
Tableau 10: Composition chimique du sol structural en masse obtenue par des mesures XRF.....	50
Tableau 11: Valeurs raffinées des paramètres du réseau, du volume unitaire de la cellule des sols 1 et 2 utilisés. Un écart-type est indiqué entre parenthèses sur le dernier chiffre.....	52
Tableau 12: Propriétés physiques des PCM étudiés.....	54
Tableau 13: Formulations étudiées en kg pour 1 m ³ de matériau composite.....	56
Tableau 14: Essais, normes et dimensions des échantillons formulés pour les différents essais : thermiques, mécaniques et hygroscopiques.....	58
Tableau 15: Formulations de la terre allégée étudiées [kg/1m ³].....	69
Tableau 16: Porosité ouverte mesurée de la terre allégée pour les différentes teneurs en PCM.....	70
Tableau 17: Résistance à la compression des mélanges de terre allégée en fonction de leur teneur en PCM.....	71
Tableau 18: Valeurs de la conductivité thermique de la terre allégée en fonction de la teneur en PCM et de la température.....	76
Tableau 19: Formulations de bauge étudiées (en kg du constituant pour 1 m ³ de bauge).....	85
Tableau 20: Résistance à la compression maximale de la bauge et déformation correspondante en fonction de la teneur en PCM.....	88
Tableau 21: Valeurs de la conductivité thermique de la bauge en fonction de la teneur en PCM et de la température.....	91
Tableau 22: Confort thermique adaptatif dans une maison individuelle en considérant les différentes formulations terre allégée-PCM à Caen et à Nice.....	107
Tableau 23: Valeurs du confort hygrothermique permises par les différentes formulations de terre allégée-PCM à Caen et Nice.....	110
Tableau 24: Confort thermique adaptatif par les différentes formulations bauge-PCM à Caen et à Nice.	114
Tableau 25: Valeur de confort hygrothermique permises par les différentes formulations de bauge-PCM à Caen et Nice.....	117

Résumé

L'objectif du présent travail est l'investigation de l'impact de l'amélioration de la masse thermique sur la consommation d'énergie et le confort hygrothermique dans des bâtiments en terre (mélanges sol-fibre). Ainsi, dans un premier temps, des mélanges de bauge et de terre allégée incorporant des matériaux à changement de phase microencapsulés (PCM) ont été élaborés. Le comportement mécanique, hygroscopique et thermique de ces mélanges sol-fibres-PCM a été étudié expérimentalement

Du point de vue mécanique, l'incorporation de PCM a réduit la résistance à la compression de la bauge tout en conservant sa capacité porteuse. Une bauge incorporant 10 %wt. de PCM voit sa résistance à la compression baisser de 23 %. En revanche, la terre allégée, étant donné sa résistance à la compression déjà faible, l'incorporation de PCM ne l'affecte pas significativement. En ce qui concerne les propriétés hygroscopiques, l'ajout de PCM a dégradé légèrement les performances de la bauge et de la terre allégée. Ainsi, les isothermes de sorption/désorption et la perméabilité à la vapeur d'eau ont diminué dans les deux cas. Ceci est supposé dû à la nature hydrophobe du PCM. Par ailleurs, l'incorporation de PCM a démontré un effet bénéfique sur les propriétés thermiques des deux mélanges. Pour une teneur en PCM de 10 %wt., la conductivité thermique de la terre allégée et de la bauge a baissé de 8 % et 14 %, respectivement. En considérant la conductivité thermique, un dosage optimal de PCM a été identifié. Il est de 10 %wt. pour la terre allégée et de 5 %wt. pour la bauge. Pour ce qui est de la capacité thermique massique, elle a augmenté continuellement en fonction de la teneur en PCM pour les deux matériaux.

Dans un second temps, l'effet de l'incorporation de PCM sur la consommation énergétique d'une maison typique construite en bauge et en terre allégée a été étudié numériquement. Ces études ont été effectuées en considérant deux climats différents, un climat plutôt océanique dans le nord-ouest de la France (Caen) et un climat méditerranéen (Nice). Ces simulations ont montré une nette amélioration du confort thermique des occupants de la maison individuelle considérée. Dans le cas de la terre allégée avec 10 %wt. de PCM incorporé, le confort thermique (Givoni) est amélioré de 10 et 16 points à Caen et Nice, respectivement. Pour la bauge incorporant 10 %wt. de PCM, le confort thermique (Givoni) est amélioré de 3 et 7 points à Caen et Nice, respectivement. En conséquence, la consommation d'énergie liée au chauffage et au refroidissement baisserait d'environ 30 % à Caen et 38 % à Nice en considérant une terre allégée contenant 10% wt. de PCM. Pour la même teneur en PCM, la maison en bauge est supposée voir sa consommation baisser de 11 % et 44 % à Caen et à Nice, respectivement.

Abstract

The present work investigates the impact of thermal mass improvement on energy consumption and hygrothermal comfort in earthen buildings (soil-fiber mixes). Thus, in a first step, cob and light earth mixtures incorporating microencapsulated phase change materials (PCM) have been prepared. Mechanical, hygroscopic, and thermal behavior of these soil-fiber-PCM mixtures were studied experimentally.

Regarding mechanical behavior, PCM incorporation reduced cob compressive strength while conserving its load-bearing capacity. A cob incorporating 10 wt% of PCM decreased its compressive strength by 23 %. On another hand, light earth, given its already low compressive strength, PCM incorporation did not significantly affect this property. Regarding hygroscopic properties, PCM addition has slightly degraded cob and light earth performances. Thus, sorption/desorption isotherms as well as water vapor permeability decreased in both cases. This is assumed to be due to PCM hydrophobic nature. Furthermore, PCM incorporation demonstrated a positive effect on both mixtures' thermal properties. For 10 wt% PCM content, light earth and cob thermal conductivity decreased by 8 % and 14 %, respectively. Considering the thermal conductivity, an optimal dosage of PCM was identified. It is around 10 wt% for light earth and 5 wt% for cob. Regarding specific heat capacity, it increased continuously with PCM content for both materials.

In a second step, the effect of PCM incorporation on a typical house's energy consumption built with cob and light earth was numerically studied. These studies were carried out by considering two different climates, a rather oceanic climate in the northwest of France (Caen) and a Mediterranean climate (Nice). These simulations revealed a clear improvement of occupant's thermal comfort in the considered single-family house. In light earth case, with 10 wt% of PCM incorporated, thermal comfort (Givoni) is improved by 10 and 16 points in Caen and Nice, respectively. For cob incorporating 10 wt% of PCM, thermal comfort (Givoni) is improved by 3 and 7 points in Caen and Nice, respectively. As a result, energy consumption related to heating and cooling would decrease by about 30 % in Caen and 38 % in Nice considering a light earth containing 10 wt% of PCM. For the same PCM content, cob house is supposed to experience 11 % and 44 % decrease in energy consumption in both cities, respectively.

