

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département : Architecture

Réf :



جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم: الهندسة المعمارية

المرجع :

Thèse présentée en vue de l'obtention

Du diplôme de

Doctorat en sciences en : Architecture

Spécialité (Option) : Architecture

**Confort thermique des habitations à panneaux de
façade en béton préfabriqué comportant des
matériaux à changement de phase dans le contexte
D'un climat de type méditerranéen**

Présentée par :

DEHMOUS M'hand

Soutenue publiquement le : 01-12 - 2021

Devant le jury composé de :

M. ZEMMOURI Noureddine	Professeur	Président	Université de Biskra
M. LAMROUS Nacer	Professeur	Rapporteur	Université de Tizi-Ouzou
M. FRANQUET Erwin	Professeur	Rapporteur	Université Côte d'Azur
M. KUZNIC Frédéric	Professeur	Examineur	INSA de Lyon
M. BENNABES Mossadek	Professeur	Examineur	Université de Biskra
M. Laurent ZALEWSKI	Professeur	Examineur	Université ... d'Artois

Remerciements

Avant toutes choses, louanges à Dieu pour m'avoir donné la force et le courage de mener à terme ce travail malgré le long chemin parsemé d'embûches...

Les travaux présentés dans cette de thèse ont été réalisés au Laboratoire de Conception et de Modélisation des Formes et des Ambiances architecturales et urbaines (LaCoMoFA) de l'Université Mohamed Khider de Biskra et au Laboratoire de Thermique, Énergétique et Procédés (LaTEP) de l'École Nationale Supérieure du Génie des Techniques Industrielles (ENSGTI-UPPA) à Pau. Cette thèse a reçu le soutien financier du ministère algérien de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique (MESRS) à travers le Programme National Exceptionnel (PNE 2019-2020).

Je tiens à exprimer mes plus sincères sentiments de gratitude à mes deux directeurs de thèse, Nacer Lamrous Professeur à l'UMMTO et Erwin Franquet Professeur à Université Côte d'Azur de m'avoir accueilli dans leurs équipes et m'avoir épaulé dans la réalisation de cette thèse, de m'avoir fait bénéficier de leur conseils avisés. J'ai sans cesse appris sur les côtés humain, scientifique et professionnel tout au long de ces années passées à vos côtés.

Monsieur Lamrous, je n'oublierai jamais ce jour du mois de décembre 2012 où vous m'aviez accueilli à bras ouverts dans votre laboratoire pour diriger mon mémoire de magister. L'aventure qui était sensée durer le temps de ce magister, s'est poursuivie, à mon grand bonheur, encore pendant les années de cette thèse. Monsieur Franquet, je resterai à jamais marqué par votre gentillesse, votre professionnalisme et surtout votre sens de l'organisation. Heureusement que nos chemins se sont croisés ! Merci de m'avoir permis de réaliser cette thèse sous votre direction et dans les propices conditions du LaTEP.

Je témoigne également ma gratitude à Frédéric Kuznik, professeur à l'INSA de Lyon et à Laurent Zalewski, professeur à l'université d'Artois, d'avoir accepté de rapporter ce manuscrit et de participer à ce jury de thèse. Aussi, je suis très honoré que Noureddine Zemmouri et Moussadek Bennabes, Professeurs à l'Université Mohamed Khider de Biskra, aient accepté de participer à ce jury.

La pluridisciplinarité de cette thèse m'a emmené dans de nombreux laboratoires et à la rencontre de personnes sans lesquelles ce travail n'aurait pu être ce qu'il est maintenant. Je pense au personnel du LaCoMoFa, spécialement au brave Khellaf Naceur qui s'est occupé à plusieurs reprises de mes tracas administratifs. Je pense aussi à Rachid, Amina, Fadhila, Zohra du laboratoire de Génie Civil de l'UMMTO qui ont tous mis à ma disposition et n'ont jamais hésité à mettre la main à la pâte lors de la confection et du coulage de mes échantillons de béton, Zohra, Djaouida et Kahina du laboratoire de chimie de l'UMMTO qui m'ont initié à la FTIR mais aussi à manipuler les erlenmeyers, burettes et autres instruments de laboratoire. Dyhia, Mustapha, Youcef, Bachir, Fatiha, Lisa, Souad, Lila, Oussama... les sympathiques doctorants du LMSE ainsi que son directeur le professeur Said Makhoulouf pour ses cours particuliers et ses précieux conseils. Je n'oublierai pas aussi Kenza du Laboratoire du Biomédical pour les tests FTIR et Salem Boudinar du laboratoire de Chimie pour les images MEB. Yasmine du LaTEP pour la DSC. Et j'en oublie certainement...

Mes remerciements vont également à l'endroit de nombreuses personnes qui ont participé de près ou de loin à la réussite de cette thèse. Je citerai les représentants de GINI glace pour m'avoir continuellement fourni en huile végétale, le professeur Jean-Pierre Bédécarrats, directeur du LaTEP, madame Anne Fritz du Clous, mon amie Yasmine Guerbas, son père et Marwan, Jean-Michel du LaTEP, madame Petitbon de l'ED et mes amis de Tizi Ouzou et de Pau et les collègues du LaTEP qui m'ont soutenu et encouragé ; Ryma, Thimothé, Sabrina, Ahmed, Oum saad, Souad, Amina et toute l'équipe de Gaston...

Enfin, les plus tendres remerciements à ma chère ♥ femme ♥ pour son indéfectible soutien, ses conseils et ses encouragements. Je sais ô combien Jida, Yemma et Vava êtes fiers de moi ! Grand merci à mes sœurs Hayat, Liliane, Aini et Dyna et mon frère Yacine mes beaux-frères Mustapha, Hakim et Azouaou. Merci également à ma tante Rosa et son mari Mouh et mes cousins Mélissa et Rayane. Ma plus grande reconnaissance à ma cousine et grande sœur Nadia pour tout ce qu'elle a fait pour moi.

Résumé

Cette thèse porte sur le confort thermique de panneaux en béton préfabriqué intégrant des matériaux à changement de phase (MCP). Au-delà d'apporter une réponse à l'un des enjeux importants dans la lutte contre le dérèglement climatique, à savoir la consommation énergétique des bâtiments, la solution proposée est biosourcée et donc s'inscrit dans une démarche dépassant ces objectifs.

Concrètement, il s'agit de développer un béton de stockage d'énergie thermique (TESC) en ajoutant à un béton ordinaire des agrégats légers composites (cLWA), constitués de LWA imprégnés d'un MCP biosourcé à faible coût. Trois types de LWA minéraux ont été utilisés (bentonite, sépiolite et gel de silice), ainsi que deux méthodes d'imprégnation, à savoir l'imprégnation directe et l'imprégnation sous vide. Le MCP retenu est une huile végétale, dont le changement de phase est situé autour de 23-26 °C. La microstructure et la morphologie des cLWA ont été analysées par MEB, tandis que la compatibilité chimique a été déterminée avec une FTIR. Les TESC ont été préparés soit par simple ajout, soit en remplaçant un composant de base (sable ou gravier) par le cLWA. Les propriétés thermo-physiques du MCP et du cLWA ont été obtenues au moyen d'une DSC, tandis que les caractéristiques thermiques du TESC ont été évaluées avec un montage expérimental dit des plaques chaudes gardées. Les meilleurs taux d'imprégnation ont été obtenus avec du gel de silice, mais les tests mécaniques ont montré que la sépiolite devait être préférée. Malgré une perte de résistance mécanique, il est démontré que des TESC avec une résistance à la compression supérieure à 7-10 MPa sont réalisables. On montre également qu'une amélioration de 24,4% et supérieure à 13,5% est réalisable pour la capacité de stockage d'énergie et la conductivité thermique, respectivement. Ensuite, ont été évaluées les performances thermiques d'une cellule d'essai appelée TESC-S25-b-Cell conçue avec des panneaux muraux en béton léger dans lequel le sable, qui représente 25% du volume total, est remplacé par le même volume de cLWA-S. Cette cellule est soumise aux aléas des variations climatiques sur quelques jours en même temps qu'une autre cellule, de mêmes dimensions, avec des murs en béton ordinaire appelés C-R-Cell, à des fins de comparaison. Les mesures ont porté sur la température de l'air à l'intérieur et à l'extérieur des cellules, la température des parois ainsi que les flux thermiques échangés au niveau des parois et la quantité de chaleur absorbée par ces parois. Nos expériences, réalisées principalement en période estivale, ont montré une augmentation de la capacité thermique de l'enveloppe par l'ajout de MCP, conduisant à une diminution de la température intérieure des cellules. Cet effet, positif pour le confort thermique des cellules, s'accompagne d'une réduction de l'épaisseur et donc du poids des panneaux muraux par rapport aux panneaux muraux en béton ordinaire.

Mots clés : béton composite, stockage d'énergie thermique, matériaux à changement de phase, matériaux biosourcés

Abstract

This thesis deals with the thermal comfort of precast concrete panels incorporating phase change materials (PCM). Beyond providing an answer to one of the important issues in the fight against climate change, namely the energy consumption of buildings, the proposed solution is bio-sourced and therefore fits into an approach beyond these objectives.

Concretely, it is a question of developing a thermal energy storage concrete (TESC) by adding to an ordinary concrete composite lightweight aggregates (cLWA), made up of LWA impregnated with a low cost biosourced PCM. Three types of mineral LWA were used (bentonite, sepiolite and silica gel), as well as two impregnation methods, namely direct impregnation and vacuum impregnation. The selected PCM is a vegetable oil, whose phase change is located around 23-26 °C. The microstructure and morphology of the cLWA were analyzed by SEM, while the chemical compatibility was determined with FTIR. TESC were prepared either by simple addition or by replacing a base component (sand or gravel) with cLWA. The thermo-physical properties of PCM and cLWA were obtained using DSC, while the thermal characteristics of TESC were evaluated with the so-called hot guarded plate experimental setup. The best impregnation rates were obtained with silica gel, but mechanical tests showed that sepiolite should be preferred. Despite a loss of mechanical strength, it is shown that TESC with a compressive strength greater than 7-10 MPa are feasible. It is also shown that an improvement of 24.4% and greater than 13.5% is achievable for energy storage capacity and thermal conductivity, respectively. Next, the evaluation of the thermal performance of a test cell called TESC- S25-b-Cell designed with lightweight concrete wall panels in which the sand, which represents 25% of the total volume, is replaced by the same volume of cLWA-S. This cell was subjected to the vagaries of climatic variations over a few days at the same time as another cell, of the same dimensions, with ordinary concrete walls called C-R-Cell, for comparison purposes. The measurements concerned the air temperature inside and outside the cells, the temperature of the walls as well as the heat fluxes exchanged at the level of the walls and the quantity of heat absorbed by these walls. Our experiments, carried out mainly in summer, showed an increase in the thermal capacity of the envelope by the addition of PCM, leading to a decrease in the interior temperature of the cells. This effect, which is positive for the thermal comfort of the cells, is accompanied by a reduction in the thickness and therefore the weight of the wall panels compared to ordinary concrete wall panels.

Keywords : composite concrete, thermal energy storage, phase change materials, biosourced materials

ملخص

تركز هذه الأطروحة على الراحة الحرارية للألواح الخرسانية التي تتضمن مواد متغيرة الطور (PCM) إلى جانب الإستجابة لأحد التحديات الرئيسية في مكافحة تغير المناخ، الذي هو استهلاك الطاقة في المباني، فإن الحل المقترح هنا هو ذات مصدر حيوي وبالتالي يشكل جزءاً من نهج يتجاوز هذه الأهداف. بشكل ملموس، يتضمن ذلك تطوير خرسانة تخزين الطاقة الحرارية (TESC) عن طريق الإضافة إلى خرسانة عادية ركام خفيف الوزن (cLW) مكون من LWA المشبعة بمادة PCM ذات تكلفة منخفضة. تم استخدام ثلاثة أنواع من المواد المعدنية LWA (البنطونيت، السيبوللايت والسيليكا) بالإضافة إلى طريقتين للتشريب وهما التشريب المباشر والتشريب بالتفريغ. تم اختيار زيت نباتي كمادة PCM، ويتركز تغيير الطور حول 23-26 درجة مئوية. تم تحليل البنية المجهرية ومورفولوجيا cLWA بواسطة تقنية SEM، بينما تم تحديد التوافق الكيميائي بتقنية FTIR. تم تحضير TESC إما عن طريق إضافة بسيطة أو عن طريق استبدال مكون أساسي (الرمال أو الحصى) بـ cLWA. لزيادة تحسين موثوقية الدراسة، تم الحصول على الخصائص الفيزيائية الحرارية لمادة PCM عن طريق تقنية DSC، بينما تم تقييم الخصائص الحرارية لـ TESC من خلال الجهاز التجريبي المسمى ألواح التسخين المحمية. تم الحصول على أفضل معدلات التشريب باستخدام السيليكا، لكن الاختبارات الميكانيكية أظهرت أن السيبوللايت كان مفضلاً. على الرغم من فقدان القوة الميكانيكية، فقد ثبت أنه يمكن تحقيق TESC ذات قوة ضغط أكبر من 7-10 ميجا باسكال. ويتضح أيضاً أنه يمكن تحقيق تحسن بنسبة 24.4٪ وأكثر من 13.5٪ في سعة تخزين الطاقة والتوصيل الحراري، على التوالي. بعد ذلك، قمنا بتقييم الأداء الحراري لخلية اختبار تسمى TESC-S25-b-Cell مصممة بألواح حائط خرسانية خفيفة الوزن يتم فيها استبدال الرمل، الذي يمثل 25٪ من الحجم الإجمالي، بنفس الحجم من السيبوللايت المشبع بمادة PCM. تتعرض هذه الخلية لتقلبات التغيرات المناخية على مدار عدة أيام في نفس الوقت مع خلية أخرى، من نفس الأبعاد، بجدران خرسانية عادية تسمى C-R-Cell لغرض المقارنة. وركزت القياسات على درجة حرارة الهواء داخل وخارج الخلايا ودرجة حرارة الجدران وكذلك التدفقات الحرارية المتبادلة على مستوى الجدران وكمية الحرارة التي تمتصها هذه الجدران. أظهرت تجاربنا، التي أجريت بشكل رئيسي في فترة الصيف، زيادة في السعة الحرارية للغلاف بعد إضافة مادة PCM، وذلك من خلال تخزين جزء إضافي من الطاقة الشمسية الساقطة، مما يؤدي إلى انخفاض في درجة الحرارة الداخلية للخلايا. هذا التأثير الإيجابي للراحة الحرارية للخلايا، مصحوب بتخفيض في السماكة وبالتالي وزن ألواح الجدران مقارنة بألواح الجدران الخرسانية العادية.

الكلمات المفتاحية : الخرسانة المركبة، تخزين الطاقة الحرارية، مواد تغيير الطور، المواد الحيوية

Table des matières

Remerciements	2
Résumé.....	3
Abstract.....	4
ملخص	5
1 Introduction générale.....	9
2 Revue bibliographique.....	17
2.1 Introduction.....	17
2.2 Notions sur les matériaux à changement de phase.....	17
2.2.1 Rappel des modes de stockage de l'énergie thermique.....	18
2.2.2 Phénomène de changement de phase.....	19
2.2.3 Classification des MCP.....	20
2.2.4 Critères de choix d'un MCP.....	24
2.2.5 Modes d'intégration des MCP dans les matériaux de construction.....	25
2.3 Utilisation passive des MCP dans le secteur du bâtiment.....	29
2.3.1 MCP intégrés dans les murs.....	29
2.3.2 MCP intégrés à la toiture.....	32
2.3.3 MCP intégrés dans les surfaces vitrées.....	32
2.3.4 MCP et produits industriels dérivés pour le bâtiment.....	33
2.3.5 Exemples de maisons intégrant des produits à base de MCP dans leur enveloppe.....	36
2.4 Les agrégats et les ciments/bétons à stockage d'énergie thermique (CLWA et TESC).....	41
2.4.1 Les TESC à base de CLWA à MCP paraffinés.....	41
2.4.2 Les TESC à base de CLWA à MCP biosourcés.....	43
2.4.3 Traitements spécifiques pour l'amélioration des performances thermiques des CLWA.....	46
2.4.4 Investigations expérimentales des propriétés thermiques des TESC: utilisation des cellules-test.....	48
2.4.5 Problématiques et verrous scientifiques.....	52
2.5 Conclusion.....	53
3 Techniques d'imprégnation et caractérisation microscopiques.....	55
3.1 Introduction.....	55
3.2 Matériaux, élaboration et investigations expérimentales.....	55
3.2.1 Matériaux.....	55
3.2.2 Élaboration des composites.....	56
3.3 Résultats et discussion.....	57
3.3.1 La microstructure des LWA et des CLWA.....	57
3.3.2 Analyse de la stabilité chimique (FTIR).....	60
3.3.3 Caractérisation thermique à la DSC.....	63
3.3.4 Imprégnations.....	65
3.4 Conclusion.....	68

4	Élaboration des bétons, tests mécaniques et thermiques.....	71
4.1	Introduction.....	71
4.2	Élaboration des bétons ordinaires.....	73
4.2.1	Formulation.....	73
4.2.2	Critères de résistance, réglementations et normes.....	73
4.2.3	Essais mécaniques d'études (sur les échantillons témoins).....	76
4.3	Élaboration des bétons composites.....	79
4.3.1	Scénarii d'ajouts des MCP composites dans le béton et quantités associées.....	79
4.3.2	Essais mécaniques sur les échantillons composites (TESC).....	85
4.3.3	Impact des cycles thermiques sur la résistance mécanique (Vieillessement).....	88
4.4	Propriétés thermiques.....	90
4.4.1	Chaleur sensible et capacité calorifique spécifique.....	91
4.4.2	Chaleur latente.....	93
4.4.3	Conductivité thermique.....	95
4.5	Conclusions.....	99
5	Étude à l'échelle réelle par le moyen de cellules-test.....	102
5.1	Introduction.....	102
5.2	Démarche expérimentale.....	104
5.2.1	Étapes 1 et 2 : Conception et construction des cellules-test.....	104
5.2.2	Étapes 3 : Assemblage des éléments des cellules-test.....	105
5.2.3	Étape 4 : Campagne de mesure ; instruments utilisés et paramètres étudiés.....	106
5.3	Les cinq Scénarii expérimentaux.....	106
5.3.1	Scénario 01 : Fenêtres fermées toute la journée -- sans isolation.....	108
5.3.2	Scénario 02 : Fenêtres ouvertes toute la journée -- sans isolation.....	110
5.3.3	Scénario 03 : Fenêtres fermées le jour et ouvertes la nuit -- sans isolation.....	112
5.3.4	Scénario 04 : Fenêtres fermées le jour et ouvertes la nuit – isolation intérieure.....	114
5.3.5	Scénario 05 : Fenêtres fermées le jour et ouvertes la nuit – isolation extérieure.....	117
5.3.6	Synthèse.....	120
5.4	Vérification par essais en conditions contrôlées.....	122
5.5	Conclusions.....	124
6	Conclusion générale et perspectives.....	127
6.1	Conclusion générale.....	127
6.2	Perspectives.....	128
7	Références.....	129
8	Liste des figures.....	138
9	Nomenclature.....	140
10	Liste des tableaux.....	142
11	Annexe.....	143

1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1 Introduction générale

Dans la plupart des pays développés et industrialisés, la consommation énergétique est au plus haut niveau ; ce qui a vocation à générer des problématiques d'ordres économique, climatique et environnemental. Les raisons de cette surconsommation sont en toute évidence liées à l'activité humaine, et dues principalement à l'industrialisation effrénée de l'ensemble des secteurs d'activité, jusqu'aux exploitations agricoles, la surproduction de biens destinés à la consommation individuelle, l'accroissement des déplacements tout azimut par des moyens mécaniques voraces en énergie, la recherche d'un confort thermique extrême dans les bâtiments, etc.

En France, ce constat est soutenu par les chiffres du commissariat général au développement durable et ceux du rapport triennal de l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) selon lesquels la consommation finale globale à usage énergétique en France s'est élevée en 2018 à 144 Mtep. Le résidentiel-tertiaire est de plus en plus prédominant : sa part dans la consommation énergétique est passée de 43 % en 1990 à 46 % en 2017. Les consommateurs finaux d'énergie ont dépensé 145 Md€ en 2017. C'est dans le résidentiel-tertiaire que cette dépense est la plus élevée : 46 % des dépenses totales.¹ Les bâtiments construits avant 1974 représentent 60% du parc immobilier français. Ils consomment en moyenne 350 kWh/m²/an dont 4,5 TWh (sur la base de 30 kWh/m²/an) en liaison avec la climatisation et la ventilation des surfaces utilisées. Les experts prédisent une croissance de cette consommation de l'ordre de 20 à 30% tous les cinq ans [1]. Même son de cloche dans les pays en voie de développement ou à faible revenu comme l'Algérie (tels que définis par le PNUD, la Banque mondiale ou le FMI) où le secteur résidentiel est à l'origine de 35% de la consommation d'énergie finale. Là encore, les perspectives de développement du parc de logements conduiront nécessairement à un accroissement exponentiel de la consommation énergétique², car dans le cas de ces pays, un double défi vient complexifier la situation : des besoins primordiaux toujours croissants en matière de logement dans un contexte parallèle de crises climatique et énergétique. Cela oblige une remise en cause fondamentale des manières de produire et de consommer l'énergie.

Le secteur du bâtiment étant l'un des plus grands consommateurs d'énergie, un effort particulier et une politique rigoureuse dans la gestion des ressources énergétiques dans ce secteur sont nécessaires. Cela appelle à l'intégration de bonnes pratiques et à l'application avec sévérité de mesures spécifiques adéquates³, aussi bien dans la phase de conception des nouvelles constructions que lors des opérations de réhabilitation de l'habitat ancien. La réalisation de logements efficaces énergétiquement s'impose ainsi comme une étape inévitable pour prétendre à la maîtrise des consommations énergétiques du secteur résidentiel. En pratique, il faut mettre en place une gestion des bilans énergétiques où

¹Chiffres clés de l'énergie, édition 2019 (DATALAB)

²Selon l'APRUE

³Rapport triennal de l'ADEME : *Perspectives énergétiques mondiales Les politiques d'efficacité énergétique dans le Monde : Ce qui fonctionne et ce qui ne fonctionne pas*. p.3

toutes les formes de consommations des bâtiments sont évaluées. Les solutions à envisager doivent être cherchées en se basant sur de nouveaux mécanismes de financement des bâtiments, la mise en place et l'utilisation efficace de systèmes de climatisation aux performances améliorées, une évolution culturelle, technologique et industrielle dans le domaine de la rénovation et de l'isolation des bâtiments, une facturation intelligente des consommations. Elle doit reposer aussi et surtout sur une amélioration substantielle de la conception architecturale des bâtiments par l'intégration des principes de l'architecture bioclimatique, un concept qui permet de réaliser le meilleur équilibre entre le bâtiment et le climat environnant. L'enjeu principal est d'offrir aux usagers des bâtiments des conditions de confort thermique optimales tout en maintenant au niveau le plus bas les consommations d'énergie. Ces économies sont envisageables en recourant à chaque fois que c'est possible à l'usage de moyens passifs pour climatiser ou chauffer les habitations, tels que le rafraîchissement par ventilation naturelle, l'humidification de l'air, l'utilisation de végétation, de brise soleil ou de matériaux à forte inertie thermique, une bonne isolation thermique, l'effet de serre à travers les parois vitrées, etc, en délaissant les systèmes mécaniques énergivores. À elles seules, il est d'évidence que ces solutions ne suffisent pas toujours pour répondre complètement aux objectifs de confort thermique souhaités tant en saison hivernale comme en été. Des mesures complémentaires doivent suivre comme d'agir sur les caractéristiques intrinsèques des bâtiments, leur inertie thermique ou leur capacité de stockage de chaleur. De nombreuses technologies ont été testées pour gérer au mieux la situation et pour tirer profit des transferts de chaleur intervenant entre les différents compartiments du bâtiment. C'est dans cette optique précisément que s'inscrit l'idée d'utiliser les matériaux à changement de phase (MCP) dans les parois des constructions, une technique qui fait ces dernières années l'objet de très nombreuses études [2]. En effet, ces matériaux ont la capacité de stocker, par chaleur latente, des quantités importantes d'énergie, au moment où elles sont disponibles pour les libérer en différé lors de leur changement de phase. Une opération par laquelle est réalisée une amélioration sensible du confort thermique, qui s'accompagne souvent de la possibilité de diminuer des épaisseurs de parois sans perte d'efficacité énergétique [3]. L'intérêt est également écologique car toute économie réalisée dans les consommations d'énergie fossile signifie une réduction des émissions de gaz néfastes. Sans compter le caractère biosourcé, car bien souvent les matériaux utilisés ont une origine naturelle et non polluante.

Pour la mise en œuvre de cette technique, il existe en pratique deux stratégies : le régime passif ou le mode actif. Dans le premier cas, le MCP n'est qu'un des composants du système global, mais dont les caractéristiques lui permettent de jouer un rôle qui modifie le comportement du système. Dans le second cas, un appareil tiers est impliqué pour forcer l'activation des propriétés des MCP en décidant de l'occurrence des transitions de phase, et ceci dans les deux sens, de solide à liquide ou de liquide à solide.

Dans nos travaux de thèse, nous nous sommes limités aux applications passives, en visant trois objectifs principaux, abondamment traités par ailleurs [4]–[12]: i) améliorer l'isolation

thermique, ii) favoriser l'utilisation du rayonnement solaire ou dans le cas contraire faire entrave à ses inconvénients, iii) augmenter la capacité thermique des constructions et spécialement des enveloppes légères.

Différents matériaux peuvent être utilisés pour construire des enveloppes : ciment, plâtre, mortier de chaux, béton, etc. C'est pourquoi nos premières recherches bibliographiques sont orientées et concentrées tout d'abord et très naturellement sur des études liées à la diversité de ces techniques de construction, et en particulier à celles qui comportent de nouveaux matériaux. Pour ne citer que quelques exemples, il y a les plaques de gypse avec MCP micro-encapsulé (provenant de fabricants ou synthétisés) étudiées par [13]–[15], un mortier géopolymère avec MCP micro-encapsulé [16], des murs thermiques dans [17], [18] des murs de maçonnerie en briques dans [19], et dans [20] un mortier de ciment contenant des billes d'acier remplies de MCP. Cependant, l'application la plus répandue est celle qui implique des mortiers de ciment ou de béton [21]–[43], un matériau qui reste encore largement utilisé en raison de propriétés intéressantes comme la résistance mécanique, la sécurité incendie, sa moulabilité, etc. La principale question à traiter dans les associations du béton avec des candidats MCP est la qualité physicochimique des mélanges et l'intérêt de leurs propriétés. Dans la pratique, il existe trois façons de réaliser ce mélange, à savoir l'incorporation directe, l'immersion et l'encapsulation [5], [44]; ces deux derniers étant les plus utilisés. En effet, l'incorporation directe ou l'immersion du mortier dans du MCP liquide sont des techniques qui ont rapidement montré leurs limites, conduisant ainsi à leur abandon. En revanche, l'incorporation du MCP dans des agrégats légers (LWA), pouvant entrer aisément dans la composition du mortier, ou l'ajout de MCP micro-encapsulé, sont les deux techniques actuellement privilégiées. En complément des dernières références citées, le lecteur intéressé peut se référer à ([12], section 3 pp. 404-405) pour une illustration plus exhaustive. Aussi, [5], [7]–[9] ont présenté un large éventail d'applications de MCP dans des murs simples, murs trombe, panneaux muraux et mortiers, mais également dans les sols et les plafonds. Le cas spécifique de la construction de murs et de panneaux muraux est traité dans [4]; en ce qui concerne les murs et les bétons, une revue très large et détaillée est réalisée dans [6], [10], [11], dans des travaux étroitement liés aux problèmes que nous nous sommes proposés de traiter dans le présent travail.

Le béton, matériau dont l'usage remonte à l'antiquité, est encore très présent à notre époque dans toutes les constructions ; néanmoins ce matériau reste inerte et ses performances thermiques intrinsèques sont limitées. Le recours, comme dans le passé, aux constructions massives en béton pour augmenter leur inertie thermique et leur conférer un minimum de confort, n'est plus envisageable et ne peut constituer une solution pertinente et conforme aux exigences architecturales actuelles, qui demandent davantage de légèreté et de transparence. Bien qu'il reste encore le plus répandu dans le secteur du bâtiment, il fait l'objet ces dernières années d'innovations pour répondre aux nouveaux défis et à des exigences de plus en plus restrictives de la réglementation thermique [3].

La présente recherche s'inscrit dans une démarche globale de maîtrise de l'énergie dans le secteur du bâtiment. Elle a pour but de favoriser l'utilisation des solutions passives pour parvenir à des enveloppes à haute valeur énergétique, en étudiant le cas particulier des constructions à panneaux de béton préfabriqué. L'enjeu principal est d'alléger le béton tout en maintenant ses propriétés thermiques intactes. Cependant, réduire la densité d'un béton implique systématiquement la diminution de sa capacité de stockage thermique. Pour améliorer leur inertie et leur capacité de stockage thermique sans augmentation de leur volume, les parois en béton sont imprégnées de MCP. En plus de réduire les épaisseurs de paroi sans concession en termes de performances, l'incorporation de ces matériaux à changement de phase leur confère en même temps une conductivité thermique plus faible, ce qui réduit les flux échangés au travers de ces parois, améliorant ainsi leur pouvoir isolant [21]. En effet leur présence dans le béton, sous forme encapsulés ou dans des LWA, permet d'augmenter la quantité de chaleur totale stockée dans les parois, car à la chaleur sensible vient s'ajouter une quantité importante de chaleur emmagasinée dans les MCP sous forme latente. Cette capacité de stockage renforcée sensiblement dote la structure du bâtiment d'une faculté d'autorégulation thermique à moindre coût tout le long de l'année [3].

Concrètement et dans un premier temps, cette étude ambitionne d'investiguer les meilleurs moyens d'insertion des MCP dans l'enveloppe des bâtiments en béton préfabriqué à l'effet d'améliorer leur qualité thermique et de réduire leur épaisseur et poids. Par la suite, avec l'essai d'un large choix de MCP-composites performants et de faibles coûts et à travers une approche expérimentale basée sur des essais de caractérisation en conjugaison avec des travaux de terrain, l'ambition est d'aboutir à un mur en béton préfabriqué en parfaite adéquation avec le climat local et des parois alliant légèreté, qualité thermique et esthétique architecturale.

Les travaux de cette thèse reposent dans une première phase sur une étude bibliographique que nous avons voulue la plus large possible, en consultant un grand nombre d'articles et les principaux travaux consacrés à l'utilisation des MCP dans les constructions. Nous avons accordé cependant une priorité aux publications se rapportant aux murs en béton, en nous intéressant en particulier aux techniques d'insertion des MCP dans les enveloppes des bâtiments.

Cette première étape était primordiale car, elle nous a servi de guide dans la découverte de ces matériaux et nous a permis d'établir sur des critères objectifs un classement de ces matériaux à changement de phase et des matrices minérales devant les contenir en nous appuyant sur leurs caractéristiques thermophysiques et chimiques. Par rapport à leur large disponibilité et leur coût très raisonnable, nous avons choisi d'utiliser pour la réalisation de notre projet de recherche, les graisses végétales comme MCP, en optant pour le gel de silice, la bentonite et la sépiolite comme matrices, et ce pour les mêmes raisons de coût et disponibilité.

Par la suite, ces mélanges sont testés successivement à travers une série de mesures expérimentales conduites suivant une approche globale multi-échelles :

- La première approche à l'échelle microscopique est dédiée à l'étude des performances énergétiques des MCP isolés, des matrices puis des MCP dans leur matrice. Les caractéristiques thermiques, chaleur latente et température de changement de phase, sont déterminées par la méthode de la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) ; la stabilité chimique, la structure et la morphologie microscopiques sont analysées respectivement au moyen de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et de la microscopie électronique à balayage (MEB).

- Une seconde approche à l'échelle mésoscopique est consacrée à l'évaluation des taux d'imprégnation des matrices par les MCP sous conditions normales puis sous vide.

Des essais mécaniques sont ensuite effectués pour déterminer la résistance à la compression et à la flexion sur des échantillons de béton imprégnés de MCP, à différents dosages en MCP-composite et suivant trois méthodes d'ajout (ajout simple, par substitution de sable et par substitution de granulats).

Les résultats trouvés lors de cette première étape ont servi de critère à la sélection dans un premier temps du meilleur candidat composite, en se basant sur le niveau conjugué de ses performances et caractéristiques thermique, chimique et mécanique. Le meilleur composite est celui qui, tout en gardant une résistance mécanique acceptable et en demeurant stable chimiquement, est le plus apte à se charger en graisse végétale. C'est seulement le composite sélectionné à cette étape qui sera soumis à l'investigation expérimentale de ses performances énergétiques (conductivité thermique, chaleur spécifique et capacité de stockage thermique sous forme sensible et latente) au moyen de la méthode des plaques chaudes gardées.

- Une troisième et dernière approche à l'échelle macroscopique concerne l'étude des performances thermiques d'une cellule-test, conçue avec des panneaux muraux légers contenant des MCP, lorsqu'elle est soumise à des variations climatiques réelles. La comparaison par rapport à une cellule-test ne contenant pas de MCP permet de constater et quantifier l'apport énergétique des MCP et leur contribution à l'amélioration du confort thermique dans la cellule. Cette étude expérimentale est menée par le biais de mesures de températures et de flux de chaleur sur et à travers l'enveloppe, avec une attention particulière portée à la valeur de la température interne des cellules, un paramètre qui revêt une importance particulière pour caractériser le niveau du confort thermique des cellules.

La rédaction de cette thèse est subdivisée, en plus de l'introduction et conclusion générales, en quatre chapitres dont le premier est consacré à la revue bibliographique sur la problématique de l'utilisation des MCP dans le secteur du bâtiment, notamment lorsqu'ils sont incorporés dans le béton. Le second chapitre est consacré à la présentation des techniques d'imprégnation des matrices minérales dans le MCP liquide, à la description des trois opérations de caractérisation microscopique (DSC, FTIR et MEB) et à la présentation des

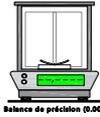
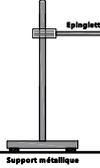
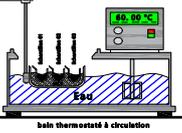
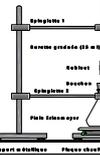
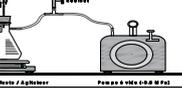
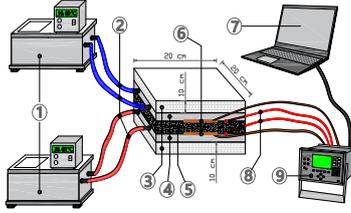
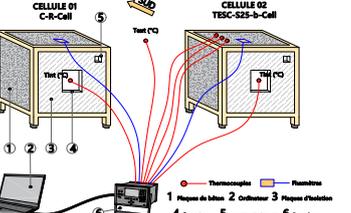
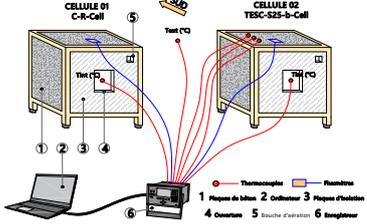
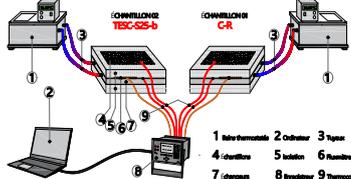
résultats de ces études. Le troisième chapitre est dédié à la présentation de la méthode d'élaboration des bétons de référence et composites, de l'analyse des textes de lois et de la réglementation en vigueur définissant les critères de résistance des bétons, des trois scénarii d'ajout de MCP composite dans le béton pour l'élaboration des bétons composites, des essais de résistance mécanique à la compression et à la flexion et enfin des tests de vieillissement accélérés en chambre climatique et sous conditions climatiques réelles. Le but de cette dernière opération étant d'appréhender l'effet des changements de phase répétés dans le temps sur le comportement mécanique du béton composite. Ce chapitre comporte également un paragraphe réservé à la caractérisation thermique (conductivité thermique, capacité de stockage thermique et chaleur spécifique) de morceaux de béton composite. Le quatrième et dernier chapitre concerne l'étude à l'échelle macro et résume les résultats des scénarii de mesures thermiques réalisées sur les deux cellules-test. Une conclusion générale est développée pour résumer les principaux résultats et faire des propositions sur les perspectives de poursuite de ces travaux de thèse.

Le [Tableau 1](#) résume toute l'approche expérimentale et les outils utilisés pour réaliser les différentes échelles d'expérimentation.

Ce travail est mené dans le cadre d'une cotutelle entre l'université Mohamed Khider de Biskra (UMKB) et l'université de Pau et des pays de l'Adour (UPPA). Elle est effectuée au sein du Laboratoire de Thermique Énergétique et Procédés, LaTEP de l'Ecole Nationale Supérieure du Génie des Techniques Industrielles (ENSGTI) de l'UPPA et le Laboratoire de Conception et de Modélisation des Formes Architecturales et Urbaines (LaCoMoFA) de l'UMKB en collaboration avec le Laboratoire de Mécanique, Structure et Énergétique de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO).

Tableau 1. Nomenclature des expériences réalisées et les matériaux/types d'échantillons utilisés

	TEST	MATERIAU	ÉCHANTILLON	RÉF	ILLUSTRATION
1	DSC	<ul style="list-style-type: none"> - cLWA-S, cLWA-SG et cLWA-B - GV 23-26 	<ul style="list-style-type: none"> - Poudre - Gouttelette 	4.3.3	
	FTIR	<ul style="list-style-type: none"> - S, SG et B - cLWA-S, cLWA-SG et cLWA-B - GV 23-26 	<ul style="list-style-type: none"> - Poudre - Poudre - Gouttelette solidifiée 	4.3.2	
	MEB	<ul style="list-style-type: none"> - S, SG et B - cLWA-S, cLWA-SG et cLWA-B - TESC-S, TESC-SG et TESC-B 	<ul style="list-style-type: none"> - Poudre - Poudre - Morceau aléatoire 	4.3.1	

2	Imprégnation normale	- S, SG et B - GV 23-26	- Grains/poudres - Liquide	4.2.2.1 4.3.4				
	Imprégnation sous vide	- S, SG et B - GV 23-26	- Grains/poudres - Liquide					
3	Résistance à la compression	- C-R, TESC-S, TESC-SG et TESC-B	- Cubes de 10x10x10 cm ³	3.3				
	Résistance à la flexion	- C-R, TESC-S, TESC-SG et TESC-B	- Prismes de 28x7x7 cm ³					
4	Vieillessement / compression	- TESC-S25-b	- Cubes de 10x10x10 cm ³	3.3.2.1				
5	Stockage thermique	- C-R et TESC-S25-b	- Plaques de 25x25x3 cm ³	4.3.5				
	Conductivité thermique	- C-R et TESC-S25-b	- Plaques de 25x25x3 cm ³					
6	Confort thermique /Cellules	- C-R et TESC-S25-b	- Cellules de 87 cm de cotés comportant des panneaux de 77 cm de côtés	5.3				
	Confort thermique / conditions contrôlées	- C-R et TESC-S25-b	- Plaques de 25x25x3 cm ³		5.4			

S : Sépiolite / B : Bentonite / SG : Gel de silice / cLWA : Agrégats à stockage d'énergie thermique / TESC : Béton à stockage d'énergie thermique / C-R : Béton de référence / GV 23-26 : Graisse végétale (MCP) / S25-b : Substitution du sable par le cLWA-S à hauteur de 25 % du volume total.

2

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2 Revue bibliographique

2.1 Introduction

La recherche du confort thermique dans le bâtiment ne doit en aucun cas se faire au détriment des objectifs d'efficacité énergétique. Pour cela, la conception architecturale des bâtiments et surtout la composition de leur enveloppe sont déterminantes, et bien souvent des parois à forte inertie thermique ou dotées d'une isolation thermique performante sont proposées. Ce chapitre présente un état de l'art général sur l'utilisation des MCP dans les enveloppes des bâtiments, et leur insertion dans la composition des bétons qui a pour but de doper les performances énergétiques des parois, tout en contribuant à leur esthétique et à la réduction de leur poids.

Dans la première partie de ce chapitre, le premier point développé se focalise sur les deux principaux modes de stockage de l'énergie thermique, avec l'objectif de mettre en évidence, l'intérêt du stockage de chaleur sous forme latente par comparaison au stockage de chaleur sensible. Puis sont succinctement présentés et discutés, la classification des MCP, les critères de sélection et les modes d'encapsulation. Par la suite, quelques exemples choisis dans la littérature concernant le concept de l'utilisation passive des MCP dans l'enveloppe des bâtiments et aux travaux intégrant des MCP composites dans une matrice en béton en priorité dans les applications murales. D'autres exemples de maisons déjà existantes intégrant des produits industriels à base de MCP, sont présentés dans la seconde partie de ce chapitre.

Compte tenu du champ spécifique de nos travaux de recherche, une attention particulière sera accordée le long de ce chapitre à la méthode d'imprégnation des agrégats légers par des MCP (cLWA) et les ciments/bétons à stockage d'énergie thermique (TESC). Puis, le souci d'éprouver l'efficacité des MCP nous amène à exposer et à étudier quelques-uns des traitements particuliers mis en œuvre pour l'amélioration des performances thermiques des MCP comme leur capacité de stockage et leur conductivité thermique. Les investigations expérimentales sur les propriétés thermiques des TESC par le système des plaques chaudes gardées ou des cellules test seront présentées. Le dernier point est consacré aux problématiques et verrous scientifiques du traitement du sujet de ce sujet d'études.

2.2 Notions sur les matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase (MCP) dans les bâtiments ont pour but de stocker et de déstocker de l'énergie en fonction des besoins de chauffage et/ou de rafraîchissement. Dans la pratique, l'intégration de MCP dans les enveloppes légères permet de leur attribuer une inertie identique à celle des parois lourdes. À titre d'exemple, selon le fabricant BASF-Micronal, une paroi contenant 2 cm de MCP fabriqué par BASF a la même performance en termes d'inertie thermique qu'une brique de 36 cm d'épaisseur ou un mur en béton de 24 cm d'épaisseur ou du bois massif de 38 cm d'épaisseur [45].

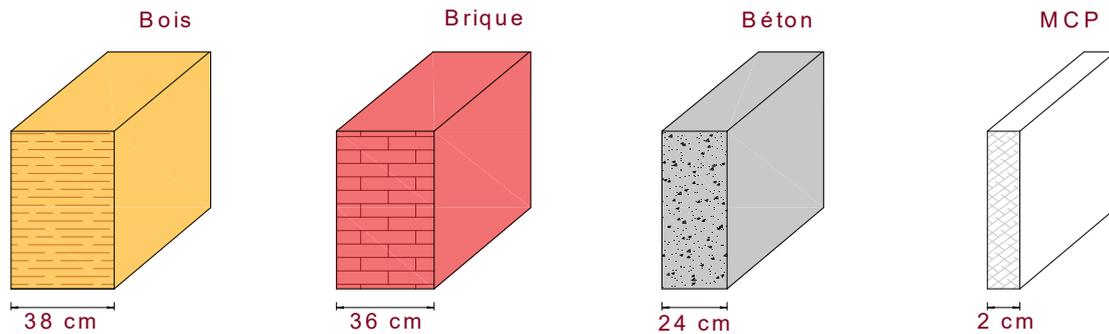


Figure 1. Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau d'après [45]

2.2.1 Rappel des modes de stockage de l'énergie thermique

Il existe de nombreux avantages à stocker l'énergie thermique, dont principalement pallier à l'inadéquation entre la disponibilité de l'énergie et la demande, et rendre par exemple disponible en période hivernale l'énergie solaire diurne après le coucher du soleil. Tout matériau est naturellement stockeur d'énergie thermique dès que la température de son environnement grimpe au-dessus de sa propre température de changement d'état. Dans le bâtiment, le stockage d'énergie dans les MCP permet de mettre à profit le comportement énergétique des matériaux lors du changement d'état solide à liquide et inversement de liquide à solide ; les autres changements d'état présentent un intérêt moins compatible avec le cadre de l'habitat et du bâtiment [46].

Les modes de stockage d'énergie thermique les plus importants sont soit de nature sensible ou bien de nature latente.

2.2.1.1 Chaleur sensible

Le stockage d'énergie thermique sous forme sensible consiste à accumuler de la chaleur consécutivement au changement de température du matériau stockeur. Dans ce mode de stockage, le changement d'état est exclu. Ses principaux avantages sont un faible coût et une simplicité d'application. Cependant, sa faible densité énergétique implique des volumes non négligeables, ce qui représente un grand désavantage compte tenu des modes contemporains de production architecturale, qui favorisent davantage la légèreté et la transparence des enveloppes. Ce type de stockage est utilisé depuis longtemps dans le domaine du bâtiment : l'utilisation des murs épais en pierre pour améliorer le confort intérieur constitue un bon exemple [47]. La quantité d'énergie stockée par chaleur sensible dépend de la masse de matériau, de sa capacité thermique massique et du différentiel de température [46].

2.2.1.2 Chaleur latente

Les systèmes de stockage latent se basent sur les phénomènes énergétiques survenant lors du changement d'état du matériau stockeur (MCP). Lors de la solidification, les MCP dégagent une quantité importante de chaleur, inversement, la même quantité de chaleur est absorbée [47] pendant leur fusion. Le principal intérêt de la chaleur latente par rapport à la chaleur sensible est sa densité volumique : la quantité d'énergie stockable dans le même

volume de matière est beaucoup plus grande. Pour la même variation de température englobant l'intervalle de fusion/solidification du MCP, un matériau type maçonnerie imprégné d'un MCP pur performant [46] permet de stocker en chaleur latente jusqu'à 15 fois plus d'énergie qu'en chaleur sensible.

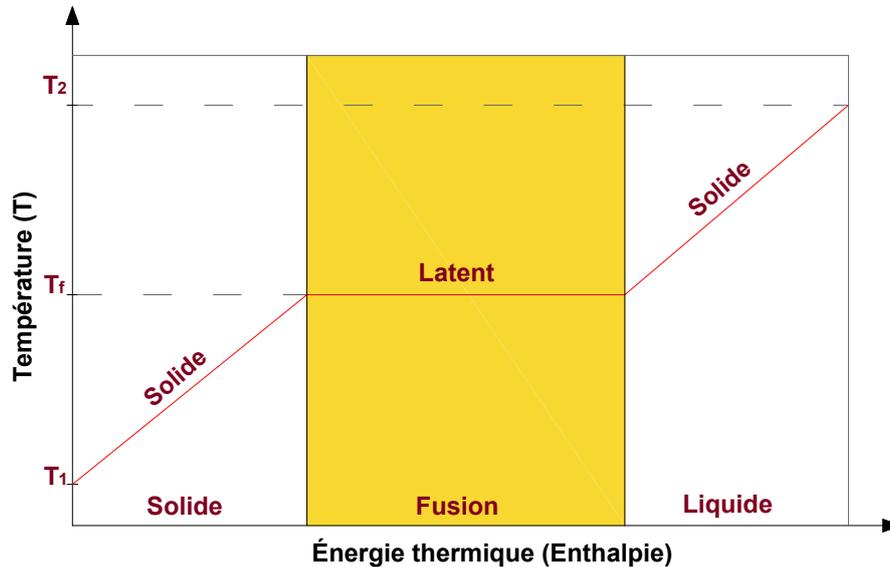


Figure 2. La relation de la température et de l'énergie thermique

2.2.2 Phénomène de changement de phase

Afin de réduire les consommations énergétiques et les émissions de CO₂, de nombreux pays ont adopté des politiques d'efficacité énergétique dans l'ensemble des secteurs d'activité et se sont tournés vers des sources d'énergies renouvelables et moins polluantes. Comme nous l'avons rappelé dans les paragraphes précédents, le résidentiel-tertiaire représente le secteur dont la consommation d'énergie finale est la plus importante, donc la plus coûteuse. Ainsi la réduction des consommations énergétiques dans le secteur du bâtiment devient une priorité et s'avère comme une des clés la plus prometteuse dans toute politique consacrée aux économies d'énergie et dans cette lutte menée dans le Monde pour la rationalisation des consommations d'énergie.

La tendance actuelle est à la réduction du poids des constructions ; ce qui permet grâce à leur faible inertie, une réduction des consommations de chauffage en hiver. Cependant leur principal inconvénient est le problème de surchauffe en été, dégradant ainsi les conditions de confort thermique. Pour le type de constructions modernes à basse consommation d'énergie, le stockage d'énergie par chaleur latente s'impose comme une bonne solution avec des avantages démontrés à l'échelle des études expérimentales. Intégrés dans les enveloppes des bâtiments dès la conception ou en rénovation, les MCP ont prouvé leur efficacité et leur rôle de bons candidats dans le cadre de l'amélioration du confort thermique d'été et dans la réduction de la consommation d'énergie des bâtiments. Beaucoup d'études ont été menées ces dernières années sur les MCP, notamment pour l'identification de leurs caractéristiques thermophysiques et leur effet quand ils sont incorporés dans une enveloppe en béton ou en plâtre.

La *Figure 3* montre le principe de base du stockage d'énergie dans les MCP. Lorsque la température augmente, l'énergie thermique est stockée dans les MCP principalement sous forme sensible. Au-delà du point de fusion, la transition de phase solide-liquide se produit dans les MCP. Durant cette étape, la température augmente beaucoup plus lentement et l'énergie thermique est stockée principalement sous forme latente. Lorsque les MCP sont entièrement fondus, la chaleur sensible devient de nouveau la principale forme de stockage d'énergie. Ce processus de stockage d'énergie est répétable et réversible. Les MCP ont toujours une chaleur latente élevée, ce qui en fait des matériaux capables d'absorber ou libérer pendant le processus de changement de phase une grande quantité d'énergie avec une faible variation de température, présentant ainsi une bonne commodité d'utilisation et une large variété d'applications [48].

PRINCIPE DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE

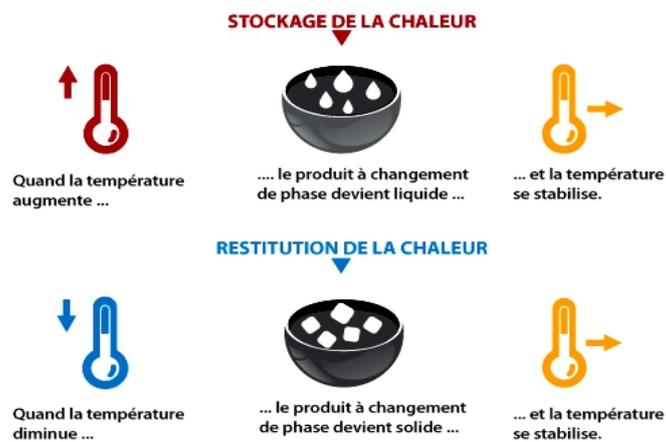


Figure 3. Principe schématique du changement de phase des matériaux (INERTEK)

2.2.3 Classification des MCP

Plusieurs critères existent pour la classification des MCP en fonction de leur composition chimique, de leur température de fusion, de leur chaleur latente de fusion, etc. Comme le montre la *Figure 4*, la catégorisation la plus fréquente les divise en trois groupes: organiques, inorganiques et eutectiques [49]. En fait, ces dernières matières sont des mélanges des deux premières catégories mais il est désormais courant de les considérer comme un groupe spécifique.

Publiées par plusieurs auteurs [44], [51], des études impliquant un grand nombre de matériaux, présentent une comparaison des avantages et inconvénients des matériaux organiques et inorganiques utilisés comme MCP à des fins de stockage d'énergie thermique. Il s'agit principalement de sels hydratés, de cires de paraffine, d'acides gras et d'eutectiques de composés organiques et non organiques. La *Figure 5* [44] illustre une classification de ces MCP en fonction de la plage de température de fusion et de la valeur de l'enthalpie de fusion. Par ailleurs, une liste non exhaustive de MCP disponibles dans le commerce est rapportée dans [44], [52]–[54].

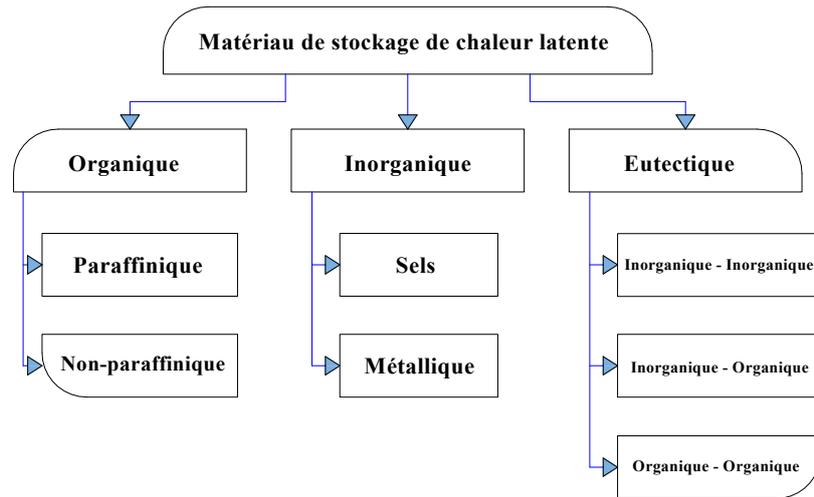


Figure 4. Classification des matériaux à changement de phase [50]

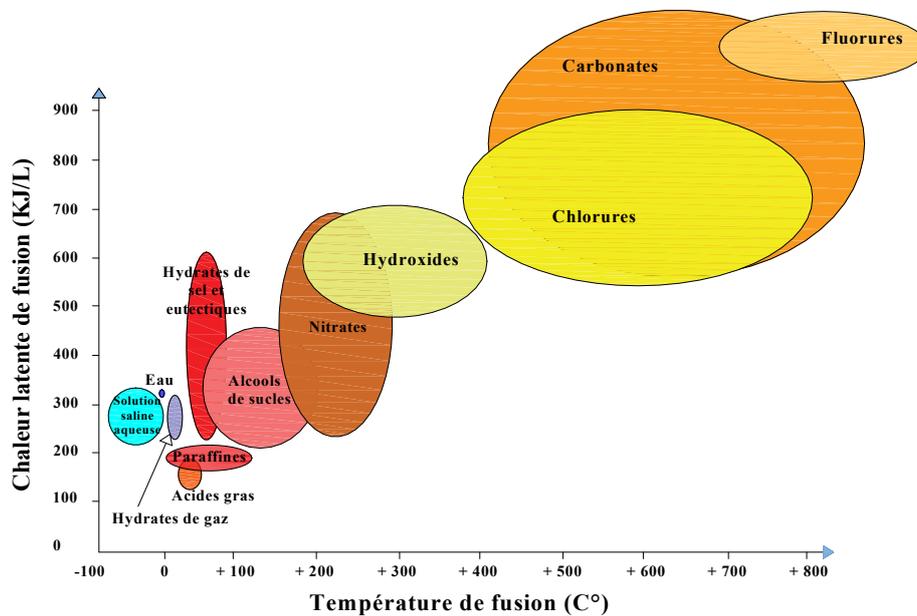


Figure 5. Classes de matériaux pouvant être utilisés comme MCP en fonction de leur plage de température et d'enthalpie de fusion [44]

2.2.3.1 MCP organiques

a. Paraffinés

Les paraffines sont une famille d'hydrocarbures saturés de formule brute C_nH_{2n+2} , aux propriétés très similaires. Parmi les MCP solide-liquide, ce sont les plus utilisées, surtout pour les applications à basse température (de -10 à 100 °C) car les paraffines offrent l'avantage d'une chaleur latente dépendante de la masse molaire et des températures de changement de phase, donnant ainsi de la flexibilité dans le choix du MCP le plus approprié à une application donnée. Dans cette catégorie, on peut citer notamment les paraffines n-Hexadecane ($T_{\text{fusion}} = 22 \text{ °C}$), n-Nonacosane ($T_{\text{fusion}} = 63,4 \text{ °C}$) ou encore le n-Triacontane ($T_{\text{fusion}} = 65,4 \text{ °C}$). Le Tableau 1 résume les avantages et les inconvénients des MCP paraffinés.

Tableau 2. Avantages et inconvénients des MCP paraffinés

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Plus la longueur moyenne de la chaîne hydrocarbonée est élevée, plus la température de fusion et la chaleur latente sont élevées ; - Les paraffines ne montrent pas de tendance à la ségrégation des phases lors de leur transition et sont chimiquement stables ; - Elles ont une faible pression de vapeur saturante, ce qui limite les risques de vaporisation ; - Certaines sont considérées comme non toxiques, inoffensives écologiquement et compatibles avec les réservoirs métalliques car elles ne provoquent pas ou peu de corrosion ; - Facilement disponibles et peu coûteuses. 	<ul style="list-style-type: none"> - Leur conductivité thermique reste très faible ($\approx 0,25$ W/m.K) ; - Elles présentent une expansion volumique assez élevée (≈ 15 %) ; - Une densité peu importante (≈ 800 kg/m³) ; - Les paraffines ont tendance à s'infiltrer dans certains plastiques et à les ramollir.

b. Non paraffinés

- **Les acides gras** : caractérisés par la formule chimique $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$, ils ont à peu près les mêmes propriétés thermophysiques que les paraffines. L'intérêt d'utiliser les acides gras comme MCP est de couvrir une gamme de température allant de 40 à 150 °C selon la longueur de la chaîne carbonée. Les acides gras les plus connus pour leur utilisation comme MCP sont l'acide stéarique ($T_{\text{fusion}} = 57.5$ °C), l'acide sébacique ($T_{\text{fusion}} = 132$ °C), l'acide palmitique ($T_{\text{fusion}} = 61-63$ °C) et l'acide myristique ($T_{\text{fusion}} = 51.5-53.6$ °C).

- **Les alcools de sucre** : ce sont des composés organiques appartenant à la famille des polyols. Les plus connus sont le sorbitol, le mannitol, le xylitol, le lactitol, le malitol et l'érythritol. Ces produits sont extraits des plantes et peuvent être qualifiés de biosourcés. Par exemple, le mannitol provient des algues alors que le sorbitol est extrait du sirop de maïs [51]. Les principaux avantages et inconvénients des MCP non paraffinés sont résumés dans le [Tableau 3](#).

Tableau 3. Avantages et inconvénients des MCP non paraffinés (Acides gras et Alcools de sucre)

	Avantages	Inconvénients
Acides gras	<ul style="list-style-type: none"> - Plus le nombre d'atomes de carbone dans leur chaîne carbonée est élevée, plus la température de fusion, la chaleur latente ainsi que le degré de cristallisation sont élevés ; - Les acides gras présentent une chaleur latente de fusion du même ordre que celle des paraffines (ou légèrement en-dessous) et un comportement similaire lors de la transition de phase, avec pas ou très peu de surfusion et une variation de volume du même ordre de grandeur ; - Les eutectiques d'acides gras permettent de diversifier les intervalles de température des matériaux et ainsi d'élargir la gamme des applications ; - Les acides gras sont facilement produits à partir d'huiles végétales et animales, d'où l'assurance d'un approvisionnement continu et biosourcé. 	<ul style="list-style-type: none"> - Quelques auteurs constatent un problème de stabilité des acides gras au-dessus du point de fusion. Cette dégradation peut être cependant due à la vaporisation du produit lorsqu'il est sous forme liquide et non à une réelle dégradation du produit.

Alcools de sucre

- Les alcools de sucre possèdent des valeurs d'enthalpie de changement de phase élevées ;
- Ils présentent une grande masse volumique de l'ordre de 1500 kg/m³, ce qui conduit à une densité énergétique très élevée ;
- Des produits peu coûteux et non toxiques.
- Ils présentent une surfusion.
- Certains alcools de sucre présentent des problèmes de compatibilité avec l'air ambiant car réagissant avec l'oxygène.

2.2.3.2 MCP inorganiques

Les matériaux inorganiques sont classés en trois catégories : les sels, les hydrates de sels et les métaux. Les sels sont des composés ioniques neutres formés à partir de cations et d'anions. Les sels purs et les mélanges de sels non eutectiques présentent généralement un large spectre de température de fusion et une chaleur latente variant selon leur type. Les sels les plus connus sont les nitrates comme le NaNO₃ (T_{fusion} = 307 °C), le KNO₃ (T_{fusion} = 333 °C) ou encore le LiNO₃ (T_{fusion} = 250 °C) [9].

Les hydrates de sels, de formule générale AB·nH₂O, peuvent être considérés comme des alliages de sels minéraux et d'eau formant un cristallin typique solide. Le sel hydraté le plus utilisé pour son faible coût est le CaCl₂·6H₂O (T_{fusion} = 28-30 °C). On peut citer aussi le Mn(NO₃)₂·6H₂O pour les applications de climatisation. Certains métaux sont utilisés comme MCP, on peut citer notamment le Potassium (T_{fusion} = 63.2 °C), le Bi₅₈Sn₄₂ (T_{fusion} = 138 °C) ou encore le Lithium (T_{fusion} = 186 °C).

Les principaux avantages et inconvénients de ces matériaux sont consignés dans le [Tableau 4](#) :

Tableau 4. Avantages et inconvénients des MCP inorganiques (Sels, hydrates de sels et métaux)

	Avantages	Inconvénients
Sels	<ul style="list-style-type: none"> - Ces matériaux sont très intéressants pour leur utilisation dans le stockage thermique à haute température, car ils possèdent une température de fusion entre 250 et 1680 °C ; - Des chaleurs latentes de fusion entre 68 et 1040 kJ/kg ; - Ils présentent une expansion volumique beaucoup plus faible que les composés organiques (de l'ordre de 7 %) ; - Leur coût relativement faible devant les composés organiques. 	<ul style="list-style-type: none"> - Certains sels peuvent présenter un peu de surfusion ; - Aptitude à corroder les métaux, ce qui rend la conception des réservoirs de stockage plus compliquée. - Parfois oxydants puissants donc incompatibles avec les huiles thermiques ; - Certains sels présentent des problèmes de stabilité thermique et leurs propriétés peuvent s'altérer avec le temps.

Hydrates de sels	<ul style="list-style-type: none"> - Les hydrates de sels sont appropriés pour leur utilisation dans le stockage thermique parce qu'ils possèdent une grande chaleur latente ($\approx 100-300$ kJ/kg) ; - Une température de fusion adaptée aux applications à basse température ($\approx 8-100$ °C) et largement compétitifs en termes de coût et de rentabilité ; - Ils présentent une conductivité thermique plus élevée que les paraffines (environ $0,5$ W/m.K). 	<ul style="list-style-type: none"> - Leur fusion est non congruente, ce qui veut dire que le sel n'est pas totalement soluble dans l'eau d'hydratation au niveau du point de fusion ; - Fréquente surfusion. - Problèmes de corrosion des structures métalliques des systèmes de stockage.
Métaux	<ul style="list-style-type: none"> - Conductivité thermique bien plus élevée que les autres types de MCP ; - Chaleur latente très élevée ; - Stabilité à long terme ; - Un stockage rapide de la chaleur avec une faible expansion volumique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne sont pas encore sérieusement envisagés pour une application industrielle en raison de la contrainte de masse. - Présentent des problèmes de corrosion.

2.2.3.3 MCP eutectiques

Les MCP eutectiques, constitués de mélanges de deux ou plusieurs substances, se comportent comme un corps pur, c'est-à-dire que leur température de changement d'état est unique. En général, les eutectiques sont une combinaison de matériaux organiques et inorganiques.

On peut citer les eutectiques de nitrates tel que $\text{LiNO}_3\text{-NH}_4\text{NO}_3\text{-NaNO}_3$ avec une composition massique de 25%-65%-10% ($T_{\text{fusion}} = 80.5^\circ\text{C}$) ou encore les eutectiques d'organiques tel que $\text{CH}_3\text{CONH}_2\text{-C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ avec une composition massique de 50%-50% ($T_{\text{fusion}} = 65^\circ\text{C}$). Il y a également les eutectiques d'hydrates de sels comme le mélange isomassique $\text{Mg}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}\text{-MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($T_{\text{fusion}} = 59.1^\circ\text{C}$) et enfin les eutectiques de polyols comme le mélange à 25 % molaire d'érythritol et 75% de xylitol, ($T_{\text{fusion}} = 85^\circ\text{C}$).

Tableau 5. Avantages et inconvénients des MCP eutectiques

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Leur changement de phase se fait sur une plage de température restreinte comparable à celle des corps purs ; - Leur chaleur latente est supérieure à celle des composés purs ; - Ils ne présentent pas de ségrégation de phase contrairement aux hydrates de sels. 	<ul style="list-style-type: none"> - L'inconvénient majeur de ce type de mélange est la détermination du point eutectique exact afin d'avoir une température de fusion unique, comme pour un corps pur.

2.2.4 Critères de choix d'un MCP

La température de changement de phase ainsi que la plage de fusion restent les critères essentiels dans le choix du type des MCP à utiliser, et cela en fonction de l'application souhaitée (bâtiment, nucléaire, transport, alimentaire, textile, etc.). D'autre part, il est souhaitable que ces matériaux présentent la plus grande chaleur latente de fusion. D'autres critères secondaires mais quelques fois décisifs rentrent en ligne de compte [55], [56]:

Tableau 6. Critères de choix d'un MCP selon ses propriétés

Propriétés	Critères de choix
Thermique	<ul style="list-style-type: none"> - La température de changement de phase doit correspondre au domaine d'application (Entre 18 et 28 °C pour le bâtiment) ; - Une chaleur latente de transition assez élevée ; - Une grande conductivité thermique facilite et accélère les cycles de charge et décharge. - Une densité importante du corps permettra un volume de stockage très faible et donc un réservoir de stockage à dimension modérée ;
Physique	<ul style="list-style-type: none"> - Pour réduire les contraintes mécaniques dans le conteneur, la tension en vapeur doit être minimale et l'expansion volumique faible ; - Une stabilité des phases favorable pour le stockage/déstockage de la chaleur.
Cinétique	<ul style="list-style-type: none"> - La surfusion doit être réduite. Le recours à l'utilisation d'additif est nécessaire ; - Un taux de cristallisation important.
Chimique	<ul style="list-style-type: none"> - Une stabilité chimique à long terme des cycles de fusion/solidification ; - La compatibilité avec les matériaux de construction ; - L'étude de la dangerosité du produit (toxicité, inflammabilité, explosion,) passant par le respect des réglementations et normalisations en vigueur. La dangerosité du produit doit être minimisée ; - Recyclable.
Économique	<ul style="list-style-type: none"> - Le coût est un critère également très important. Celui-ci sera différent selon les utilisations. Par exemple, les utilisations domestiques demandent quelques kilogrammes alors que les utilisations industrielles quelques tonnes. - Disponible en grande quantité.
Technologique	<ul style="list-style-type: none"> - La fiabilité des matériels de confinement passe par une compatibilité avec les matériaux du conteneur.

2.2.5 Modes d'intégration des MCP dans les matériaux de construction

Les MCP encapsulés sont généralement préparés à l'aide de techniques industrielles. Les capsules sont le plus souvent fabriquées à partir de matériaux inertes (polymère naturel ou synthétique), ce qui leur évite d'interagir chimiquement avec les matériaux avec lesquels elles sont en contact (MCP ou matrice). En plus d'avoir une conductivité thermique suffisamment élevée pour permettre la fusion optimale du MCP, ces capsules doivent rester solides pour résister au processus de mélange. Il existe deux types d'encapsulation, à savoir la microencapsulation et la macroencapsulation. Cependant, il est fréquent de trouver dans certains travaux de recherche un mix entre la microencapsulation et la macroencapsulation de MCP [57]–[60].

2.2.5.1 La microencapsulation

La microencapsulation désigne l'action d'enfermer des microparticules de MCP dans des microcapsules de taille ne dépassant pas 1000 µm [44], [61]. Cette technique permet en théorie d'éviter toute fuite de MCP lors de leur fusion. Elle garantit également la fusion d'une grande quantité de MCP (et donc le stockage d'une plus grande quantité d'énergie) grâce à sa plus surface d'échange plus importante avec la matrice. Contrairement aux méthodes directes, cette technique présente une meilleure stabilité chimique car le MCP et la matrice sont strictement séparés. D'innombrables travaux de recherche ont été menés ces dernières années en intégrant des MCP microencapsulés dans des matériaux de construction [31], [39], [62], [62]–[69].



Figure 6. Image montrant des microcapsules de MCP (BASF)

2.2.5.2 La macroencapsulation

La macroencapsulation correspond à l'inclusion du MCP dans une forme d'emballage ou de conteneur de formes diverses (Figure 7) ou tout autre contenant comme des matériaux poreux ou des panneaux. La taille de ces matériaux est généralement supérieure à 1 cm de diamètre [44]. Ces conteneurs peuvent être utilisés directement comme échangeurs de chaleur ou être incorporés dans des produits de construction [44]. La macroencapsulation améliore également la compatibilité des matériaux avec l'environnement, grâce au revêtement qui forme une barrière, augmente la maniabilité du MCP et réduit les changements de volume externes préjudiciable à la stabilité physique du matériau [44], [58].

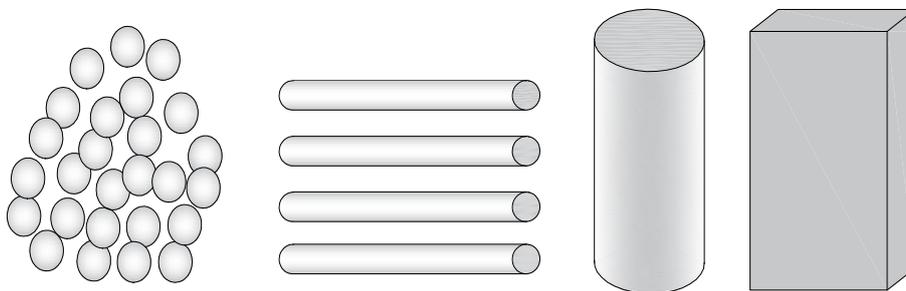


Figure 7. Différentes géométries de macroencapsulation de MCP : sphérique, tubulaire, cylindrique et rectangulaire (de gauche à droite) d'après [70]

En général les containers utilisés pour l'encapsulation sont choisis sur la base d'une bonne conductivité thermique, d'une grande résistance et flexibilité ; ils doivent être stables chimiquement et physiquement, non toxiques, non corrosifs et résistants au feu [54]. Parmi

de nombreux travaux existants sur cette question, ceux de Vicente, 2014 [58] qui a réalisé une campagne d'essais expérimentaux sur des murs en maçonnerie de briques chargés de MCP macroencapsulés dans le but d'évaluer l'influence des changements de phase du MCP sur l'atténuation des fluctuations de température et leurs effets sur la constante de temps.

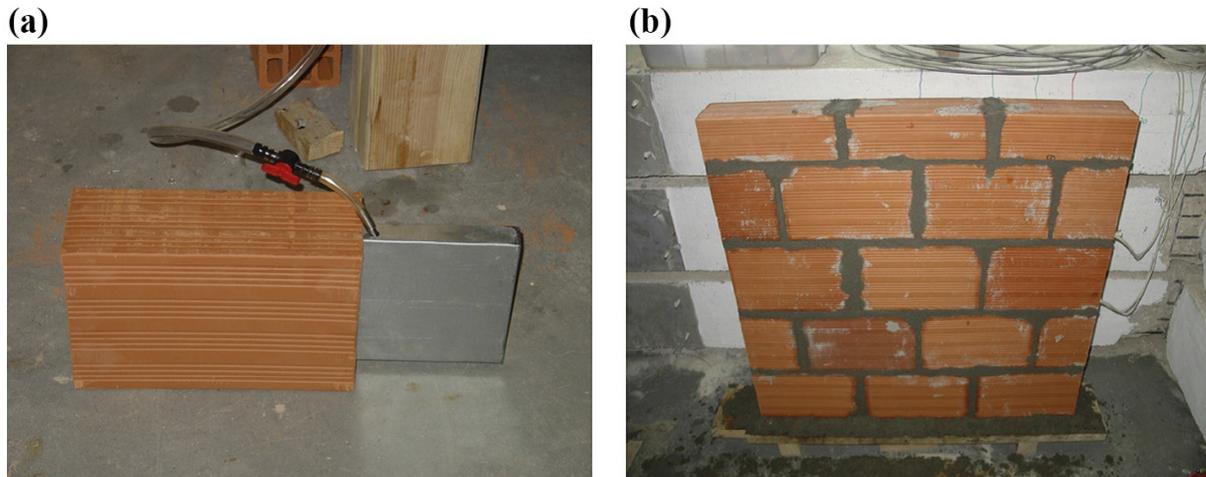


Figure 8. (a) Remplissage de la macrocapsule en MCP ; (b) Échantillon de mur[58]

Pour évaluer l'impact sur le confort thermique intérieur de l'incorporation de macrocapsules de MCP dans les briques creuses de la construction, Silva et al [71] ont testé des briques dotées de MCP constituant les parois d'une enceinte climatique. Deux spécimens de mur sont comparés, l'un comportant des briques avec MCP macroencapsulées comme le montre la Figure 8, le second étant érigé avec des briques ordinaires. L'acier est utilisé comme matériau d'encapsulation et le RT18 comme MCP. Les résultats montrent une réduction de 5 à 10 °C de l'amplitude thermique et un déphasage de près de 3 h dans l'échantillon de paroi préparé à l'aide de MCP macroencapsulé.

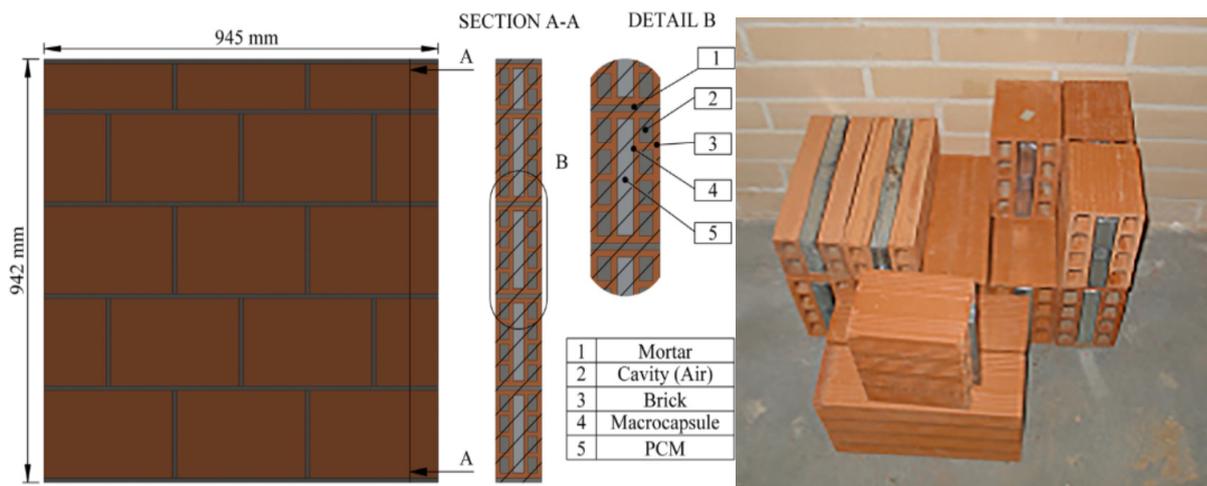


Figure 9. Configuration des échantillons de murs ; Briques munies de macrocapsules de MCP (de gauche à droite) [71]

Meng et al [72] ont développé deux cellules d'un mètre cube avec MCP composite macroencapsulé dans des panneaux d'aluminium, la première avec le SP29 et la seconde

avec le RT18 de Rubitherm. La troisième cellule est sans MCP comme le montre la [Figure 9](#). Le SP29 est placé sur le sol, le plafond et le mur ouest de la première cellule tandis que le RT18 a été intégré sur le mur sud et nord de la deuxième cellule.

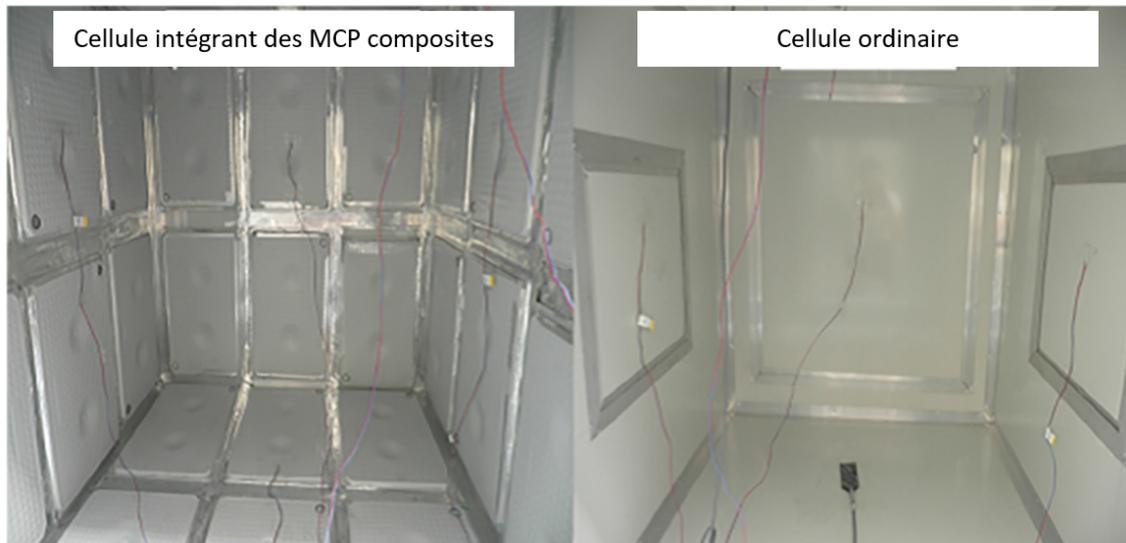


Figure 10. Aspect intérieur des deux cellules [72]

Dong 2016 et al [73] ont développé un MCP macroencapsulé à base de boules creuses en acier chargées de MCP (Octadécane) comme le montre la [Figure 11](#). Des tests sur le comportement mécanique et thermique sont réalisés sur un béton intégrant ces MCP composites. Ces travaux ont démontré des effets intéressants sur le confort thermique de l'ajout des MCP composite dans les parois, par leur contribution à réduire la température intérieure maximale dans les cellules et à y minimiser les effets des fluctuations de la température extérieure.



Figure 11. (a) Macrocapsules métalliques scellées ; (b) section d'une macrocapsule [73]

2.2.5.3 L'imprégnation (cLWA = LWA+MCP)

Plusieurs auteurs ont opté pour l'utilisation d'agrégats légers à structure poreuse (LWA) comme conteneurs à MCP. Ce sont généralement des agrégats minéraux parfaitement compatibles avec la plupart des matériaux de construction, en particulier le béton. Ils permettent une teneur plus élevée en MCP et sont produits facilement et à faible coût. La plupart des matériaux minéraux argileux ont une structure poreuse et une surface spécifique considérable. Ainsi, leur capacité d'adsorption est excellente et le MCP peut aisément y être imprégné. En revanche, il existe quelques minéraux argileux peu propices à la charge en MCP car à faible surface spécifique et espacement peu important entre les couches.

Les interactions entre le MCP et les matériaux argileux minéraux sont principalement la force capillaire, la tension superficielle, la liaison hydrogène, la force de Van der Waals, etc. Ces interactions peuvent limiter les fuites de MCP dans les cLWA [53].

Les matériaux minéraux argileux couramment utilisés sont le kaolin [74], la diatomite [75], [76], la sépiolite [77], la bentonite [78], la perlite [75], [76], [79], le SiO₂ [80], l'attapulgite [81], la vermiculite [75], [76], etc. Les matériaux minéraux argileux ont une conductivité thermique relativement élevée et une excellente adsorption, ce qui permet de remédier avec succès aux défauts que présente le MCP. Aussi, leur grande surface spécifique et importante structure poreuse peuvent empêcher avec succès l'écoulement et la fuite du MCP. Le point suivant englobe une sélection de travaux de recherche sur la production de cLWA à base de différents MCP et LWA.

2.3 Utilisation passive des MCP dans le secteur du bâtiment

Les MCP sont utilisés dans les enveloppes de bâtiments dans l'objectif de les rendre plus performantes énergétiquement. Ils peuvent être intégrés dans le mur, les fenêtres, les brises soleils et volets de fenêtres, les plafonds et les sols [113]. Cette intégration dépend essentiellement des applications visées, recourant ainsi à des configurations et des caractéristiques adaptées. Dans le secteur du bâtiment, deux principales applications sont recensées, l'utilisation naturelle obtenue grâce aux apports solaires d'une part, aussi bien pour le chauffage que pour le rafraîchissement, et l'utilisation d'autre part de sources artificielles de chaleur ou de froid. La disponibilité, la demande dans le temps et le pouvoir de production sont les atouts clés pour le stockage de l'énergie thermique [113].

Pour rester dans notre domaine d'étude, la priorité sera donnée dans les points traités à la présentation de travaux de recherche dirigés sur l'intégration des MCP dans les murs, notamment les murs en béton. Pour le reste des applications, le lecteur pourra se référer aux travaux de [59], [114]–[117].

2.3.1 MCP intégrés dans les murs

Dans la majeure partie des études existantes en rapport avec l'intégration des MCP dans l'enveloppe des bâtiments, c'est dans les murs que les MCP sont principalement appliqués.

Cette partie de l'enveloppe représente la zone où l'échange de chaleur est le plus grand et efficace, mais également dont la mise en œuvre est pratique et simple [55]. Les différents modes d'intégration de MCP dans les murs peuvent être répertoriés selon deux grandes familles, à savoir l'immersion et l'attachement. L'immersion consiste à introduire des MCP dans les matériaux de construction par le moyen des techniques de microencapsulation, macroencapsulation ou immersion directe (voir points précédents) tandis que l'attachement correspond à l'ajout d'une ou plusieurs couches de MCP à une paroi. Cet ajout reste indépendant de la paroi principale. Il s'agit généralement de plaques fines à base de MCP produites industriellement. À titre d'exemples, nous pouvons citer les panneaux SmartBoard et Comfortboard produits par BASF® et les panneaux DuPont™ Energain de DuPont de Nemours. (Détaillés dans les points suivants).

Le *Tableau 7* propose un échantillon des principaux travaux de recherche portant sur les murs- MCP, avec une variété de matériaux à changement de phase, intégrés dans les murs par différentes méthodes.

Tableau 7. Travaux de recherche intégrant des produits MCP dans les murs suivant différentes méthodes

Auteurs	Mode d'intégration	MCP / Produit	Matériaux du mur contenant le MCP	Résultats essentiels
[56]	Attach	- PEG 600	- Fibres de ciment - Panneaux VIP - Panneaux MCP en PVC - Contre-plaqué en bois	- Réduction de l'amplitude de la température intérieure d'environ 20 ° C en été. Stockage et dégagement de chaleur importants en hiver. - Le temps de confort thermique est augmenté d'au moins 10% et la température maximale est diminuée de 6%.
[118]	Mic	- Micronal®	- Béton MCP	- Réduction significative de la conductivité thermique. Réduction du pic de température de surface interne jusqu'à 1,7 °C. Déphasage thermique d'environ 2 h.
[119]	Mic-Attach	- Inertek	- Béton MCP renforcé	- Fluctuations de température plus faibles pendant des périodes plus longues, décalage du pic de température et réduction des températures extrêmes.
[12]	Attach	- BioPCM™ - Energain	- Panneaux MCP - Plaque de plâtre	- (2007) Augmentation de l'inertie thermique, déphasage thermique augmenté d'environ 2h.
[62], [120]	Mic	- Micronal®	- Béton MCP	- (2019) Réduction des températures de surface. Grand déphasage thermique des températures ambiantes internes et fluctuations plus douces entre le jour et la nuit. Même réponse thermique et résistance mécanique après dix ans.

[121]	Mac	<ul style="list-style-type: none"> - Acide gras - Paraffine - Sel hydraté 	<ul style="list-style-type: none"> - Briques de verre 	<ul style="list-style-type: none"> - Surchauffe restant significative mais avec des températures inférieures à celles des cellules sans MCP. Nécessité de couplage à un système de ventilation nocturne efficace et limitation stricte des apports solaires.
[59]	Mac- Attach	<ul style="list-style-type: none"> - RT27 - SP-25 A8 	<ul style="list-style-type: none"> - Polyuréthane - Briques - Panneaux MCP 	<ul style="list-style-type: none"> - L'utilisation du MCP réduit le pic de température de 1 °C et la consommation d'énergie électrique de 15%. - Diminution de la résistance mécanique. Les microcapsules ont conservé leur forme sphérique après l'ajout au béton. Un amortissement de 2 °C est réalisé à la mi-journée, soit 13% d'économie d'énergie selon les normes de l'ASHRAE. MCP thermiquement stable après 2 ans.
[122]	Mic	<p>Eutectique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Acide caprique - Acide myristique 	<ul style="list-style-type: none"> - Béton MCP 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des fluctuations de température de l'air dans la pièce avec une surchauffe plus faible. Réduction des températures de surface des murs. Amélioration du confort thermique par des effets radiatifs.
[123]	Mac- Attach	<ul style="list-style-type: none"> - Energain 	<ul style="list-style-type: none"> - Plâtre - Polystyrène - Plaque de bois - Panneaux MCP 	<ul style="list-style-type: none"> - Baisse de température d'environ 4.28 à 7.7 °C pendant la journée d'été et une augmentation de température de 2.02 à 2.71 °C pendant les nuits d'été. Baisse des températures pour les journées d'hiver de 11.21 à 14.12 °C et hausse de température de 6.93 à 9,48 °C pour les nuits d'hiver. Réduction des fluctuations de température de 25.4 à 17.7 % en hiver et de 67.8 à 28.8 % en été.
[72]	Mac- Attach	<ul style="list-style-type: none"> - SP29 - RT18 	<ul style="list-style-type: none"> - Polystyrène expansé - plaque de MCP 	<ul style="list-style-type: none"> - L'utilisation d'un ester ou d'hydrates de sel comme MCP améliore les résultats thermiques et leur incorporation dans les cellules entraîne une réduction d'impact de 9% et 10,5 % respectivement, par comparaison aux murs comportant de la paraffine. L'ajout de polyuréthane à toute cellule relève le niveau d'impact total d'environ 20 %.
[124]		<ul style="list-style-type: none"> - RT-27 - SP-25 A8 - Ester 	<ul style="list-style-type: none"> - Mortier de ciment - Brique creuse - Polyuréthane - Brique creuse - Plâtre - Béton - Asphalte - Pierres 	<ul style="list-style-type: none"> - Le déphasage thermique peut atteindre 7,3 °C. Réduction des pertes thermiques à travers le plafond d'environ 50 %.
[113]	Attach	<ul style="list-style-type: none"> - Energain 	<ul style="list-style-type: none"> - Mortier de ciment - Brique creuse - Panneau MCP 	<ul style="list-style-type: none"> - MCP plus efficace dans le plafond. Décalage de 6h au passage des calories à travers la couche de MCP. Réduction de la consommation énergétique de 20 %.

[125]	Attach	- BioPCM Q23 M51	- Plaques d'aluminium - Plaques de plâtre - MCP	- Refroidissement passif significatif être obtenu avec 17 m ² de MCP. Baisse des températures modérée observée lorsque le MCP est recouvert de plaques en aluminium au plafond et de plaques de plâtre sur les parois.
[58]	Mac	- RT18 [°]	- Briques - Ciment - MCP	- Augmentation considérable de la capacité de stockage de chaleur des échantillons muraux Amplitude thermique réduite de 80%, lorsque le MCP est combiné avec une isolation externe.

2.3.2 MCP intégrés à la toiture

Dans certains bâtiments, notamment ceux réservés à l'usage de bureaux, l'enveloppe extérieure est faite d'éléments légers et transparents et les cloisons intérieures sont souvent absentes, laissant place à une configuration ouverte (open spaces). Dans ce cas précis et dans beaucoup d'autres situations, il est difficile de trouver des surfaces verticales où l'on peut intégrer des MCP en vue de doper le stockage d'énergie thermique dans la structure. C'est l'une des raisons qui justifie le choix des toits et/ou des éléments des faux-plafonds pour le chargement en MCP. Dans une étude menée par Berardi et al [12], il en ressort un pourcentage plus élevé d'absorption de chaleur dans le plafond comportant des MCP et une réduction plus importante des températures de pointe en comparaison avec les surfaces murales. Ceci indépendamment de l'impact de l'ombrage car la même observation a été faite lorsque les cellules étaient ombragées avec une exposition solaire minimale sur les murs. De nombreux autres auteurs ont publié des recherches où des MCP ont été intégrés suivant différentes méthodes à la toiture ou sous plafonds [59], [113]–[116], [125].

2.3.3 MCP intégrés dans les surfaces vitrées

Des mesures effectuées par Grynning et al [126], sur un système de fenêtre à quatre vitres incorporant un réflecteur solaire dans la cavité la plus externe et une couche de MCP dans la cavité la plus interne, ont montré que l'inertie thermique est améliorée sous certaines conditions climatiques.

Zhong et al [127], ont étudié en 2015 les effets des paramètres thermophysiques d'un MCP (Paraffine MG29) sur le transfert dynamique de chaleur à travers une fenêtre en verre rempli de ce MCP. Les résultats ont indiqué un effet très intéressant sur l'ambiance thermique.

Ismail et al [128] ont mené une étude numérique et expérimentale sur des fenêtres contenant des MCP et notent, entre autres résultats, de fortes réductions des rayonnements infrarouges et ultraviolets avec tout de même la conservation d'une bonne transparence révélée par les mesures de la transmittance et réflectance des vitrages.

2.3.4 MCP et produits industriels dérivés pour le bâtiment

2.3.4.1 SmartBoard de la BASF

Intégrées à raison de 3 kg par mètre carré de plaque de plâtre, les microbilles de paraffine Micronal® forment un matériau à changement de phase facile à intégrer dans des constructions innovantes, le SmartBoard®. Un mur équipé de 2 plaques de plâtre Micronal de 15 mm d'épaisseur peut stocker autant de chaleur qu'un mur de 14 cm de béton ou un mur en briques de 36,5 cm. Dans une pièce suffisamment ventilée, le Micronal permet une réduction de 4 à 6°C pour la température la plus élevée en période estivale et par conséquent des besoins en climatisation de 30% en moyenne⁴. En mi-saison et en hiver, l'énergie de chauffage est abaissée de 15%.

Les caractéristiques thermiques du produit sont présentées dans le *Tableau 8*.⁵

Tableau 8. Caractéristiques thermiques du SmartBoard de la BASF

Paramètre/critère	Micronal® PCM SmartBoard™ 23	Micronal® PCM SmartBoard™ 26	Comparaison : plaque de plâtre standard
T (C°) Ch ^t Phase	23	26	-
L (kJ/m ²)	env. 330	env. 330	0
Cp (kJ/kgK)	env. 1.20	env. 1.20	env. 0.85
λ (W/mK)	env. 0.134	env. 0.134	env. 0.19
Longueur (m)	2	2	
Largeur (m)	1.25	1.25	
Épaisseur (m)	0.015	0.015	
Poids (Kg/m ²)	11.5	11.5	
Taux de MCP (kg/m ²)	3	3	



Figure 12. Vue intérieure de la maison du présent (<http://www.lamaisonpassive.fr>)

⁴ <https://www.basf.com/gb/en/media/news-releases/2013/11/PCM-Mark.html>

⁵ Idem



Figure 13. Plaque du Smartboard (<http://www.cstb.fr>)

2.3.4.2 DuPont™ Energain® de DuPont de Nemours

DuPont™ Energain® se présente sous la forme de panneaux constitués d'un mélange de polymère (éthylène) avec un MCP à base de paraffine, enveloppé de deux couches minces d'aluminium servant à rigidifier l'ensemble. Ces panneaux, couplés à un système de ventilation, peuvent être facilement découpés à la taille désirée puis simplement collés, agrafés ou vissés sur les murs ou sur le plafond derrière les revêtements de plaques de plâtre. L'intérêt d'utiliser l'aluminium comme revêtement est de minimiser les transferts radiatifs, en augmentant en même temps la capacité à conduire la chaleur. L'épaisseur de MCP est relativement faible, de l'ordre du millimètre. Actuellement, aucune norme française ne garantit les MCP comme matériaux de construction.

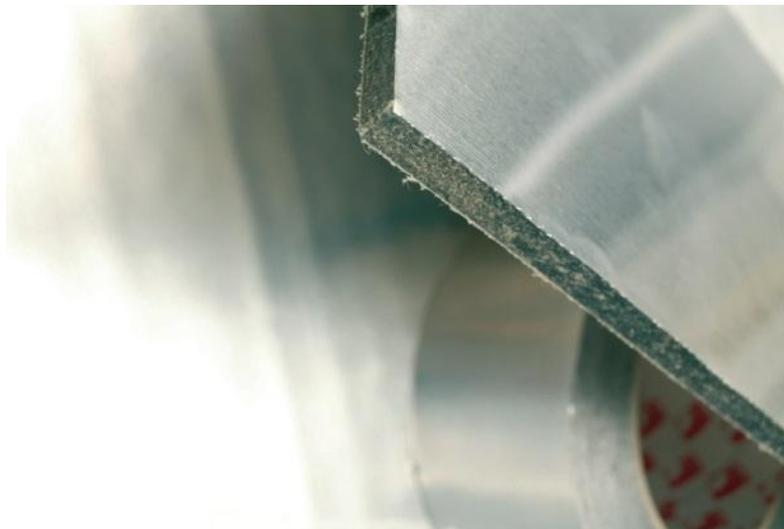


Figure 14. Panneau Energain® (www.construction21.org)



Figure 15. Panneaux Energain® appliqués sur un mur (www.constructioncayola.com)

La paraffine présente dans les panneaux DuPont™ Energain® fond puis se solidifie en fonction des fluctuations de la température interne des pièces. Lorsque le composé fond, la chaleur de la pièce est absorbée ; lorsqu'il se solidifie, il libère à nouveau la chaleur dans la pièce. En absorbant la chaleur, DuPont™ Energain® ralentit de manière significative les augmentations de température, jusqu'à 7 °C. Lorsque la température chute, la chaleur absorbée dans les panneaux est libérée ralentissant le refroidissement des pièces, ce qui limite l'utilisation des systèmes de chauffage.⁶

Tableau 9. Données techniques du Panneau à inertie thermique DuPont™ Energain® (www.energain.dupont.com)

Propriétés descriptives		Propriétés thermiques	
e (mm)	5.26	Taux de PCM (%)	60
L (mm)	1000	T de fusion (C°)	21.7
l (mm)	1198	L (kJ/kg)	70
Masse surfacique (kg/m ²)	4.5	Q de 14 °C à 30 °C (kJ/kg)	170
e de la feuille d'aluminium (µm)	130	λ solide (W/m.K)	0.18
e des bords d'aluminium (µm)	75	λ liquide (W/m.K)	0.14

De nombreux autres produits existent sur le marché. Dans une étude publiée en 2019, Berardi et Soudian [129] ont identifié huit (8) produits dont les caractéristiques sont présentées dans le [Tableau 10](#).

⁶DuPontEnergain. *Isolation dynamique des combles*. [En ligne]. Disponible sur http://energain.fr/Energain/fr_FR/uses_apps/dynamic_loft_insulation.html.

Tableau 10. Comparaison de produits commerciaux selon les données des fabricants
[91]

Produit	Fabricant	Application	Type de MCP et fraction massique	T de fusion (°C)	Chaleur latente (KJ/Kg)	Chaleur spécifique (KJ/Kg. °C)	Conductivité thermique (W/m.K)	Dimension (cm)	Masse surfacique (Kg/m ²)
Alba® Balance	Rigips- Saint Gobain	Blocs de plâtre (plafond + murs)	Micronal 13.5%	23, 25	110	1.16	0.27	50 x 100 x 2.5	23
Comfort Board	Knauf	Panneau mural en plâtre	Micronal 30%	23	110	1.2	0.23	125 x200 x1.2	11
Eco Building Boards	Weebly	Panneaux muraux en plâtre d'argile	Micronal 20%	26	132	NC	NC	62 x125 x2.2	15
Cool Zone	Armstrong	Carreaux de plafond en métal	Micronal 25%	23	82	NC	NC	60 x60 x2.5	25
Energain®	DuPont	Panneaux muraux et plafonniers	Paraffin wax 60%	21.7	70	2.5	0.18 (Sol) 0.14 (liqu)	100 x120 x 0.5	4.5
Bio PCM ENRG Blanket TM	Phase Change Energy Solutions	Mur, plafond, tapis de sol	Bio PCM TM 100%	23, 25, 27	165-200	2.1	0.2	40 x120 x1.5	2.7
Therma cool	Datum Phase Change	Carreaux de plafond et panneaux muraux	Micronal (Varies)	22	25.9	2.01	0.88	60 x60 x2.5	25
Thermal Core®	National Gypsum	Plafonds et panneaux muraux	Micronal	23, 26	110	1.2	NC	120 x240 x1.2	1.02

2.3.5 Exemples de maisons intégrant des produits à base de MCP dans leur enveloppe

2.3.5.1 La Living LabNcube au Luxembourg intégrant les panneaux Energain® de DuPont de Nemours

a. Description du projet

Le futur de la construction unifamiliale est mis en œuvre dans une maison prototype luxembourgeoise, résultat de trois ans d'étude et de collaboration entre de nombreux partenaires. Avec le soutien du Ministère de l'Économie et en partenariat avec plusieurs entreprises dont Dupont de Nemours, fabricant et fournisseur des panneaux de MCP « DuPont™ Energain® », la luxembourgeoise de constructions en bois Naturhome SA a conçu Ncube, un mode de construction hautement industrialisé qui permet la réalisation de maisons unifamiliales passives richement équipées et finies, pour un budget très contenu.

En associant sur chantier des parois préfabriquées et des modules autoportants complètement équipés en usine mais également en mettant en œuvre des matériaux et des équipements innovants, ils proposent un habitat à la pointe en termes de performances thermiques et acoustiques tout en restant accessible en prix.

Ncube est inspiré de l'industrie automobile pour sa production et son organisation. Pour sa commercialisation également : un configurateur web permet au candidat bâtisseur de dessiner sa future maison et d'en connaître immédiatement le prix.

Le « Living Lab » de Wincrange, maison réalisée suivant les techniques Ncube, sera habitée et équipée de capteurs. Neobuildy se chargera de contrôler durant toute une année ses performances thermiques et acoustiques, les fluctuations de l'hygrométrie, etc, l'objectif de ces mesures étant la vérification et surtout la confirmation en situation réelle des résultats intéressants obtenus en laboratoire.

Comme décrit précédemment, DuPont™ Energain® est un nouveau produit révolutionnaire qui permet d'augmenter la masse thermique des bâtiments à faible inertie exposés aux apports solaires et aux fluctuations de température. Les panneaux DuPont™ Energain® permettent d'augmenter le niveau de confort thermique, d'économiser l'énergie et de réduire les émissions de CO₂.



Figure 16. Vue sur la Living LabNcube (www.construction21.org)

b. Consommation énergétique

La maison a bénéficié d'un certificat de performance énergétique (N° P.141121.9780.45.a.1.N) et a été classée à la catégorie « A ». Les indicateurs les plus importants sur la consommation énergétique et la performance énergétique de l'enveloppe sont les suivants⁷ :

- Consommation d'énergie primaire : 3 9,10 kWh/m².an
- Consommation pour un bâtiment standard : 95,00 kWh/m².an
- Consommation d'énergie finale : 9,80 kWh/m².an
- Répartition de la consommation énergétique :

⁷ www.construction21.org

5326 kWh = production photovoltaïque
854 kWh = besoins production ECS
1380 kWh = chauffage
3250 kWh = besoins électricité domestique

- U_{Bat} de l'enveloppe : 0,16 W.m⁻².K⁻¹
- U_{parois} = [0,08 ; 0,12] W/m²K
- U_w = [0,7 ; 1,6] W/m²K
- Coefficient de compacité du bâtiment : 0,97
- Étanchéité à l'air : 0,49

L'étude énergétique réalisée sur la maison montre que, d'avril à octobre, les apports (solaires essentiellement) compensent la totalité des besoins de chauffage. Aussi, il est suggéré de se protéger du soleil en été (*Figure 17*)

La *Figure 18* représente les consommations électriques attendues tant en consommation (pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la consommation domestique) qu'en production via les panneaux photovoltaïques. Il est démontré que la base annuelle le bilan entre consommations électriques et production photovoltaïque sont équilibrées. L'habitation Living LabNcube est une habitation zéro énergie et autosuffisante.

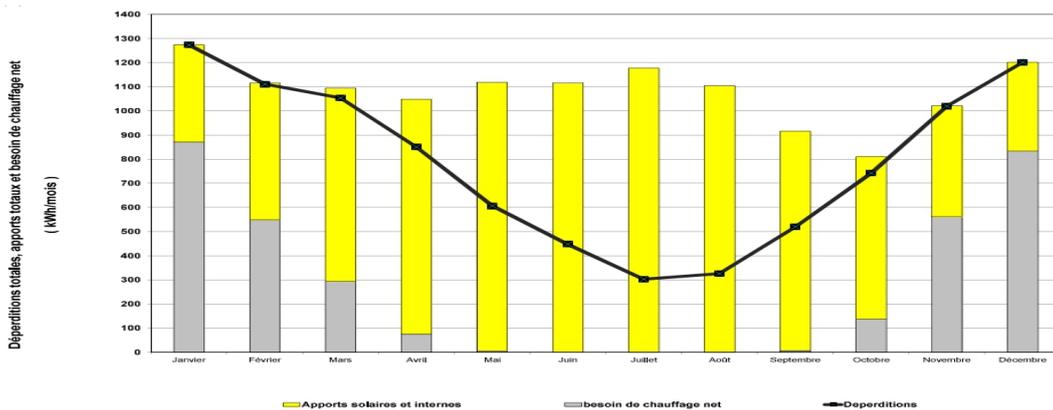


Figure 17. Déperditions totales, apports totaux et besoin de chauffage de la Ncube (<https://www.construction21.org/luxembourg/case-studies/h/living-lab-ncube.html>)

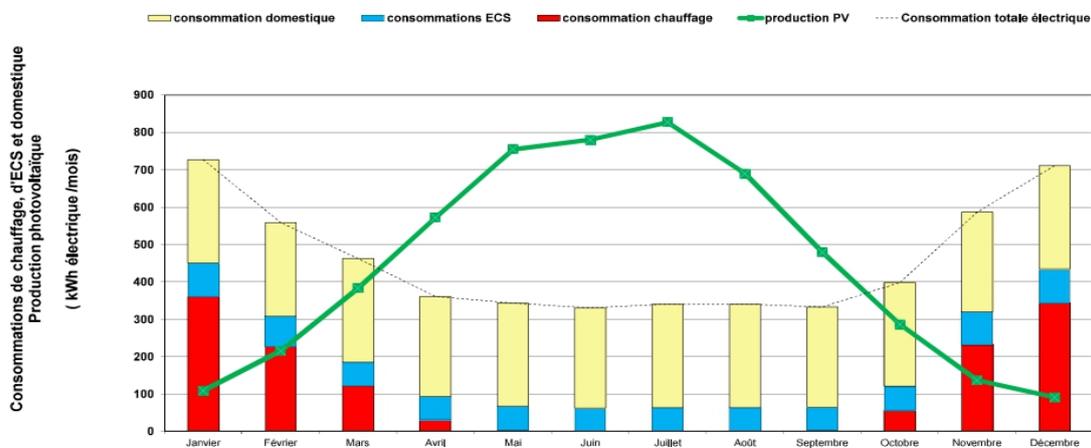


Figure 18. Consommations de chauffage, d'ECS et domestique et production photovoltaïque (<https://www.construction21.org/luxembourg/case-studies/h/living-lab-ncube.html>)

2.3.5.2 La Mark Group Eco House intégrant le Micronal® PCM de la BASF avec le Comfortboard de KNAUF (SmartBoard)

La maison du groupe Mark est une propriété individuelle de quatre chambres avec trois niveaux, dont un sous-sol/garage, conçue par des membres interdisciplinaires du corps enseignant/étudiant de l'université de Nottingham (UK). Une équipe d'étudiants de premier cycle en architecture et en technologie du bâtiment a travaillé sur le bâtiment, apportant une expérience précieuse des pratiques de construction. Le personnel de recherche et doctorants entreprennent des études de recherche liées à la construction. Cette maison utilise des méthodes de construction modernes et innovantes sous la forme d'un cadre en acier léger et d'un coffrage en béton isolé. La construction au-dessus du niveau du sol est en ossature métallique préfabriquée, recouverte d'un panneau de mousse de polystyrène de 200 mm, tandis que le sous-sol est en coffrage de béton isolé.

Bien que l'accent soit mis sur l'efficacité énergétique de cette construction, avec un contrôle sur plusieurs années de ses performances énergétiques, cette maison comprend également des technologies et des aspects de conception visant à maximiser les apports solaires (actifs et passifs), ceux de la lumière naturelle et de la ventilation naturelle, et à rationaliser la consommation d'eau potable. Une pompe à chaleur géothermique et un système d'échangeur de chaleur sol-air sont installés pour satisfaire à la demande de chauffage des locaux.

Le Micronal® de l'entreprise chimique BASF est incorporé dans la nouvelle plaque de plâtre Comfortboard de KNAUF. Des plaques, de deux types différents, sont montées dans les parois les plus impactées par le rayonnement solaire. L'une est en plâtre standard, l'autre est une plaque de confort de KNAUF contenant le matériau à changement de phase Micronal®, constitué de particules microscopiques de cire enfermées dans une coque polymère résistante. L'effet recherché est le maintien de la température interne à un niveau stable en empêchant la surchauffe pendant la journée et en relevant la température dans la maison lors des nuits fraîches par la restitution de la chaleur de solidification du MCP.

La capacité des MCP à réaliser ces performances en laboratoire est nettement démontrée, mais l'expérimentation dans un environnement vivant et les mesures effectuées notamment dans cette maison type du groupe Mark a permis d'évaluer les apports effectifs dus à l'incorporation des MCP dans les parois et de chiffrer leur contribution à l'amélioration du confort thermique de ces constructions. Le département d'architecture et d'environnement bâti de l'université de Nottingham a mis en place une série de tests où le flux de chaleur à travers la surface des panneaux est continuellement contrôlé à la fois pour le panneau de plâtre standard et le KNAUF Comfortboard, permettant une comparaison scientifiquement solide.

La maison du groupe Mark est la sixième maison du projet CreativeEnergy à Nottingham. La maison BASF, qui fait partie du même projet, présente diverses technologies BASF, dont l'une est d'être la première utilisation domestique du Micronal au Royaume-Uni.



Figure 19. La Eco house intégrant le Knauf Comfortboard
(<https://www.specfinish.co.uk/knauf-comfortboard-benefits-hi-tech-ecohouse/>)

2.3.5.3 La maison du présent à Munich (Allemagne) intégrant le Micronal® PCM avec le SmartBoard™ 23 de la BASF

C'est en janvier 2005 qu'a été inaugurée solennellement la « maison du présent » à Munich. Elle reprend le concept de l'un des lauréats du concours d'architecture organisé en 2001 par le magazine SZ. Ce bâtiment, basé sur la technique classique des constructions légères, utilise des techniques innovantes à tous les niveaux, et notamment 600 m² de panneaux Micronal®PCM SmartBoard™ 23 de BASF. Ces panneaux contiennent au total 1800 kg de produits à changement de phase qui assurent la gestion de la température de ce bâtiment d'avenir, dont l'intégration parfaite dans la nature illustre la symbiose entre paysage artificiel et architecture.

Le panneau Micronal®PCM SmartBoard™ constitue un matériau idéal pour la rénovation comme pour la construction légère moderne. Chaque mètre carré de ce panneau innovant renferme 3 kg de microcapsules ; ce qui permet, pour la première fois, à un matériau de ce type d'assurer de manière active un climat agréable dans la pièce. Il est ainsi possible d'optimiser les températures intérieures aussi bien pour le bâti neuf que pour la rénovation. La capacité de stockage de chaleur du panneau Micronal®PCM SmartBoard™ de 1,5 cm d'épaisseur est comparable à celle d'un mur en béton de 9 cm ou d'un mur en briques de 12 cm d'épaisseur.⁸

⁸ http://www.lamaisonpassive.fr/forum/Basf/Micronal_Smartboard_fr.pdf



Figure 20. Vue sur la maison du présent
(<https://www.allmannsattlerwappner.de/en/projekte/83/haus-der-gegenwart>)

2.4 Les agrégats et les ciments/bétons à stockage d'énergie thermique (cLWA et TESC)

Des bétons ou ciments à stockage d'énergie thermique font l'objet de nombreuses études scientifiques. Ces matériaux appelés TESC sont généralement produits suivant une procédure en deux étapes. Lors de la première étape, des agrégats de stockage d'énergie thermique (appelés cLWA) sont d'abord fabriqués à partir d'agrégats légers (appelés LWA) absorbant une quantité appropriée de MCP dans leurs pores. Lors de la deuxième étape, le TESC est produit en procédant au mélange des cLWA à un béton ou un ciment ordinaires en utilisant des techniques d'ajout simples ou par substitution d'un ou plusieurs composants.

Les deux points suivants font le recueil d'études scientifiques montrant cette association entre les MCP et les LWA pour former les cLWA, puis entre les cLWA et le ciment ou béton pour produire des TESC. Il s'agira de mettre le point à la fois sur les différents LWA ainsi que les deux catégories essentielles de MCP fréquemment utilisés à savoir les paraffinés et les non paraffinés.

2.4.1 Les TESC à base de cLWA à MCP paraffinés

Comme dans beaucoup d'autres recherches [82]–[88], la diatomite a été utilisée à plusieurs reprises comme LWA par Xu et al pour fabriquer des cLWAs [89]–[91]. C'est le cas de l'étude qu'ils ont menée en 2013 où un composite à base de ciment pour le stockage de l'énergie thermique (TESC) a été développé en incorporant un matériau composite à changement de phase (MCP) paraffine / diatomite (DP). Le MCP composite paraffine/DP a d'abord été

fabriqué avec une proportion de mélange (paraffine : DP) de 0,9:1,0. Les résultats des observations au microscope électronique à balayage (MEB) et analyses au spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), ont montré que la paraffine présente toutes les caractéristiques d'une bonne compatibilité avec la diatomite et qu'elle est bien absorbée dans les pores de ce matériau. L'analyse par la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) révèle que ce composite paraffine/DP a une température de fusion 41,11 °C et une chaleur latente de 70,51 J/g. Une bonne stabilité thermique est observée en utilisant la méthode d'analyse thermogravimétrique (TGA).

Le composite paraffine / DP a été incorporé dans un ciment à 10 %, 15 %, 20 % et 30 %, en poids de ciment. Comparé à un ciment normal témoin, il est constaté des réductions maximales à 28 jours des résistances à la compression et flexion, de la contrainte de retrait au séchage et de la conductivité thermique de 48,7 %, 47,5 %, 80,7 % et 33,6 %. Les résultats de l'essai de capacité thermique spécifique et de l'essai de chauffage suggèrent clairement une bonne performance de stockage de l'énergie thermique de la TESC.

En utilisant de la vermiculite expansée, Xu et al [92], ont fabriqué, dans des travaux réalisés en 2015, un nouveau cLWA (appelé LWA-PCM) pour le développement de composites légers à base de ciment, destinés au stockage d'énergie thermique (LW-TESC). Le LWA-PCM est produit en ajoutant de la paraffine à de la vermiculite expansée au moyen de la méthode d'imprégnation sous-vide. Les auteurs ont conclu que la vermiculite calcinée à 800 °C pendant 1 heure peut être considérée comme le candidat optimal pour faire office de support pour le MCP à base de paraffine, car elle possède la meilleure microstructure expansée et la meilleure cristallisation.

En 2014, Lu et al [93] ont préparé un composite de forme stable perlite/paraffine expansée (EP/PA) par une technique d'absorption directe de la paraffine par les réseaux poreux de la perlite expansée. La température de fusion et la chaleur latente du composite EP/PA, de forme stable et contenant 60% en poids de paraffine, ont été évaluées à 27,56 °C et 80,9 J/g respectivement.

Li et al [96] ont réalisé en 2013 une étude expérimentale pour la production d'un ciment composite appelé HSCM (mortier de ciment à stockage de chaleur) constitué d'un mortier de ciment auquel sont ajoutés des cLWA composés de graphite expansé (EG) et de paraffine (MCP) fabriqué par la méthode d'absorption sous vide. Entre une cellule cubique à parois en HSCM et une cellule en mortier de ciment ordinaire (OCM), la différence maximale de température intérieure centrale est de 2,2 K pendant la phase de stockage de chaleur et 1,5 K lors de la restitution de chaleur. Le coefficient de stockage de chaleur d'une paroi en HSCM est estimé à 1,74 fois le coefficient d'une paroi en OCM.

En 2011, Li et al [97] ont mené une étude expérimentale sur la préparation et les performances thermiques de cLWA composés de paraffine et de bentonite. Le CLWA est produit en utilisant la méthode d'intercalation de solution. Les résultats des études à la DRX et au MEB montrent que la distance entre les couches de bentonite est augmentée de

1,49175 nm à 1,96235 nm par modification organique. La paraffine est parfaitement intercalée dans les couches de bentonite, ce qui donne un MCP composite de forme stable. Sa chaleur latente est de 39, 84 J/g avec un taux d'adsorption maximal de 44,4 % dans le composite.

Zhou et al [103] ont proposé en 2013 une étude numérique et expérimentale pour prédire et étudier les caractéristiques d'absorption thermique de la silice poreuse infiltrée avec des MCP pour des applications de protection thermique. Les résultats ont indiqué qu'une plus grande capacité de stockage sous forme de chaleur latente signifiait une performance thermique plus stable du composite à changement de phase.

Zhang et al [104] ont conçu en 2018 une série de MCP composites à forme stabilisée (ss-PCM) avec trois matrices de silice comme support et de la paraffine comme MCP par imprégnation en immersion dans la solution de paraffine. Ces matrices de silice poreuses présentent de bonnes propriétés thermiques lorsqu'un MCP paraffiné est confiné dans ses pores. La texture, les propriétés chimiques, la cristallisation, les interactions inter-faciales, ainsi que les propriétés thermiques et la stabilité sont étudiées en utilisant diverses techniques, notamment les isothermes d'adsorption-désorption de l'azote, la FTIR, la XRD et la MEB, ainsi que la DSC.

2.4.2 Les TES à base de CLWA à MCP biosourcés

De nouveaux MCP à base de graisses végétales, d'acides gras et de dérivé permettent un stockage important de chaleur pour des températures de changement de phase adaptées. En plus des vertus thermiques de ces produits, le fait qu'ils soient biosourcés leur donne une plus-value considérable et les rends davantage attractifs. Les MCP organiques biosourcés peuvent être obtenus à base de plantes cultivées pour cette application ou à partir de résidus industriels végétaux ou animaux. De manière générale, ils sont chimiquement stables, non toxiques et ne semblent pas se dégrader après un grand nombre de cycles. Des Esters, des acides gras, des alcools et des glycols peuvent servir à emmagasiner de la chaleur.

Comme montré en 2.2.3.1, les MCP biosourcés présentent peu de surfusion pour une chaleur latente légèrement inférieure aux produits paraffinés. De plus, ils ont une bonne congruence de solidification, ce qui est important pour éviter les phénomènes de surfusion. Ils sont généralement accessibles à des prix abordables. Une analyse de cycle de vie réalisée par John A. Noël et al en 2014 a montré que l'amortissement carbone de l'acide laurique pour une application de chauffe-eau solaire était de moins de deux ans. L'étude démontre également que leur impact carboné est hautement dépendant du mode de production. Les acides gras purs ont une température de fusion trop élevée pour un usage domestique en tant que MCP. Dès lors, des mélanges eutectiques de deux ou plusieurs acides gras et dérivés sont couramment utilisés. Quelques mélanges eutectiques sont présentés ci-après.

Tableau 11. Quelques MCP eutectiques et leurs caractéristiques

	Formule chimique	Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (J/g)
Palmitate d'isopropanol	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	10	186
Stéarate d'isopropanol	C ₂₁ H ₄₂ O ₂	14–18	142
Acide caprylique	C ₈ H ₁₆ O ₂	16.5	148.5
Stéarate de butyle	C ₂₂ H ₄₄ O ₂	19	200
Diméthyl sébacate	C ₁₂ H ₂₂ O ₄	21	120-135
Stéarate de vinyle	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	27–29	122
Acide caprique	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	32	152
Acide laurique	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	42–44	178
Acide myristique	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	49–58	187-204
Acide palmitique	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	61–64	185-203
Acide stéarique	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	69–70	203

Les MCP dits biosourcés sont largement sujets à expérimentation dans de nombreuses études scientifique pour la fabrication de CLWA et de TESC. En 2017, Li et al [94] ont fabriqué des panneaux de béton comportant des matériaux à changement de phase de forme stable, à base d'acide caprique adsorbée sous vide dans des matrices de perlite expansée. Les évaluations de leurs propriétés ont montré que l'acide caprique/perlite expansée améliore la capacité de stockage thermique du panneau de ciment ; les chaleurs latentes de fusion et de cristallisation sont respectivement de 14,25 et 14,1 (J g⁻¹) pour un mélange à 20 % de MCP par rapport au poids du composite. La capacité thermique spécifique du panneau de ciment est améliorée, et ce d'autant plus que la teneur en MCP composite dans le panneau de ciment est élevée. La conductivité thermique et le coefficient global de transfert de chaleur sont réduits de manière significative, avec en plus une amélioration du coefficient d'inertie thermique du panneau. Par rapport au ciment ordinaire, la conductivité thermique du panneau contenant une proportion massique en MCP de 10, 15 et 20 % a diminué de 39,4 %, 47,83 % et 52,49 % à 20 °C et de 37,94 %, 46,84 % et 50,63 % à 50 °C, respectivement. Les coefficients de transfert de chaleur ont diminué de 34,07 %, 40,62 % et 44,87 % à 20 °C et de 30,25 %, 35,59 % et 37,65 % à 50 °C, respectivement ; les coefficients d'inertie thermique ont augmenté de 8,75%, 13,78% et 15,96% à 20 °C, et 8,75%, 21,53% et 26,21% à 50 °C, respectivement.

Deux agrégats à changement de phase, à base d'acides laurique et myristique, et de perlite expansée comme support inorganique, ont été préparés par He et al [95] en 2014 par absorption sous vide à haute température. Des observations au microscope électronique à balayage (MEB) d'une section transversale de l'agrégat à changement de phase ont montré que les acides gras imprégnaient la matrice de perlite autant par absorption interne dans les particules poreuses de la perlite que par adhérence à la paroi. L'étude de leurs propriétés physiques et mécaniques montre que ces composites répondent parfaitement aux exigences des normes imposées au mortier d'isolation des bâtiments. Avec l'augmentation des proportions en matériaux à changement de phase ajoutés dans le mortier, la valeur calorifique effective a diminué, le déphasage en température s'est prolongé et l'étendue du refroidissement s'est accrue.

En utilisant successivement un LWA inorganique (bentonite - B) puis un polymère (Eudragit L100 - E) comme matériaux de support pour l'acide myristique (MA), Chen et al [98] ont étudié en 2014 l'influence du support sur la performance des matériaux à changement composites (cLWA appelés FSPCMs). Les résultats montrent que la teneur maximale en acide dans les composites, sans fuite à l'état fondu, est de 50 % en poids pour le FSPCM-B et 70 % pour le FSPCM-E. Pour une même fraction massique d'acide myristique, les enthalpies de transition de phase du FSPCM-B sont clairement inférieures à celles du FSPCM-E.

En 2016, Sari [99] a comparé les caractéristiques de quatre matériaux composite à changement de phase (appelé Bb-FSPCMs), produits à partir d'une matrice de bentonite imprégnée de quatre type de MCP à savoir de l'acide caprique (CA), du polyéthylène glycol (PEG600), du dodécanol (DD) et de l'heptadécane (HD). Les résultats de la caractérisation morphologique obtenus par microscopie électronique à balayage (MEB) ont montré que la bentonite a agi comme une bonne barrière structurelle pour les MCP organiques, ceux-ci étant dispersés de manière homogène autant sur sa surface que dans ses intercouches. Les observations au spectroscope infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) ont montré très clairement que les interactions entre les composants des composites ne sont que de nature physique : les MCP ne sont maintenus dans la matrice de bentonite que par des forces capillaires. Les chaleurs latentes des composites Bb-FSPCMs, comprenant respectivement 40 % en poids de CA, 43 % en poids de PEG600, 32 % en poids de DD et 18 % en poids d'HD, ont des valeurs intéressantes ; elles sont comprises entre 38 et 74 J/g. Une propriété positive est que tous les Bb-FSPCMs testés ont conservé leurs propriétés thermiques même après 1000 cycles de chauffage-refroidissement.

En 2017, Huang et al [100] ont fabriqué des cLWA (appelés CPCM) par imprégnation directe de la matrice de bentonite par des eutectiques d'acides gras (acide palmitique PA - acide stéarique SA). Du graphite expansé (EG) est incorporé au mélange pour améliorer la conductivité thermique des CPCM et pour empêcher les mélanges eutectiques de fuir. Les CPCM ont une chaleur latente de 89,12-163,72 kJ/kg et leurs propriétés thermiques sont conservées après 50 cycles de chauffage-refroidissement.

En 2017, Shen et al [101] ont imprégné de la sépiolite (CSEP) chimiquement modifiée avec de l'acide laurique (LA) pour produire des cLWA, dont le taux de charge pouvait atteindre 60 % en poids, soit un taux 50 % supérieur à celui de la sépiolite vierge(SEP). Les chaleurs latentes correspondantes de ces cLWA sont de 125,2 J/g à la température de fusion de 42,5 °C et 113,9 J/g à la température de solidification de 41,3 °C, avec une fiabilité chimique et thermique confirmée de ces composites après 200 tests de cycles thermiques.

Des CLWA (appelés FSt-CPCM), composés d'un MCP eutectique d'acide caprique (CA) et d'acide stéarique (SA) imprégnant par infiltration directe une matrice de sépiolite (Sep) à forme stabilisée, ont été étudié en 2019 par Sari et al [102]. Les mesures DSC donnent une température de fusion du MCP de 22,86 °C et une capacité de chaleur latente relativement

élevée de 76,16 J/g. Le FSt-CPCM a montré une stabilité chimique et une fiabilité exceptionnelles bien qu'il ait été exposé à 1000 cycles de fusion/solidification.

2.4.3 Traitements spécifiques pour l'amélioration des performances thermiques des CLWA

2.4.3.1 Augmentation de la conductivité thermique

La plupart des travaux disponibles dans la littérature, qui traitent de l'analyse thermique des composites de béton incorporant des MCP-LWA arrivent au même résultat : une capacité de stockage thermique plus élevée et une conductivité thermique plus faible [38], [105]–[107]. Des matériaux de revêtement particuliers ont été utilisés pour empêcher les fuites de MCP du LWA mais aussi pour améliorer la conductivité thermique du composite de béton LWA-MCP final.

Une première action pour améliorer le transfert thermique dans le réservoir de stockage consiste à combiner le MCP avec un matériau plus conducteur, ce qui permet d'augmenter la conductivité thermique globale. Ainsi, il est possible d'intégrer le MCP dans une matrice métallique [73], [108] ou de fabriquer un composite ayant des propriétés thermophysiques meilleures en dispersant des particules d'une grande conductivité thermique dans le MCP comme le graphite, le graphène ou encore l'aluminium (incompatible avec le béton) [109].

Jia et al ont ajouté du graphite dans des MCP composites à base de sépiolite (paraffine/sépiolite, acide caprique/sépiolite et CA-P/sépiolite) pour améliorer leur conductivité thermique. Les conductivités thermiques qui étaient de $0,174 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $0,191 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et $0,185 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, respectivement, ont augmenté de 267,4%, 245,1% et 241,9% respectivement après l'ajout dans les composites de graphite à 20% de fraction massique. Notons cependant qu'en contrepartie de cette amélioration de la conductivité thermique, l'ajout de graphite a pour effet une baisse de la quantité de chaleur latente stockable dans les composites.

Jeong et al [83] ont procédé, entre autres, à l'analyse de la conductivité thermique d'un MCP biosourcé et d'un MCP biosourcé thermiquement amélioré avec un ajout de graphite (xGnP) (voir *Figure 21*). Les mesures de la conductivité thermique du MCP biosourcé et du MCP biosourcé thermiquement amélioré sont de $0,154$ et $0,557 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, respectivement, soit une augmentation de 375% de la valeur de la conductivité thermique, du fait de l'incorporation du xGnP dans la composition du MCP biosourcé thermiquement amélioré.

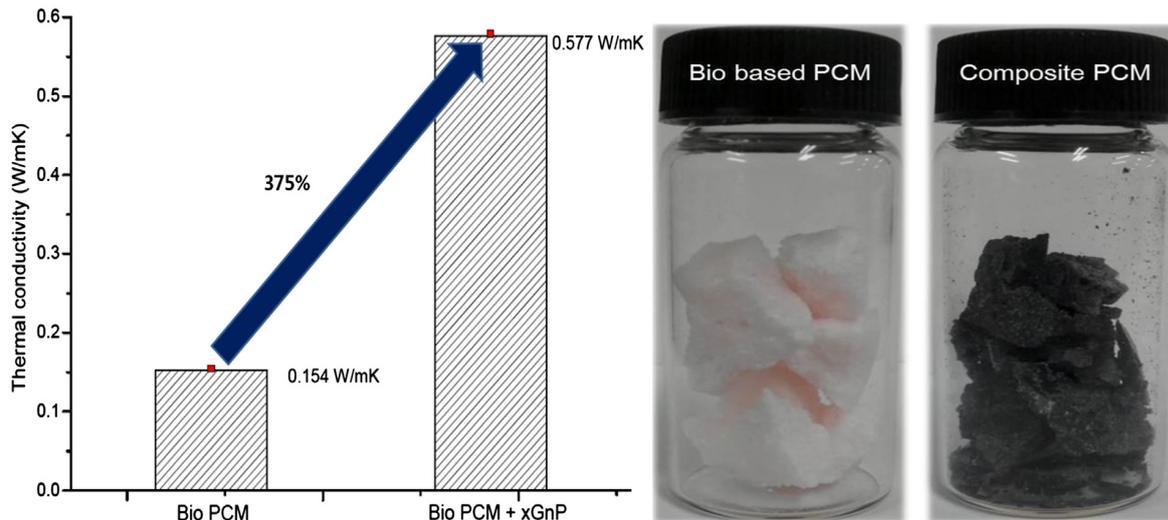


Figure 21. Augmentation de la conductivité thermique ; Morphologie de MCP biosourcé ; MCP biosourcé amélioré thermiquement (de gauche à droite) [83]

Cependant, il existe des matériaux minéraux argileux qui possèdent une conductivité thermique relativement élevée et une excellente adsorbabilité, remédiant ainsi avec succès aux problèmes liés à la faible valeur de la conductivité thermique, pouvant conduire à une fusion incomplète du MCP.

2.4.3.2 Réduction des fuites par confinement

Grâce à l'étanchéité des containers majoritairement constitués de matériaux inertes qu'elles utilisent comme le polymère naturel ou synthétique, les techniques de la microencapsulation et de la macroencapsulation devraient éviter en théorie les fuites du MCP lorsque celui-ci passe de l'état solide à l'état liquide. En revanche pour les agrégats minéraux légers, la technique d'imprégnation par des MCP lorsqu'aucune précaution n'est prise présente ce principal inconvénient de fuite à l'état liquide. Au bout de quelques cycles de fusion- solidification, la structure du composite est déstabilisée et l'efficacité ainsi que le rôle du MCP sont sérieusement remis en question.

Pour prévenir toute fuite de MCP, la plupart des études disponibles dans la littérature préconisent l'utilisation d'un revêtement protecteur composé généralement de résine époxy, de poudre de graphite et de fumée de silice [38], [100], [105]–[107], [110], [111]. Une autre solution est proposée par Mankel et al [112], en appliquant un degré de remplissage maximal de 80%_{vol} afin de minimiser le risque de fuite.

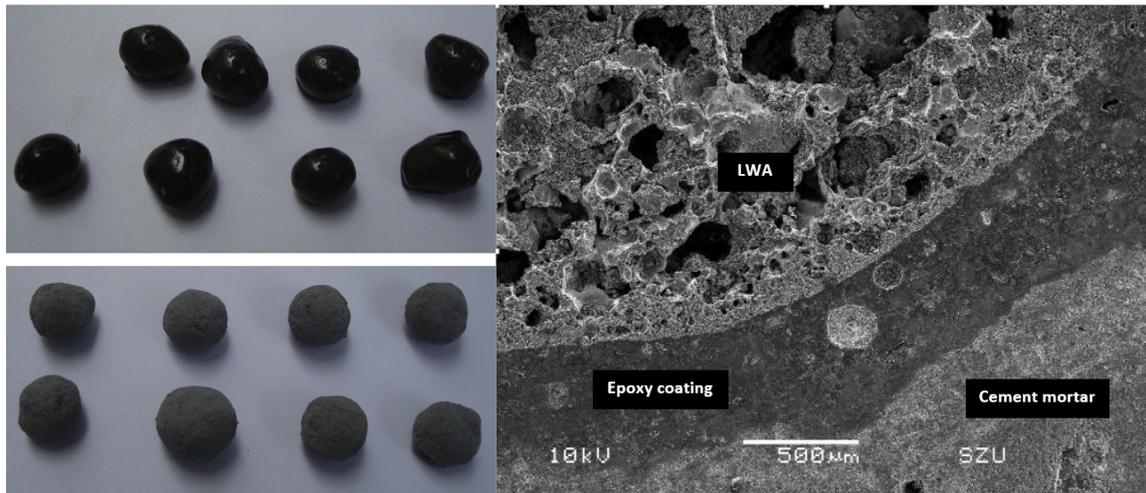


Figure 22. Paraffine-LWA revêtus d'un mélange d'époxy et de poudre de graphite ; Paraffine-LWA revêtus d'un mélange d'époxy et de poudre de graphite de fumée de silice ; Image MEB du matériaux composite (de gauche à droite) [38]

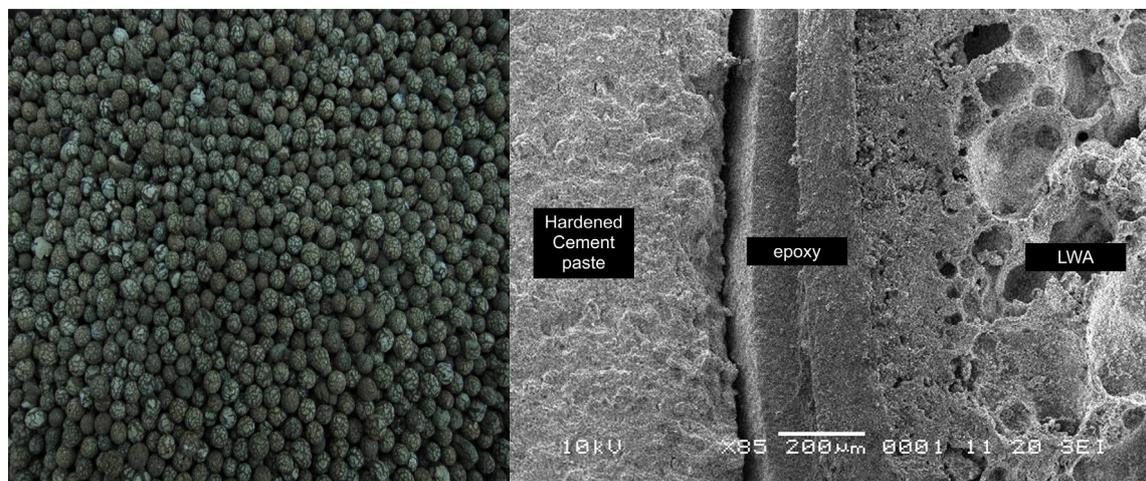


Figure 23. Agrégat expansé léger utilisé ; Image MEB de la zone de transition interracial du matériau composite [105]

2.4.3.3 Augmentation de la surface d'échange

Tous les chercheurs menant des études dans le domaine des MCP s'accordent à dire que la façon la plus efficace d'utiliser les MCP, notamment dans le secteur du bâtiment, est la microencapsulation. Grâce à une plus grande surface d'échange, cette technique garantit une fusion optimale du MCP et par conséquent un plus grand stockage d'énergie thermique. Lorsque les méthodes de macroencapsulation ou d'imprégnation (LWA-MCP) sont utilisées, il est recommandé de réduire les macrocapsules ou les CLWA aux dimensions les plus petites possibles.

2.4.4 Investigations expérimentales des propriétés thermiques des TESC : utilisation des cellules-test

Il est évident que les seules caractérisations microscopiques telles que la DSC ne permettent pas d'estimer fiablement les propriétés thermiques des TESC. Des montages expérimentaux

des tailles d'échantillons proches de celles des matériaux de construction utilisés dans le bâtiment ont été mis en œuvre dans de nombreux travaux de recherche.

Ci-après, un large recueil de travaux expérimentaux étudiant le comportement thermique de cellules-test intégrant des MCP dans leurs parois.

Auteurs	Lieu	période	Matériaux	MCP	Dimensions (m)	Principaux résultats
[113]	Casablanca Maroc	Hiver et printemps	- Briques - MCP	Energain	3 x 3 x 3	- L'intégration des MCP à un mur standard conduit à une augmentation de la température d'environ 6 °C pendant la nuit et augmente fortement la masse thermique apparente de la pièce ce qui permet de réduire les flux de chaleur. Il en résulte des économies d'énergie de chauffage pouvant atteindre jusqu'à 20 %. - En été : baisse de température d'environ 4,28 à 7,7 °C pendant la journée et réduction de la fluctuation de la température de l'air intérieur jusqu'à 28,8 à 67,8% par temps ensoleillé dans la cellule MCP. En hiver : élévation de température de 6,93 à 9,48 °C pour la pièce MCP la nuit d'hiver. La fluctuation de la température de l'air intérieur diminue de 17,7 à 25,4% pendant les jours ensoleillés.
[157]	Chine	Hiver et été	- Polys Exp - MCP	SP 29 RT 18	1 x 1 x 1	- Potentiel élevé de la dalle de béton sur la réduction de la consommation d'énergie par rapport à un système de chauffage conventionnel. L'efficacité du MCP dépend des conditions météorologiques. 20 % d'économies d'énergie sont réalisées avec une fusion partielle du MCP et 55 % lorsque la fusion est complète. 25 % d'économies d'énergie sont réalisées en période hivernale dur et 40 % en période hivernal moyenne.
[61]	Lleida Espagne	Hiver	- Béton PF - Briques - MCP	RT 21	2.4x2.4x5.8	- L'ajout du panneau de MCP réduit les fluctuations de température de l'air dans la pièce. L'effet de surchauffe est plus faible. Les températures de surface des murs sont réduites et le confort thermique est amélioré. 5 mm de panneau MCP améliorent l'inertie thermique de la cellule et l'énergie de stockage disponible est deux fois plus élevée avec MCP. Cette valeur correspond à une couche de béton équivalente d'environ 8 cm.
[123]	Lyon France	Été en chambre climatique	- Béton - Plâtre - Polystyrène - Bois - MCP	Energain	3.1x3.1x2.5	- L'enveloppe hybride proposée utilise l'air comme vecteur énergétique, il circule dans une cavité disposée tout autour du bâtiment, sans contact avec l'intérieur. La source de chaleur en hiver provient de capteurs solaires à air intégrés en paroi extérieure, et le rafraîchissement en été de la ventilation dans les cavités. Les 2 fonctionnements sont couplés au stockage avec MCP.
[158]	Grenoble France	Hiver et été	- VIP - PS - PU - OSB - Briquettes - MCP	Eutectique (73.5% acide caprique et 26.5% acide mystrique)	4.4x3.7x2.5	- Les panneaux composites en béton-MCP permettaient de maintenir le confort thermique des bâtiments avec un gain de température de l'air intérieur par rapport au bâtiment de référence atteignant 2 °C, ce qui correspond à 13% d'économies d'énergie. L'effet de stockage du MCP dans le panneau composite, qui conduit à une différence de 5 °C entre les températures de surface intérieure de référence et la cellule
[122]	Adana Turquie	Hiver et été	- Béton PF - MCP	Eutectique (75% acide caprique et 25% acide mystrique)	2 x 2 x 2	

[159]	Brno-sever, Tchéquie	Été	- Plâtre - Polystyrène - P-PV - MCP - Laine min - Ciment	RT 27	3x2.43x3.09	composite, peut être clairement observé avec des images de caméra thermique. La comparaison des résultats de surveillance pendant 2 années consécutives a révélé que le MCP est thermiquement stable. - L'étude présentée a étudié l'intégration d'une couche MCP dans un système de façade ventilée BiPV, et son influence sur les performances thermiques et énergétiques d'un bâtiment. L'effet du stockage de la chaleur latente dans le MCP, puis sa libération dépend fortement de deux variables climatiques, à savoir l'intensité du rayonnement solaire global et la température de l'air extérieur. La réponse climatique optimale de la façade s'est produite sous les conditions limites extérieures d'un rayonnement solaire global maximal de 600 W/m ² et une température de l'air extérieur jusqu'à 26 °C. résumé des résultats dans le tableau 1. - La température maximale de la surface intérieure du mur sud est de 40,7 °C (Cellule A, Murs en briques) 34,9 °C (Cellule B, Murs MCP) et 32,5 °C (Cellule C, Murs RC-PCM). La température moyenne intérieure quotidienne correspondante est 27,8 °C, 27,3 °C et 27,0 °C, respectivement. Le temps de fusion des MCP dans la cellule C est d'environ 16 h par jour, soit environ 2,3 h de plus que celui de la cellule B. Les charges de refroidissement du mur sud pour la cellule C sont diminuées de 47,9% et 23,8% par rapport aux cellules A et B, respectivement. - Pendant la mi- saison, la fluctuation et la valeur maximale de la température de surface de la face intérieure du mur MCP-composite sont réduites. Une insuffisance de transition de phase liquide à solide a été observée durant certains jours. Les MCP ne subissent plus de changement de phase après une date donnée. Une augmentation d'environ 43,23% de la chaleur transférée dans la pièce est observée pour une journée ensoleillée représentative.
[160]	Hefei Chine	Été Sep-Oct	- MCP - Brique - Ciment - RC-MCP - Polystyrène	RT 28HC	1 x 0.95 x 1	- L'impact de l'ester utilisé comme MCP est légèrement meilleur que le cas de l'utilisation d'hydrates de sel. L'utilisation d'hydrates de sel ou d'ester comme MCP dans les cellules se traduit par une réduction d'impact de respectivement 9% et 10,5% par rapport au cas de l'utilisation de la paraffine. - Contribution majeure de la membrane de toit à la réduction de la température intérieure. Néanmoins, un effet de refroidissement non négligeable en termes de température de surface extérieure est imputable à la façade sud. De plus, le modèle analytique montre une précision acceptable dans la représentation du comportement du revêtement du bâtiment. - Un effet de refroidissement passif significatif peut être obtenu en utilisant 17 m ² de MCP. L'effet le plus significatif a été obtenu lorsque le MCP a été non revêtu et directement exposé aux conditions climatiques. Cela pourrait éviter d'avoir à installer un système de refroidissement mécanique local et ainsi réduire les coûts
[94]	Shanghai China	Été et mi- saison (03)	- Polystyrène - Béton - Briques - MCP	GH 20 à base de paraffine (SSPCM)	3.25x3.86x2.9 1	
[124]	Lleida Espagne	NC	- Briques - Plâtre - MCP - Ciment - Béton - Polyuréthane	SP 25 RT 27 Ester	2.4x2.4x2.4	
[161]	Perugia Italie	Été	- Roche sédimentaire - Plâtre - Béton - Brique	Sans MCP	3.78x4.00x2. 85	
[125]	Oslo Norvège (Intérieur d'un laboratoire)	Été	- Plâtre - MCP - Autres	Q23 M51	15 m ²	

[62]	Lleida Espagne	Été et mi- saison (03- 05)	- Béton - MCP	Micronal DS 5001	2 x 2 x 3	<p>d'installation, de consommation d'énergie et de maintenance. Une baisse de température a également été observée lorsque le MCP était recouvert de plaques de faux plafond en aluminium et de plaques de plâtre.</p> <p>- Le stockage d'énergie dans les murs intégrant des MCP en comparaison avec le béton conventionnel sans MCP conduit à une meilleure inertie thermique ainsi qu'à des températures intérieures plus basses. La cellule sans MCP a une température maximale de 1 °C supérieure à celle avec MCP, et une température minimale de 2 °C inférieure. La température maximale dans la paroi avec MCP apparaît environ 2 heures plus tard par rapport à la paroi sans MCP, c'est-à-dire que l'inertie thermique de la paroi est plus élevée. Troisièmement, cette inertie thermique réapparaît dans l'après-midi en raison du gel du PCM, mais aussi plus tôt le matin en raison de la fusion du matériau à changement de phase.</p> <p>- En été, l'amplitude de la température à l'intérieur de la cellule avec PCM est diminuée de 20 °C sur un cycle quotidien. En hiver, cela évite une température intérieure négative alors que la température de la cellule sans PCM est de -9 °C et que la température extérieure est inférieure à -6 °C.</p>
[56]	Grenoble France	Hiver et mi- saison (09- 11) Toute l'année	- VIP - MCP - CP en bois - Fibre de ciment	PEG 600	Environ : 1 x 1 x 1	<p>- Les températures maximales étaient ont été réduites d'environ 6%. Le MCP est resté actif pendant au moins 4% d'heures supplémentaires, et le temps de confort a été augmenté d'au moins 10% dans les cellules avec auvents. L'effet des températures extérieures élevées et du rayonnement solaire n'a pas été complètement surmonté car le MCP n'a pas subi des cycles de changement de phase complets tous les jours comme souhaité.</p>
[118]	Lleida Espagne	Été	- Béton - MCP	Micronal DS 5001	2.64x2.64x2. 52	<p>- L'inclusion de MCP diminue la température ambiante intérieure jusqu'à 3 °C, et la température sur la partie sud de la paroi intermédiaire (celle exposée à l'insolation).</p> <p>- Une performance thermique de la cellule MCP améliorée en abaissant les températures maximales intérieures et de surface jusqu'à 6 °C. stabilisation des températures intérieures des cellules dans des conditions extrêmes avec de fortes variations de température. Réduction de 9% des hautes températures de pointe dans l'ouest conduisant à une réduction de température moyenne de 4,1 °C et une augmentation de 22% des températures de pointe basses dans l'orientation sud en moyenne de 4,6 °C.</p>
[162]	Lleida Espagne	Mi- saison (04)	- PUR - Plâtre - Laine min - MCP	Paraffine	NC	<p>- On observe que, à chaque période de mesure, pour les trois cloisons vitrées différentes, la température intérieure de la cellule test avec MCP atteint un maximum inférieur à celle de la cellule test sans MCP. L'atténuation en température varie entre 3,5 et 4 °C pour l'acide gras, 2 et 3 °C pour la paraffine et 3,5 et 5 °C pour le sel hydraté.</p>
[12]	Toronto Canada	Été	- CP en bois - Polystyrène - Plâtre - MCP	BioPCM™ - Energain	NC	
[121]	GrenobleFr ance	Été et mi- saison (05)	- Briques de verre - VIP	Eutectique (acides caprique et mystrique) Paraffine Sel hydraté	Environ : 1 x 1 x 1 NC	

[120]	Lleida Espagne	Eté	- Béton - MCP	Micronal DS 5001	2.4x2.4x2.4	Sur la base de la campagne expérimentale d'été réalisée en 2005, cette étude reproduit les mêmes tests et les résultats sont comparés. Les températures de surface des façades avec MCP ont été réduites, et par conséquent cela s'est reflété dans le retard de la valeur de la température ambiante interne de pointe et les fluctuations de température plus douces entre le jour et la nuit. Dix ans après, la cellule avec MCP a montré la même réponse thermique obtenue en 2005, n'observant aucune dégradation de la réponse thermique du MCP. De plus, les performances mécaniques du béton avec MCP restent les mêmes après dix ans. Le MCP peut réduire les températures de pointe jusqu'à 1 °C et lisser les fluctuations quotidiennes. De plus, à l'été 2008, la consommation d'énergie électrique a été réduite dans les cellules MCP d'environ 15% aboutissant à une réduction des émissions de CO ₂ d'environ 1 à 1,5 kg/an/m ² . Cependant, certains problèmes de solidification du MCP pendant la nuit ont été observés.
[59]	Lleida Espagne	Eté	- Brique - Béton - Ciment - MCP - Polyuréthane	RT-27 SP-25 A8	2.4x2.4x2.4	

2.4.5 Problématiques et verrous scientifiques

Le principal verrou scientifique porte sur l'élaboration d'un TESC alliant performance thermique et solidité mécanique. Le défi central est d'injecter des cLWA dans un TESC pour améliorer son comportement thermique et réduire sa masse volumique sans porter atteinte à son intégrité mécanique. Cela passe par un certain nombre d'étapes et de travaux expérimentaux.

Le recueil d'informations et la revue bibliographique présentés dans ce chapitre font apparaître clairement à quel point l'usage des MCP dans le bâtiment peut prendre diverses formes et présenter d'importantes contraintes lors de la mise en œuvre du TESC. Tout d'abord, la compatibilité chimique est une question très sensible lorsqu'on sait que les MCP et les matrices de ciment et de béton utilisées ont des compositions chimiques fondamentalement différentes. Ce qui représente un réel inconvénient non seulement pour l'efficacité thermique du MCP mais aussi et surtout pour la stabilité physique du produit final. C'est pourquoi, la plupart des études présentées intègrent une analyse de compatibilité chimique souvent par le moyen de la FTIR et d'essais de vieillissement.

Le taux d'intégration de MCP/cLWA dans le mélange ainsi que le taux d'imprégnation des LWA par le MCP sont des points déterminants qu'il faut impérativement étudier. Il y a cet équilibre performance thermique/résistance mécanique qu'il faudra réussir. En effet, un surdosage en MCP ou en cLWA causerait une fragilité mécanique et par conséquent donnerait lieu à un matériau inutilisable car ne répondant pas aux normes de résistance mécanique des matériaux de construction. À l'inverse, un sous-dosage limiterait l'apport thermique du matériau et rendrait au final l'ajout de MCP dénué de tout sens. L'idéal dans ce cas est de rechercher un MCP avec une grande capacité de stockage thermique afin que la quantité à utiliser ne soit pas excessive.

Le recours à des moyens expérimentaux utilisant des échantillons de grande taille dans une importante part des travaux présentés est très récurrent. Il a été prouvé que la seule

caractérisation microscopique ne suffit pas car beaucoup d'autres facteurs ne peuvent être pris en compte à cette échelle.

La méthodologie expérimentale de cette thèse sera donc construite autour de ces constatations. Dès lors, il sera important de répondre concrètement à des problématiques spécifiques telles que celles concernant le choix d'un MCP avec une bonne capacité de stockage de l'énergie thermique et d'un LWA ayant un meilleur compromis entre la capacité d'absorption et la résistance mécanique. La compatibilité physique et chimique des deux composants devra être démontrée. Aussi, afin de cerner le comportement mécanique et thermique des TESC y résultant, des expériences rigoureuses devront être menées en laboratoire sur différents types d'échantillons puis à taille réelle par le biais de cellules-test soumises à moyen terme aux conditions climatiques naturelles.

2.5 Conclusion

Dans le contexte actuel, le secteur du bâtiment est devenu l'un des principaux responsables de la surconsommation énergétique. En hiver comme en été, des pics importants sont constatés dans la demande énergétique en raison du recours systématique et excessif aux moyens mécaniques, aussi pour le chauffage que pour le rafraîchissement des bâtiments. Comme nous l'avons soulevé dans ce premier chapitre, le stockage d'énergie thermique par chaleur latente représente une des solutions les plus prometteuses, et comme une source avérée d'économies d'énergie dans le bâtiment. Il permet notamment une meilleure régulation dans la gestion de l'énergie consommé par l'habitat, notamment en mettant en phase la disponibilité des ressources énergétiques naturelles avec la demande. Ce qui contribue à une amélioration par des moyens passifs du confort thermique, c'est à dire en utilisant la chaleur absorbée ou dégagée lors des phénomènes naturels de changement de phase de certains matériaux sous l'effet de la température environnante.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté un état des connaissances des MCP ainsi que des exemples concrets de leur incorporation dans les matériaux de construction et dans les enveloppes des bâtiments. Nous avons tout d'abord présenté les différents modes de stockage de l'énergie thermique, les différents types de MCP, les critères mis en avant dans le choix du matériau en fonction de son utilisation, les différentes méthodes d'encapsulation des MCP et les traitements recommandés pour l'amélioration de leur performance thermique. Par la suite, une revue des travaux de recherche portant sur les MCP a été dressée, avant de finir avec la présentation de quelques matériaux de construction à base de MCP et de maisons intégrant ce type de matériaux dans leur enveloppe.

En dépit du nombre important d'études consacrées aux MCP existant dans la littérature, le retour d'expérience sur le béton incorporant des graisses végétales comme MCP est en nombre limité, d'où la grande utilité de ce travail de recherche qui a pour but de faire toute la lumière sur le comportement de ce béton composite.

3

**TECHNIQUES D'IMPRÉGNATION ET
CARACTÉRISATION MICROSCOPIQUE**

3 Techniques d'imprégnation et caractérisation microscopique

3.1 Introduction

Ce chapitre traite de l'élaboration des composites et de la caractérisation multi-échelle du MCP grasse végétale (GV 23-26) et des MCP composite (cLWA). En pratique, la compatibilité chimique entre les LWA (GS, S et B) et le MCP (GV 23-26) est étudiée par la méthode de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) dans la gamme des nombres d'onde spectrales de 400 à 4000 cm^{-1} . Les caractéristiques morphologiques des LWA et des cLWA sont déterminées au microscope électronique à balayage (MEB) et les propriétés thermiques du MCP et des cLWA mesurées par la méthode de la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) dans un intervalle de température compris entre 10 et 50 °C. L'imprégnation des LWA par le MCP est menée selon deux techniques, l'une en conditions normales et la seconde sous vide, en recherchant les meilleures conditions en termes de temps d'immersion, de température et dimensions des grains.

3.2 Matériaux, élaboration et investigations expérimentales

3.2.1 Matériaux

Les TESCs, sont préparés sur la base d'un mélange de trois agrégats différents de poids normal ([Tableau 14](#)). Le liant est un ciment Portland au calcaire disponible dans le commerce et certifié NA442 CEM II / B-L 42,5 N, conforme aux normes algériennes (NA442 - 2013) et européennes (EN 197-1), avec une classe réelle $\sigma \geq 42,5$ MPa. Les trois granulats utilisés comme matrices de rétention des MCP sont le gel de silice (GS), la sépiolite (S) et la bentonite (B) ; ces matériaux sont choisis pour leur légèreté (LWA) et une large disponibilité dans le commerce à un prix avantageux. Leurs propriétés de base sont indiquées dans le [Tableau 12](#). Le matériau à changement de phase (MCP) est de l'huile de coprah 23-26 ([Tableau 13](#)). Avant l'imprégnation, certaines précautions sont observées :

- Lavage à l'eau des LWA ;
- Séchage à 105 °C pendant 24 heures ;
- Protection des LWA contre l'absorption d'humidité ;
- Filtrage physique du MCP sous forme liquide et stockage.

Tableau 12. Caractéristiques des LWA

LWA	ρ (kg/m ³)	α max à 60°C (%m)	D (mm)	Prix (€/kg)	Origine
Gel de Silice (GS)	457	89.60	0 ≤ D ≤ 7	≈ 0.50	Espagne
Sépiolite (S)	759	48.20			
Bentonite (B)	689	20.30			

Tableau 13. Propriétés des MCP

Plage de fusion (°C)	ρ à 30 °C (kg/m ³)	L (j/g)	Prix (€/kg)	Origine
≈ 15-26	700	77 ± 13	≈ 1	Malaisie

Tableau 14. Propriétés des agrégats

Agrégats	D (mm)	ρ (kg/m ³)	Origine
Sable	$0 \leq D \leq 3$		
Gravier moyen	$3 \leq D \leq 8$	2669	Rivière
Gros gravier	$8 \leq D \leq 16$		locale

3.2.2 Élaboration des composites

3.2.2.1 Préparation des cLWA

L'imprégnation des LWA par le MCP est menée selon deux procédés différents pour chacune des trois matrices (GS, S et B), avec des montages spécifiques pour chacune des techniques (*Figure 24* et *Figure 25*) : le premier sous pression atmosphérique et le second sous vide. Dans le cas de l'imprégnation à pression atmosphérique, trois échantillons de 10 g de LWA, de forme et dimensions hétérogènes, sont placés dans des récipients individuels, des tamis à maillage fin, puis plongés dans un bac rempli de MCP liquide (GV 23-26), ce dernier étant lui-même en immersion dans un bain thermostaté ("LABTECH", modèle LCB-11 D certifié ISO-9001) servant à chauffer le MCP pour le maintenir à l'état liquide. Les récipients à tamis en aluminium facilitent la manutention et l'égouttage des échantillons après leur imprégnation. Les taux de MCP absorbés par les LWA sont alors mesurés successivement pour 10, 20, 30, 60, 120 et 240 mn d'immersion, et pour des températures de MCP de 40, 60 puis 80°C.

Dans la technique de l'imprégnation sous vide, les échantillons, de 10 g et de diamètre compris entre 0,1 et 6 mm, sont placés à l'intérieur d'un erlenmeyer relié simultanément à une pompe à vide de 0,8 MPa (vide à 80%), à un manomètre, et à une burette graduée contenant le MCP liquide (GV 23-26 à 60°C) et équipée d'une vanne de régulation. La pompe à vide aspire l'air des LWA poreux avant imprégnation, la durée du pompage est fixée successivement à 30, 60 et 90 mn. Par suite, la valve de la burette est ouverte et le MCP liquide introduit dans l'erlenmeyer jusqu'à couvrir complètement les LWA, laissant faire l'imprégnation sur une période de 30, 60 ou 90 mn. En fin d'opération, la pompe à vide est arrêtée pour rétablir la pression atmosphérique dans l'erlenmeyer et permettre la pénétration complète du MCP dans les pores des LWA sous la poussée de l'air.

Après leur imprégnation, les échantillons sont étalés sur un papier absorbant pendant 24 heures, puis placés dans une étuve à 50°C pour enlever les résidus superficiels de MCP non absorbés par les matrices des LWA.

Le taux d'absorption moyen α_m (%) des LWA est déterminé par la pesée des échantillons avant et après leur imprégnation à l'aide d'une balance de précision ("OHAUS", Pioneer TM modèle PA64, incertitude : 10^{-4} g).

$$\alpha_m(\%) = (m_{(cLWA)} - m_{(LWA)}) 100 / m_{(LWA)}$$

Les résultats de ces mesures sont illustrés dans la *Figure 37* et la *Figure 38*.

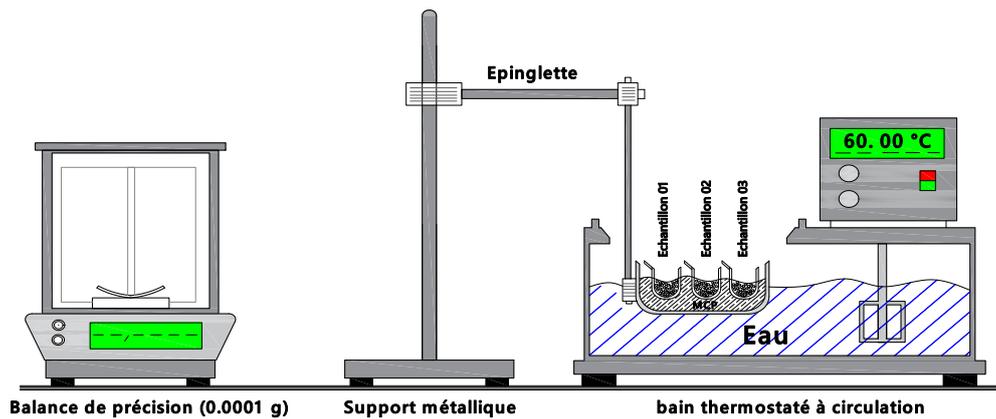


Figure 24. Montage expérimental pour l'imprégnation directe sous pression atmosphérique

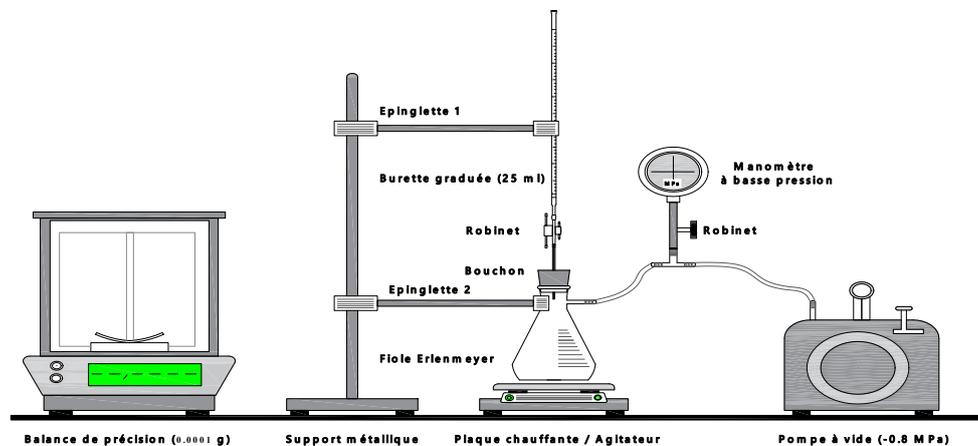


Figure 25. Montage expérimental pour l'imprégnation sous vide

3.2.2.2 Caractérisation du MCP et des CLWA

La compatibilité chimique des LWA avec le MCP de graisse végétale est analysée au spectromètre FTIR Perkin Elmer (modèle L1600107) (Figure 31) à température ambiante dans la gamme spectrale du nombre d'onde variant de 400 à 4000 cm^{-1} .

La morphologie des LWA et des cLWA est étudiée au microscope électronique à balayage (MEB) (Figure 26) tandis que les propriétés thermiques du MCP et des CLWA sont mesurées par calorimétrie différentielle à balayage (DSC, Perkin Elmer Diamond) (Figure 32) à une vitesse de chauffage/refroidissement de 5°C/min dans l'intervalle 10 - 50 °C.

3.3 Résultats et discussion

3.3.1 La microstructure des LWA et des CLWA

La Figure 27 représente les micrographies au microscope électronique à balayage des trois LWA non chargés - gel de silice, sépiolite et bentonite- et des cLWA produits. A partir de ces images, il apparaît clairement que ces trois matériaux ont des morphologies complètement différentes, avec des surfaces de formes et tailles irrégulières. Ainsi la bentonite est structurée en couches tandis que la sépiolite présente un aspect fibreux avec une surface

tout en cratères et reliefs. Enfin le gel de silice est un amorphe avec des protubérances régulières.

Bien que différents par leur structure, les micrographies confirment la nature poreuse des trois matériaux dont les matrices comportent de nombreux pores, favorables à l'infiltration des MCP en phase liquide. Avant leur imprégnation, on remarque que pour la sépiolite et la bentonite, les surfaces des matrices sont recouvertes de particules grossières, de formes aléatoires, disposées arbitrairement à travers la surface, laissant des espaces entre les couches de particules. Ces lacunes, bien profondes et isolées les unes des autres, sont un réceptacle favorable pour les dépôts éventuels de MCP. En effet la tension superficielle et les forces capillaires agissant entre les molécules de MCP et les particules de la matrice qui les entourent sont assez importantes pour empêcher l'exsudation de MCP de la surface du LWA. Sari [99], qui a traité le cas de la bentonite dans ses travaux de thèse, a prouvé le rôle important que ces éléments jouent dans l'augmentation de la compatibilité des composants et dans la durabilité structurelle de la matrice contre le problème d'exsudation des MCP fondus. Cependant une partie de la graisse végétale reste en surface de la bentonite et de la sépiolite et s'y dépose en formant des amas aléatoires sans pénétrer dans les pores inaccessibles de la matrice.

À l'inverse, dans la matrice du gel de silice, le MCP pénètre complètement jusqu'au remplissage de tous les pores ; il est uniformément réparti à l'intérieur de la matrice et aucun résidu n'est observé en surface. Ce matériau a une structure qui facilite grandement l'intercalation des MCP fondus tels que les graisses végétales.

Notons que l'aspect général des matrices prend une teinte légèrement plus foncée après imprégnation par le MCP.

Grâce à l'analyse MEB, nous avons une confirmation visuelle des charges en MCP pour chacun des LWA, et des indications sur la compatibilité de ces matrices avec la graisse végétale : bonne compatibilité pour le gel de silice et la sépiolite et relativement moyenne dans le cas de la bentonite qui s'explique par sa forme colloïdale et argileuse. Aussi le taux d'absorption enregistré pour ce LWA est plus faible par comparaison aux deux autres matériaux.



Figure 26. Microscope électronique à balayage (MEB) à l'IPREM de Pau

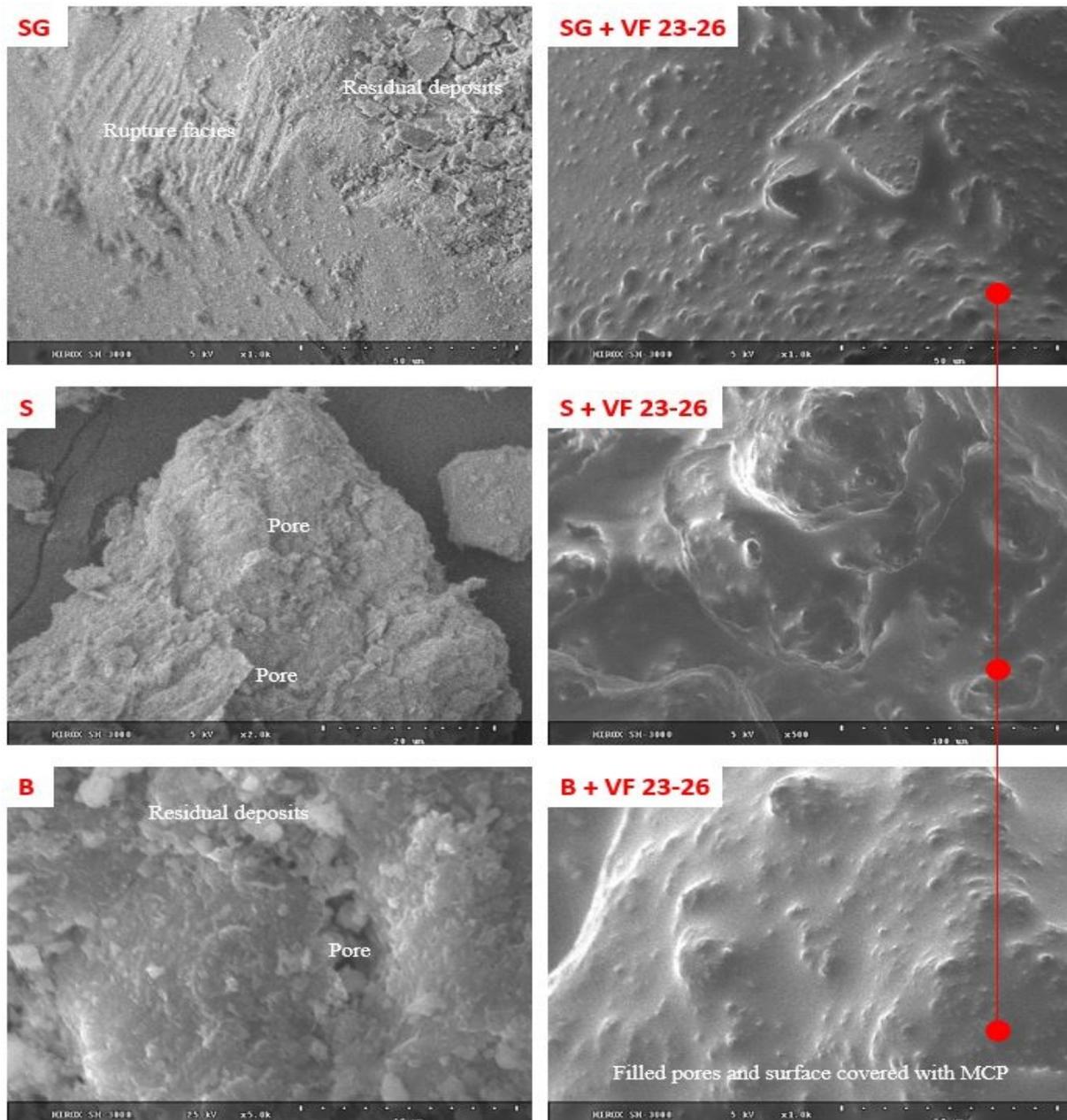


Figure 27. Micrographies des matrices (GS), (S), (B) et des CLWA (GS + VF 23-26), (S + VF 23-26), (B + VF 23-26)

3.3.2 Analyse de la stabilité chimique (FTIR)

La compatibilité chimique entre les composants des cLWA est étudiée à l'aide de l'analyse FTIR. La [Figure 28](#), la [Figure 29](#) et la [Figure 30](#) représentent les spectres d'absorption infrarouge du MCP (GV 23-26), des LWA (SG, S et B), et des CLWA dérivés : cLWA-SG, cLWA-S et cLWA-B.

Les spectres du MCP (VF 23-26), composé principalement d'acides gras, présentent une bande d'absorption à 3476 cm^{-1} en raison de la vibration d'étirement des groupes O-H. Les bandes d'absorption dans la région $2926\text{ cm}^{-1} - 2858\text{ cm}^{-1}$ sont le résultat de la vibration d'étirement symétrique et asymétrique des groupes fonctionnels de CH_2 . Les pics dans la

région 1746cm^{-1} - 1098cm^{-1} sont attribués aux vibrations d'étirement et d'étirement asymétrique des groupes C=O et C-O.

En ce qui concerne le gel de silice, il apparaît une large bande d'absorption entre 3750cm^{-1} et 3000cm^{-1} , causée par la vibration d'étirement des groupes -OH. La bande la plus intense se situe à 1094cm^{-1} et les deux autres pics à 800cm^{-1} et à 468cm^{-1} ; elles sont dues à l'étirement asymétrique de la liaison Si-O-Si.

Les principaux pics du spectre de la bentonite sont situés entre 3400cm^{-1} et 3650cm^{-1} et autour de 1600cm^{-1} , et sont attribués à la vibration d'étirement du groupement O-H et à la vibration de flexion par rapport à l'eau dans les structures de la bentonite. Il existe également d'autres bandes caractéristiques telles que la vibration asymétrique Si-O-Si et les vibrations de flexion autour des pics de 1050cm^{-1} et 500cm^{-1} [99], [100], [148], [149].

La spectroscopie FTIR de la sépiolite montre deux grandes bandes à 3580cm^{-1} et 3400cm^{-1} et un pic à 1648cm^{-1} dû à la vibration d'étirement du groupe O-H. La bande de 1016cm^{-1} est considérée comme étant due aux vibrations d'étirement asymétriques et symétriques du Si-O-Si. Les petits pics entre 600cm^{-1} et 400cm^{-1} représentent les vibrations de flexion des groupes $\text{Mg}_3(\text{OH})$ et Si-O-Si.

L'interprétation de ces bandes caractéristiques a été faite selon l'analyse FTIR disponible dans la littérature [103], [104], [150], [151] pour le gel de silice, [101], [102], [152] pour la sépiolite, et [99], [100], [148], [149], [153] pour la bentonite.

L'analyse des spectres d'absorption des cLWA et leur comparaison avec les spectres des LWA (SG, S ou B) et des MCP montrent que les pics d'absorption coïncident parfaitement, c'est-à-dire que les cLWA ne contiennent que les pics caractéristiques des MCP et des LWA, et ne laissent apparaître aucun nouveau pic. Ce résultat est significatif ; il permet de conclure l'absence de toute interaction significative entre le MCP et les LWA ; les mélanges sont donc purement physiques, confirmant la bonne compatibilité des trois matériaux avec la graisse végétale.

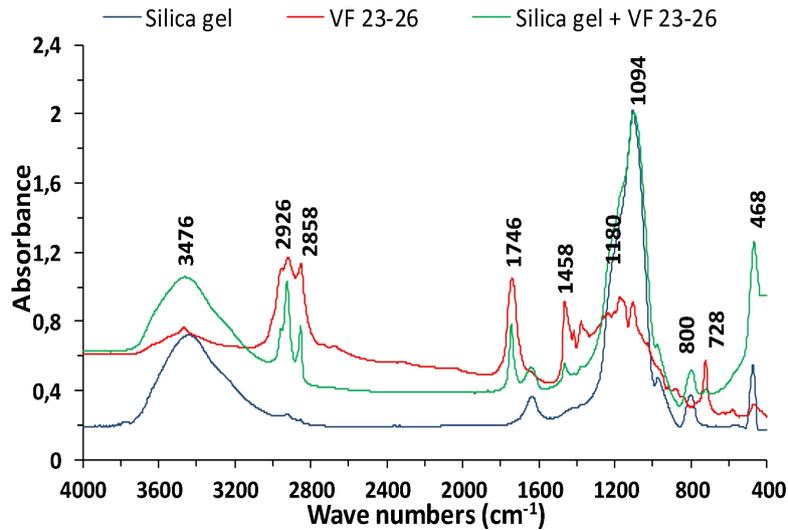


Figure 28. Spectre FTIR du cLWA-SG

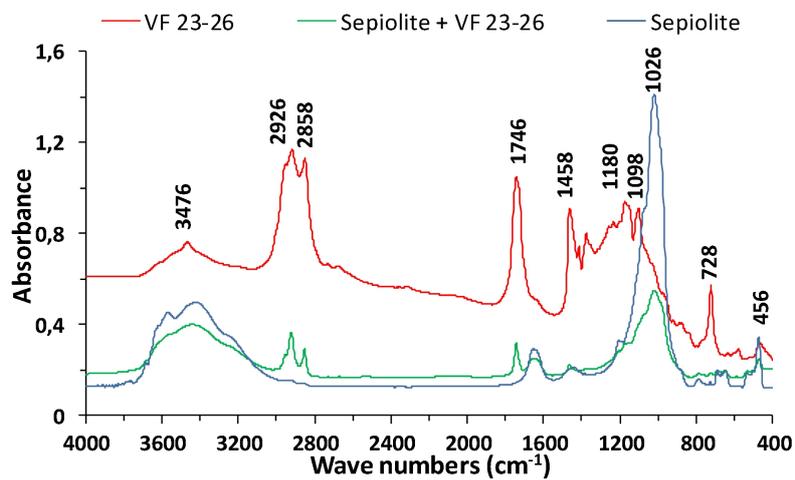


Figure 29. Spectre FTIR du cLWA-S

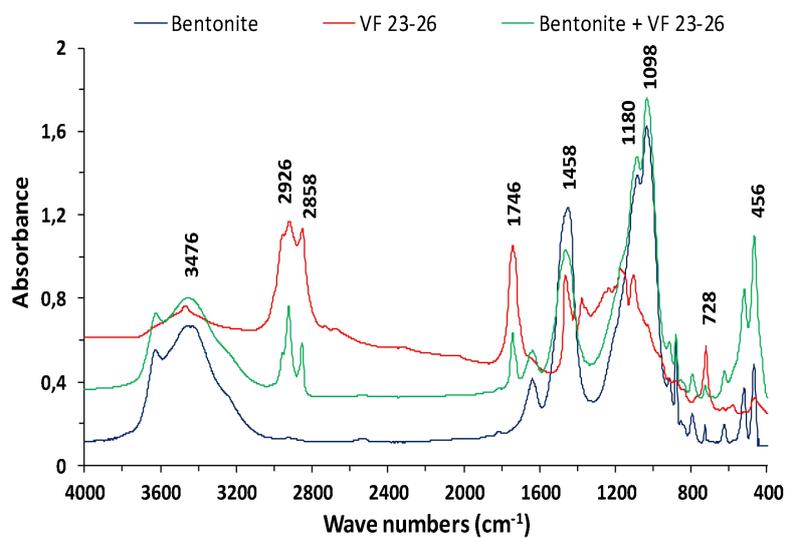


Figure 30. Spectre FTIR de cLWA-B

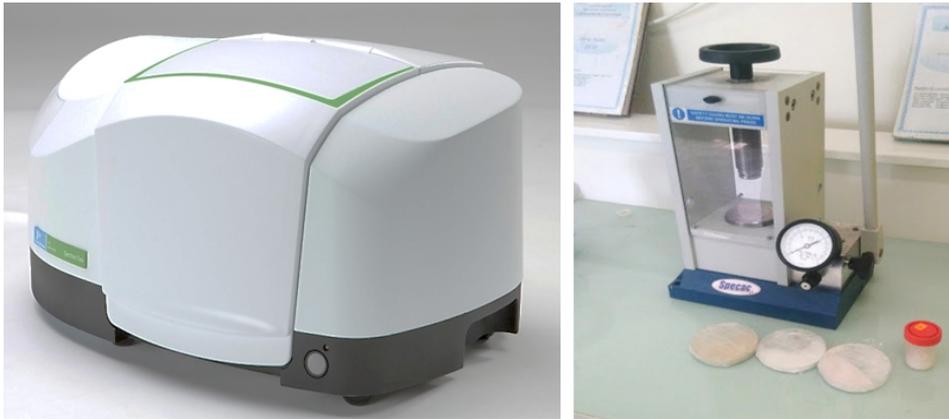


Figure 31. Appareil FTIR (Perkin Elmer) et presse à échantillons

3.3.3 Caractérisation thermique à la DSC

La DSC est une technique d'analyse thermique qui mesure les différences des échanges de chaleur entre un échantillon à analyser et une référence. Il est possible d'en retirer différentes informations, comme la température de fusion, la chaleur spécifique et la chaleur latente de changement de phase. Dans un premier temps, les MCP pur et composite sont analysés avec le DSC Pyris Diamond de Perkin Elmer (Figure 32). Les expériences sont réalisées avec des creusets en aluminium (Figure 32), sous atmosphère N_2 . Le protocole expérimental est organisé comme suit :

- un balayage en mode dynamique avec une rampe de chauffage rapide à $10Kmin^{-1}$ de $5^\circ C$ à $30^\circ C$ suivi d'un plateau de 10 min et ensuite une rampe de refroidissement aux mêmes conditions.
- trois séries de balayages dynamiques avec chauffage et refroidissement à $0,5Kmin^{-1}$, avec des plateaux de 10 min entre chacun d'eux.
- un balayage isotherme avec un échelon de température de 1K et une vitesse de chauffage de $0,5Kmin^{-1}$. Les courbes DSC sont présentées sur la Figure 33, la Figure 34, la Figure 35 et la Figure 36. L'intégration de la surface sous le pic conduit à l'estimation de la chaleur latente de liquéfaction $L_M = 77 \pm 13 \text{ kJ kg}^{-1}$. Avec le mode Step, on trouve une valeur de $92,2 \text{ kJ kg}^{-1}$, ce qui est en bon accord avec les mesures précédentes.



Figure 32. Appareil DSC (Perkin Elmer), cellules en aluminium et balance de précision 10^{-9} g (de gauche à droite)

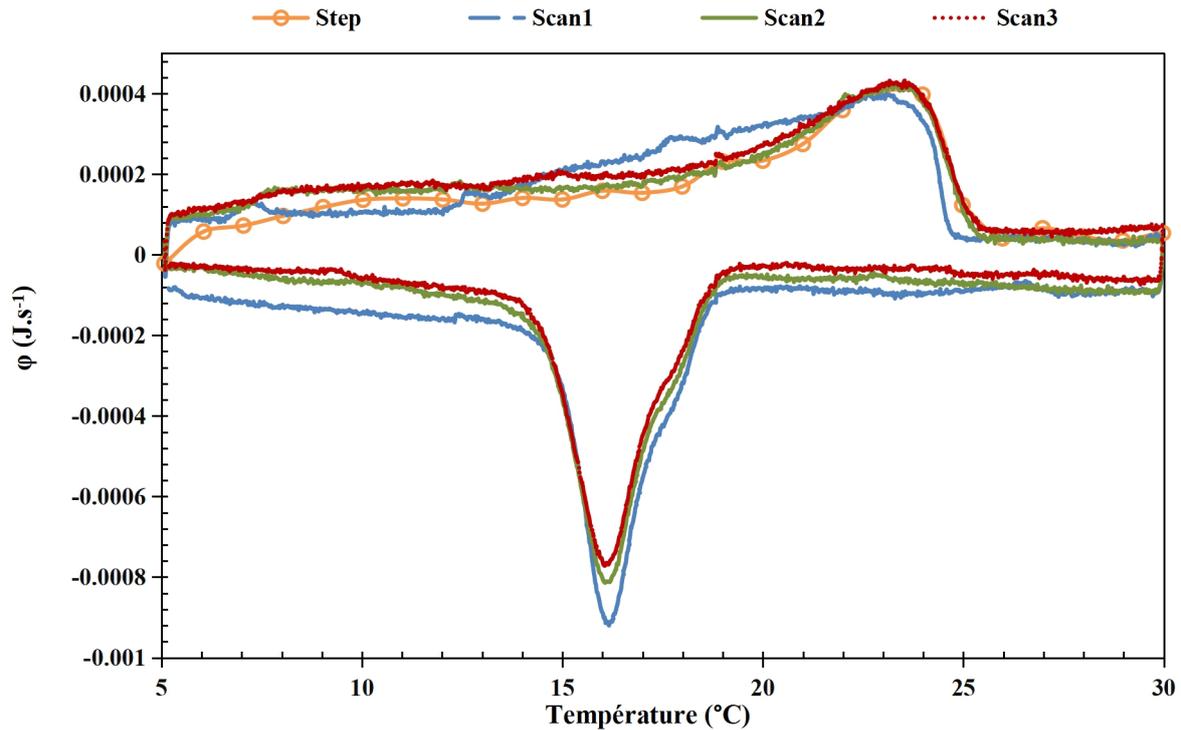


Figure 33. Courbes DSC de la GV 23-26

Les thermogrammes de refroidissement montrent des pics prononcés correspondant à la température de cristallisation exothermique. Ils sont de 16.2 °C pour la GV 23-26, 17.6 °C pour la GV 26-26-GS, 17.7 °C pour la GV 23-26-S et 17 °C pour la GV 23-26-B. Les thermogrammes de chauffage montrent un pic arrondi, avec une transition douce de l'état solide vers l'état liquide s'étalant de 16 °C à 26 °C environ, caractéristique des substances non pures. Ils se situent autour de 24 °C pour les quatre matières testées. Par ailleurs, la chaleur latente des MCP composite GV 23-26-GS, GV 23-26-S et GV 23-26-B est inférieure à celle de la GV 23-26. La raison en est que la fraction massique de la GV 23-26 dans le composite est limitée à la capacité maximale d'absorption de chaque matrice, en sachant que la chaleur latente du MCP composite est fournie par la GV 23-26. Cependant, l'utilisation à grande échelle et en grande quantités du MCP composite dans notre étude rend possible l'utilisation d'un MCP composite ayant une valeur très importante de chaleur latente.

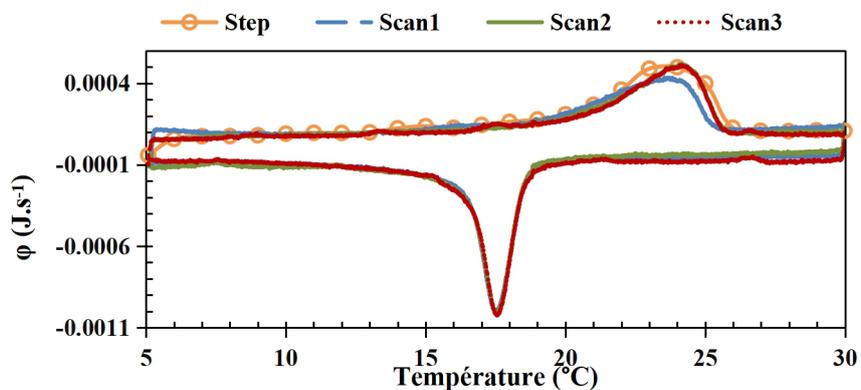


Figure 34. Courbes DSC de la GV 23-26-GS

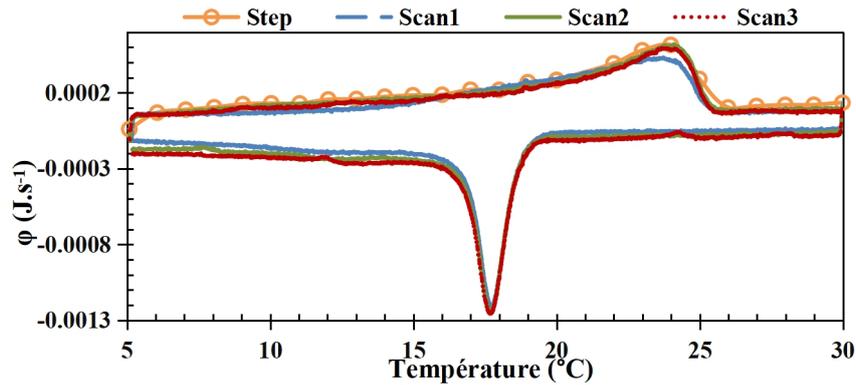


Figure 35. Courbes DSC de la GV 23-26-S

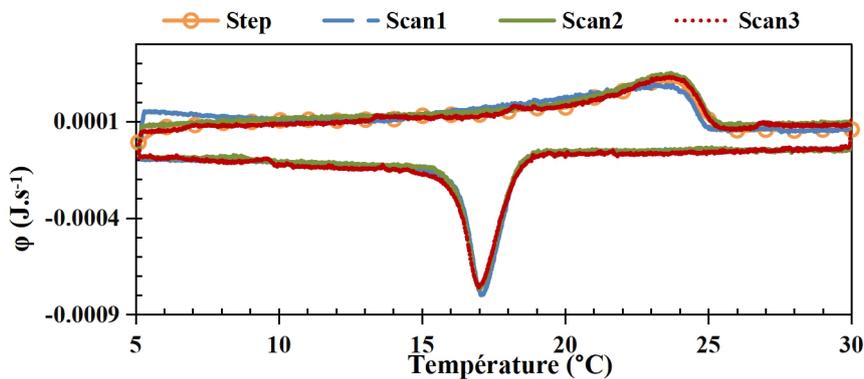


Figure 36. Courbes DSC de la GV 23-26-B

La DSC est une technique de caractérisation thermique intéressante. Cependant, elle présente des désavantages quant aux essais thermiques de plus grande envergure. En effet, la petite quantité de MCP contenue dans la capsule ne permet pas de rendre compte de l'inertie thermique réelle d'un matériau de construction ou panneau à base de MCP. D'autres techniques expérimentales plus adaptées ont été mis au point à cet effet. Elles feront l'objet des chapitres suivants.

3.3.4 Imprégnations

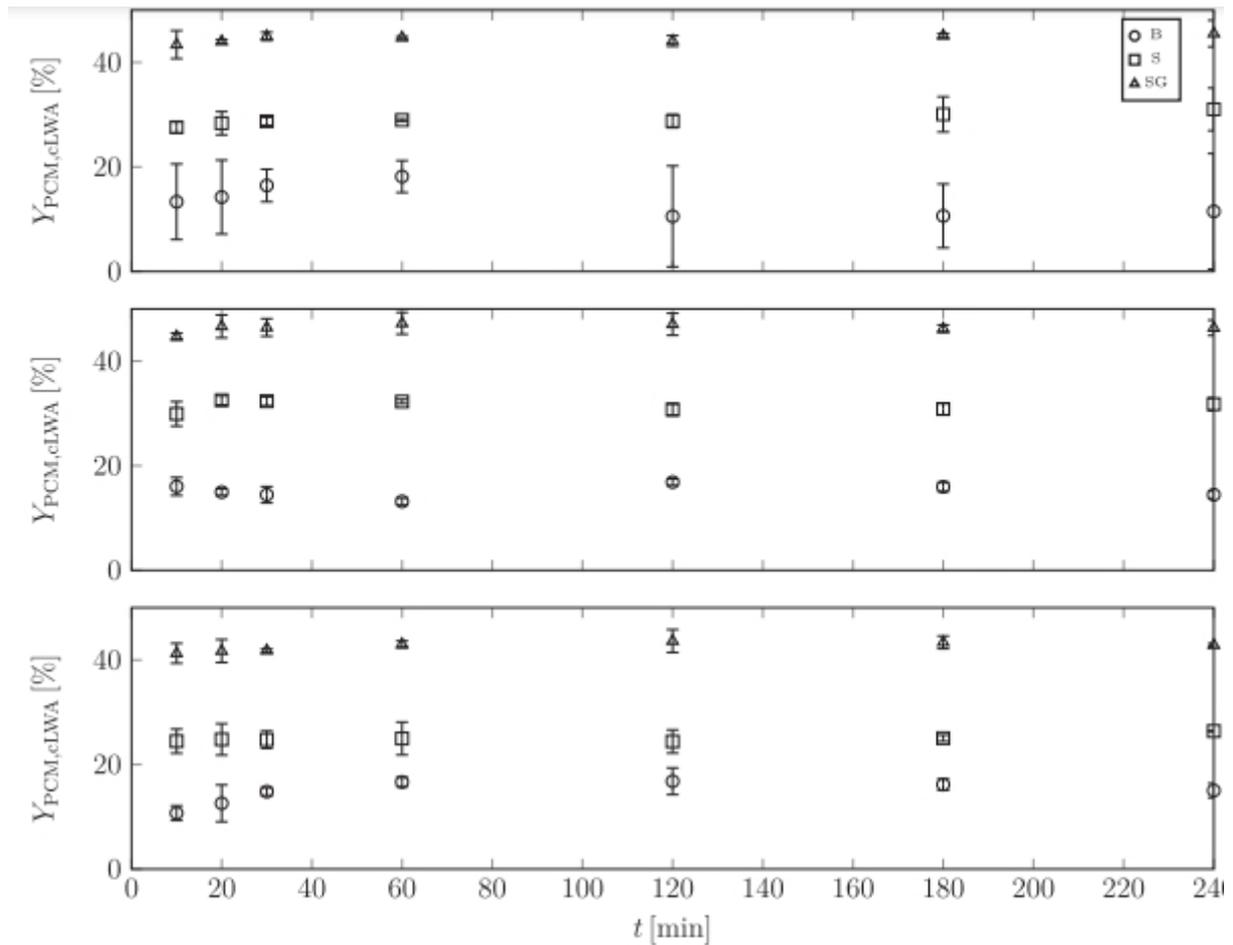
Comme le montre la [Figure 37](#) relative à l'imprégnation à pression atmosphérique, la capacité d'absorption maximale du MCP pour un MCP à 40 °C est atteinte après 120 min pour le gel de silice et la bentonite avec respectivement 77,40 m% et 20,20 m%, et après 240 min pour la sépiolite avec 35,90 m%. Lorsque le MCP est fondu à 60°C, le temps d'imprégnation optimal est plus court pour le gel de silice- 89,60 m% après 60 min- et la sépiolite 48,20 m% en 20 min et ne change pas pour la bentonite,120 min avec 20,30 m%. À 80 °C, la capacité d'absorption maximale pour le gel de silice et la sépiolite est atteinte après 240 min avec un taux d'absorption, respectivement de 83,50 m% et 45 m% ; ce temps est de 60 min pour la bentonite avec 22,20 m%. Les capacités d'absorption les plus élevées sont enregistrées à 60 °C avec le gel de silice et la sépiolite (89,60 m% et 48,20 m%) et à 80 °C avec la bentonite (22,20 m%).

Étant donné que l'air contenu dans les pores des LWA est un frein pour leur remplissage par le MCP, l'idée est de l'en évacuer pour augmenter la capacité des matrices. C'est ainsi que

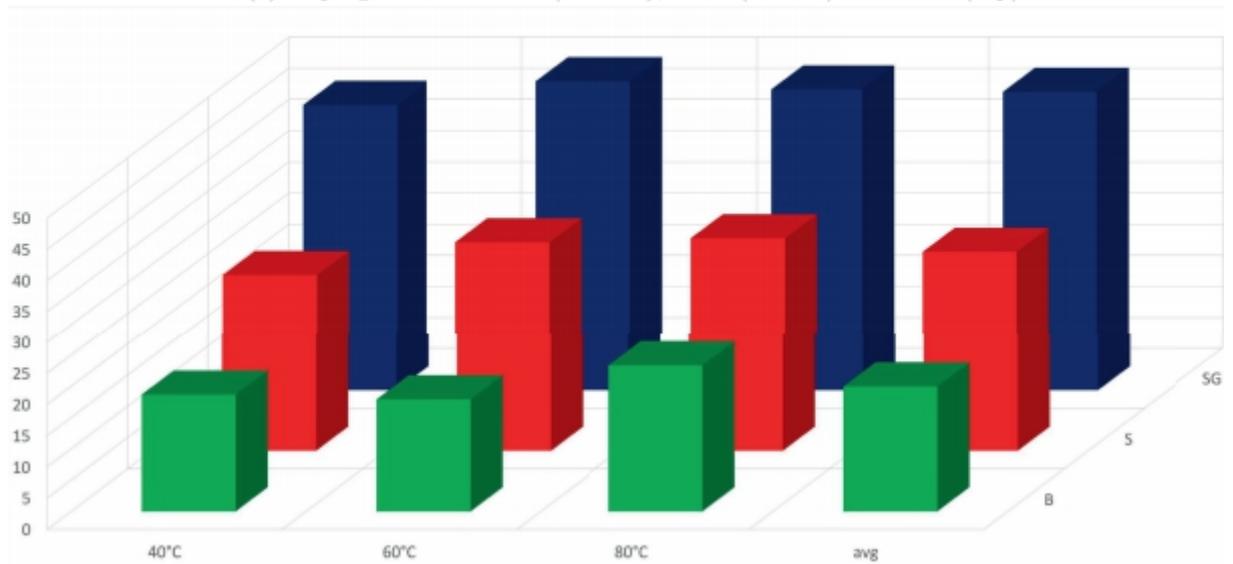
ces mesures ont été répétées en plaçant les échantillons dans une enceinte sous vide. Ces expériences sont menées avec des tailles de grains variables pour tester la sensibilité de l'absorption des matrices à ce paramètre.

La lecture des résultats de la *Figure 38*, montre que le vide créé lors du mélange LWA-MCP a une influence positive sur la capacité d'absorption des LWA ; ce gain étant plus marqué lorsque la taille des grains est réduite. Ainsi, sous forme de poudre ($0 < D \leq 0,1$ mm), la capacité d'absorption à 60 °C atteint 126,8 m% pour le gel de silice après 90 minutes et 57 m% pour la sépiolite après 60 minutes. Pour faire le vide dans l'enceinte, 30 min de pompage suffisent avant l'imprégnation des poudres.

Les taux d'absorption sont très différents d'une matière à une autre ; ils sont dépendants d'une multitude de paramètres, spécifiques à la matière tels que la densité, la géométrie et connectivité de la structure poreuse, la force capillaire et surface spécifique, ou en relation avec les caractéristiques du MCP absorbé : viscosité, tension superficielle, température et pression [106]. De faibles capacités d'absorption à 40°C et 80°C sont observées. Elles sont dues à la forme encore visqueuse et pas suffisamment liquide du PCM à 40°C et inversement, à sa trop grande fluidité à 80°C, ce qui engendre des pertes après chargement dans les pores par écoulement vers l'extérieur. Notons que ces mêmes conclusions ont été faites par Sukontasukkul et al [140]. Les facteurs qui jouent un rôle important dans la détermination de la quantité de graisse absorbée par les matrices poreuses sont la viscosité du MCP, liée à sa température, ainsi que le temps d'imprégnation. En fait, plus la température est basse et plus il faut rallonger le temps d'imprégnation pour atteindre le même niveau d'absorption, comme l'indique la *Figure 37*. Bien que du vide ait un effet quelque peu favorable à l'absorption des MCP par les trois matrices lorsqu'elles sont réduites en poudre fine, cette technique, pour des raisons pratiques, n'a pas été utilisée dans nos travaux ultérieurs. L'analyse des résultats montre une sensibilité à la température du MCP plus importante pour le gel de silice et la sépiolite. Pour la bentonite, le taux de remplissage varie peu avec le temps et la température sauf à 80°C et après 60 mn, où on note une chute de ce taux, probablement due à la forme argileuse et colloïdale de la bentonite. La durée et la température d'imprégnation optimales pour les trois matrices sont respectivement de 30 minutes et de 60 °C.

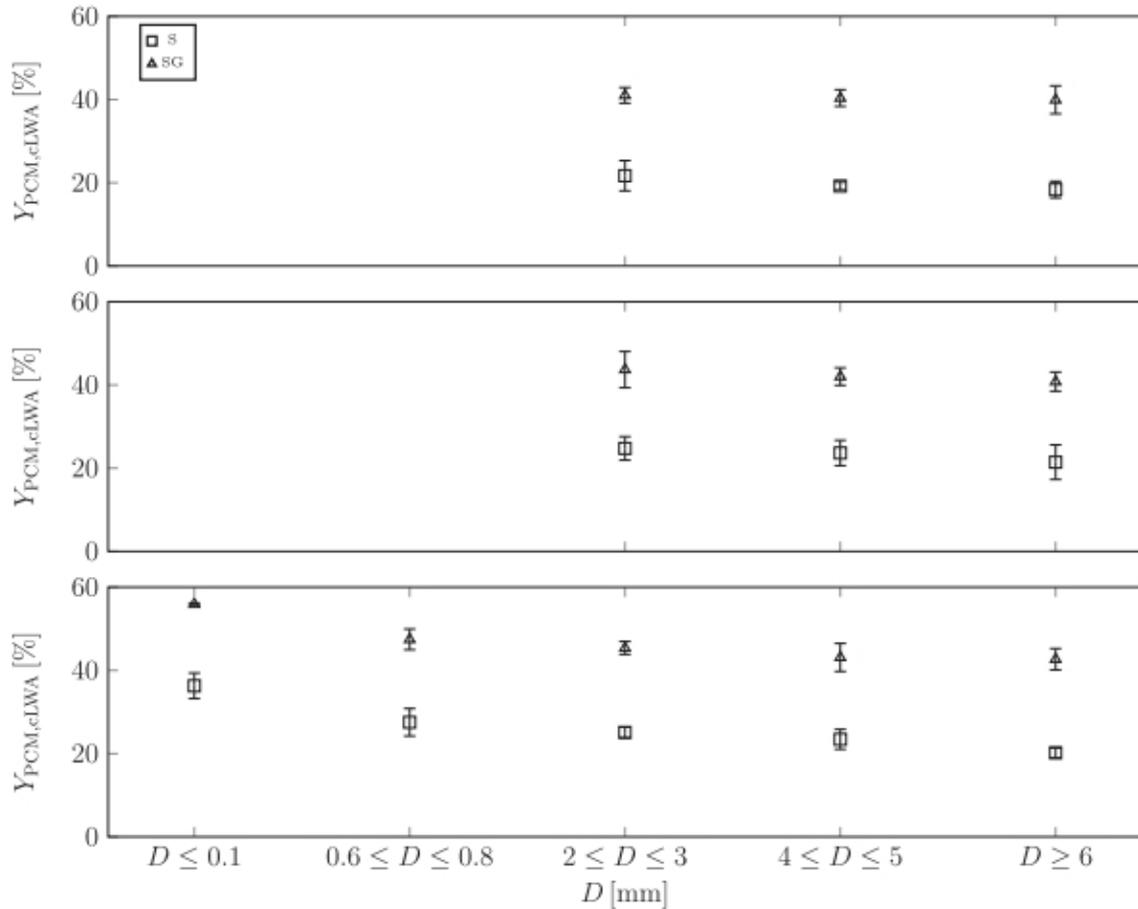


(a) Impregnation at 40°C (bottom), 60°C (middle) and 80°C (top)

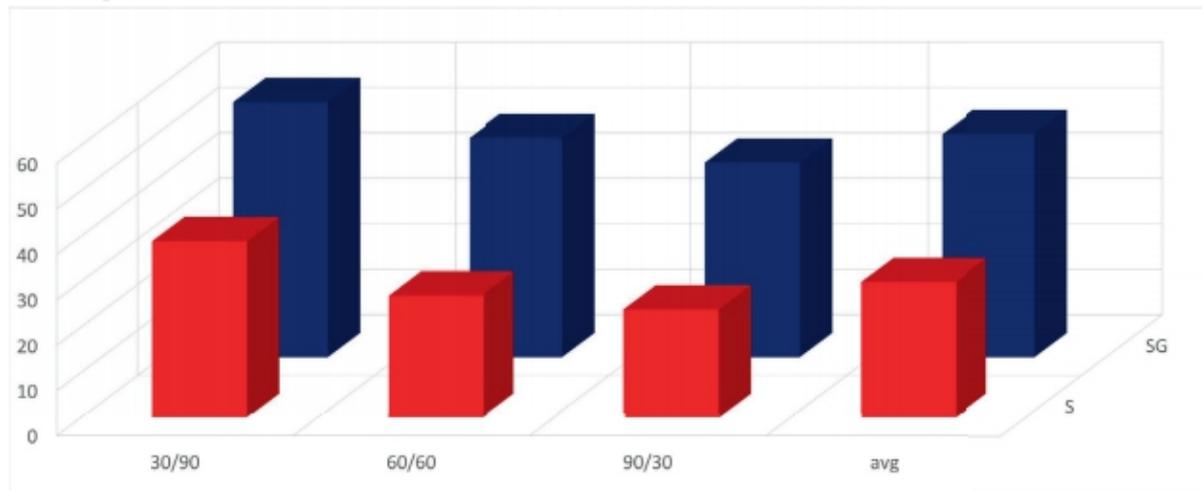


(b) Maximum values

Figure 37. Taux d'imprégnation directe en fonction du temps et de la température



(a) Impregnation with 30/90 min (bottom), 60/60 min (middle) and 90/30 min (top) durations of the two vacuum phases



(b) Maximum value

Figure 38. Taux d'imprégnation sous vide en fonction du temps et du diamètre des grains

3.4 Conclusion

Le début de ce chapitre est consacré à l'étude de la structure des bétons imprégnés par des observations microscopiques au MEB. Elles ont révélé une structure poreuse de ces bétons en donnant une image qui peut expliquer la capacité de chacun des LWA à se charger en

MCP. Des taux que les expériences d'imprégnation des matrices ont donné importants pour le gel de silice et la sépiolite et relativement faible dans le cas de la bentonite de par la forme colloïdale et argileuse de sa structure, des performances que la technique de l'imprégnation sous vide peut améliorer sous certaines conditions, notamment de travailler avec des matériaux de faible granulométrie.

Par suite, et pour vérifier la compatibilité des matériaux utilisés comme matrices avec le MCP qu'elles doivent recevoir et contenir, des échantillons imbibés sont soumis à une analyse des spectres d'émission par la méthode FTIR ; cette étude a clairement confirmé la bonne compatibilité des trois matrices minérales (gel de silice, sépiolite et bentonite) avec la graisse végétale utilisée.

Les propriétés thermo physiques des MCP et des bétons sont enfin analysées. La technique de la DSC est utilisée pour mesurer la température de fusion et la chaleur latente de fusion du MCP, une graisse végétale, qui s'établit autour de 90 J/g, une valeur assez intéressante par rapport au niveau peu élevé de son coût sur le marché. Ces mêmes propriétés sont évaluées sur les matrices minérales saturées en MCP.

4

**ÉLABORATION DES BÉTONS, TESTS
MÉCANIQUES ET THERMIQUES**

4 Élaboration des bétons, tests mécaniques et thermiques

4.1 Introduction

Dans ce chapitre est décrite la méthode générale suivie pour l'élaboration des bétons ordinaires (Concrete-Reference ; C-R) et la mise en œuvre particulière pour les mélanges des bétons composites (Thermal Energy Storage Concrete ; TESC) ; y sont également détaillées les techniques de caractérisation des différents échantillons. L'objectif principal visé dans cette partie préliminaire mais importante de nos travaux de recherche est d'arriver à une composition adéquate pour les plaques de béton imprégné de MCP, un mélange qui réaliserait le meilleur compromis entre une résistance mécanique suffisante et des caractéristiques thermiques performantes ; un échantillon idéal, qu'il faudrait charger du plus grand volume possible de matériau à changement de phase, avec une limite imposée par une résistance mécanique qui ne devrait pas s'effondrer au-dessous des normes requises. Il existe plusieurs méthodes pour déterminer les proportions, en volume ou en masse, des éléments entrant dans la composition d'un béton usuel. Dans nos travaux, et notamment pour la formulation de nos mélanges béton - MCP [130] nous avons opté pour la méthode de Dreux-Gorisse ; cette méthode est la mieux adaptée et en tout cas la plus suivie pour ce type de mélange (MCP Micro ou macro encapsulé ou cLWA⁹), voir les travaux de [66], [131]–[134] et autres.

La démarche expérimentale suivie comporte deux volets. Dans une première phase, un échantillon de béton ordinaire est produit pour servir d'étalon de référence, puis soumis à une série d'essais de résistance mécanique à la compression et à la flexion. Ces mesures, outre le fait de nous rassurer sur la fiabilité des instruments et appareils de mesure utilisés, ont pour but de vérifier que le béton préparé est conforme aux normes de résistance tels que définies par la réglementation en vigueur et textes de lois. C'est par comparaison avec les caractéristiques mécaniques de cet échantillon que nous allons analyser et classer les mélanges de béton-MCP.

Trois scénarii d'ajout de CLWA sont envisagés pour la confection des TESC, le premier par ajout direct au béton et les deux autres par substitution aux agrégats. Les compositions ainsi formulées sont toutes soumises aux essais de résistance mécanique tandis que l'un de ces échantillons, le TESC-S25-b, subira en plus, les tests après vieillissement accéléré, en chambre climatique ou sous conditions réelles, pour évaluer l'influence sur ses propriétés mécaniques des changements de phase répétés du MCP qu'il contient. Le *Tableau 15* est un résumé des résultats de ces mesures. Il faut préciser que les LWA utilisés pour produire les cLWA résultent d'une imprégnation pendant une durée de 30 minutes par des MCP portés à 60 °C.

⁹ cLWA : Composite Lightweight Aggregate

La plupart des études ont montré que l'ajout de cLWA améliorait les propriétés thermiques du béton mais en contrepartie l'addition de graisses au béton a un effet négatif sur sa résistance mécanique, [57], [60], [89], [110], [112], [135]–[140].

L'intérêt de ces mesures est de faire un tri des échantillons testés et de retenir celui qui montre la plus faible diminution de résistance mécanique par tout en comportant le plus grand volume de cLWA (le TESC-S25-b). C'est précisément cette composition qui fera l'objet dans la suite de nos travaux d'analyses thermiques larges et à double échelle (mesures directes sur les plaques et performances dans les cellules-test).

À une échelle macroscopique, le dispositif dit des plaques chaudes gardées est utilisé pour quantifier expérimentalement la conductivité thermique, les capacités thermiques spécifiques et les quantités de chaleur stockées. Les tests ont concerné des échantillons de béton ordinaire, de béton contenant de la sépiolite et du béton contenant de la sépiolite imbibée de graisse en phase liquide puis en phase solide. Ces expériences ont montré que l'ajout de MCP au béton lui permet de stocker un peu plus d'énergie thermique, tout en lui donnant une conductivité thermique plus faible. Ces résultats combinés à une densité réduite du fait de la substitution du sable par la sépiolite dans la composition des bétons, sont très intéressants dans la perspective de l'amélioration simultanée de l'inertie et de l'isolation thermiques des parois avec une réduction d'environ 14% de leur poids.

Tableau 15. Récapitulatif des caractérisations effectuées sur les échantillons

Type de béton	Âge de caractérisation		
	Jeune âge	Moyen et long terme	Vieillessement
C-R	X	✓	X
TESC-B20-a			
TESC-B30-a			
TESC-B15-b	X	✓	X
TESC-B25-b			
TESC-B20-c			
TESC-B30-c			
TESC-S20-a			
TESC-S30-a			X
TESC-S15-b	X	✓	
TESC-S25-b			✓
TESC-S20-c			X
TESC-S30-c			
TESC-SG20-a			
TESC-SG30-a			
TESC-SG15-b	X	✓	X
TESC-SG25-b			
TESC-SG20-c			
TESC-SG30-c			

4.2 Élaboration des bétons ordinaires

4.2.1 Formulation

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de la partie de l'ouvrage en cause [130]. Comme signalé en introduction, une méthode pratique et simplifiée, dite « Dreux-Gorisse » [130], est utilisée pour l'élaboration du béton ordinaire (vibré) ; elle permet d'arriver rapidement à une formule du béton appropriée à la nature de ses constituants. Concrètement, elle permet de déterminer les dosages volumétriques ou de préférence pondéraux, le passage de l'un à l'autre pouvant toujours se faire si nécessaire par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac [130]. Le mode opératoire est rappelé pour information ci-après.

4.2.2 Critères de résistance, réglementations et normes

Selon le DTU 21 (NF P18-201), (*Travaux de bâtiment - Exécution des ouvrages en béton Cahier des clauses techniques*, paragraphe 4.5.3. *Résistance caractéristique attribuable a priori au béton de l'ouvrage*) [141], la résistance, caractéristique maximale en compression à 28 jours attribuable a priori aux bétons à composition prescrite dans la présente norme sans justification par essais et pouvant être prise en compte dans le calcul des ouvrages, est plafonnée en fonction du dosage en ciment et pour des échantillons de forme cylindrique ou cubique à la valeur suivante (*Tableau 16*) :

Tableau 16. Résistance caractéristique minimale du béton en compression à 28 jours selon le dosage en ciment et la forme de l'échantillon selon le DTU 21 (NF P18-201)

Dosage en ciment (kg/m ³)	R ₂₈ (MPa)	
	Échantillon cylindrique	Échantillon cubique
400	20	25
350	16	20
300	12	15
250	8	10

Dans le document technique réglementaire algérien (D.T.R. BE 2.3) exposant les *règles générales pour la fabrication, le transport et la mise en œuvre des murs extérieurs en panneaux préfabriqués* [142], il est stipulé que la confection des bétons doit répondre aux prescriptions générales des règles du béton armé (conception et exécution) qu'on retrouve dans le D.T.R. BE 2.1 Règles d'exécution des travaux de construction d'ouvrages en béton armé [143]. Dans son paragraphe 4.9., Résistance caractéristique maximale du béton, il est dit que pour les ouvrages de catégorie A ou B (Chantiers à très petite et petite importance), il est imposé, à défaut de justification spéciale, de supposer a priori que la résistance caractéristique du béton pris en compte au niveau de la conception est au plus (*Tableau 17*) :

Tableau 17. Résistance caractéristique du béton en fonction du dosage de ciment et de la catégorie de l'ouvrage selon le DTR BE 2.1

Dosage en ciment (kg/m ³)	Catégorie	R ₂₈ (MPa)
350	A	16
	B	18
400	A	20
	B	22.5

En cas de justification spéciale, la résistance caractéristique du béton R₂₈ est au plus de :

Tableau 18. Résistance caractéristique du béton en fonction du dosage en ciment en cas de justification spéciale

Dosage en ciment (kg/m ³)	R ₂₈ (MPa)
350	20
400	25

En récapitulatif et conformément à l'article 5.5.1.2 de la norme NF EN 206+A1 *Béton Spécification, performances, production et conformité* [144], pour des structures portantes, le béton doit être formulé pour qu'à 28 jours sa résistance moyenne caractéristique en compression (R'₂₈) soit égale ou supérieure à la résistance à la compression caractéristique minimale de la classe de résistance à la compression spécifiée (R₂₈). Dans certains cas [130], il est spécifié que cette valeur doit être supérieure de 15% à la résistance minimale en compression (R₂₈) nécessaire à la stabilité de l'ouvrage ; soit R'₂₈ ≥ 1.15 R₂₈.

Pour le choix de la classe de résistance d'un produit préfabriqué en béton armé ou en béton précontraint, la norme européenne NF EN 13369 : *Règles communes pour les produits préfabriqués en béton*, dans son paragraphe 4.2.2.1. *Classe de résistance* [145], stipule que la classe minimale de résistance du béton doit être égale à :

- C20/25 dans le cas des produits préfabriqués en béton armé ;
- C30/37 dans le cas des produits préfabriqués en béton précontraint ;
- LC16/18 lorsque du béton léger est utilisé, pour les produits préfabriqués aussi bien en béton armé qu'en béton précontraint.

En effet, la consultation d'un certain nombre de fiches techniques de produits¹⁰ de murs en béton préfabriqué brut (non composite) certifiés par le CERIB¹¹, nous renseigne sur quelques caractéristiques dont leurs valeurs de résistance mécanique. Ces dernières s'établissent dans une fourchette de valeurs allant de 30 MPa à 60 MPa pour le cas de murs en béton précontraints et autour de 25 MPa pour les murs en béton armé ordinaire. À titre d'exemple, nous pourrions citer l'Inov'Mur⁽ⁱ⁾ qui est un mur à coffrage et isolation intégrés avec une classe de résistance de C40/50 et une résistance à la compression du béton préfabriqué utilisé de 35 MPa au minimum à la livraison et de 25 MPa pour le béton de remplissage. Il y a aussi le Prémur Rector® dont les classes de résistance des bétons couramment utilisées varient de C25/30 à C50/60. La résistance minimale en compression du béton du deuxième

¹⁰ Murs des établissements Gallaud, Cibetec, Capremib, Eurobéton France, l'Id Bat production, Delta préfabrication, Alkern Nord, Rector...etc.

¹¹ CERIB, Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton. Organisme certificateur.

voile préfabriqué doit être de 20 MPa sur cube de 10 cm³ à la première manutention, quelle que soit la résistance finale du béton utilisé.

Pour nos travaux, compte tenu des normes et des documents techniques algériens, européens et français et au regard du domaine d'application non structural du béton ainsi que la nature et dimensions de nos échantillons et cellules-test, l'option d'une formulation de classe C20/25 est la plus appropriée. Ce qui signifie que dans le cas de l'utilisation d'échantillons cylindriques pour des essais expérimentaux, la résistance à la compression désirée du béton témoin à 28 jours est : $R_{28} = 20$ MPa et $R'_{28} = 23$ MPa. Pour les échantillons rectangulaires, forme des échantillons de nos essais, elle sera de $R_{28} = 25$ MPa et $R'_{28} = 28.75$ MPa.

En supposant que l'ajout d'un MCP au béton réduira sa résistance à la compression, l'identification d'un seuil limite minimal de résistance paraît nécessaire. À cet effet, le document technique réglementaire D.T.R. - B.C. 2-41 *règles de conception et de calcul des structures en béton armé* (C.B.A. 93) [146], qui stipule dans son article A.2.1.1.4 *Résistance minimale du béton* que « la résistance caractéristique minimale f.c 28 doit être de 15.MPa quand on utilise des aciers de haute adhérence et 12 MPa lorsque l'on utilise des aciers lisses. En deçà de ces limites les structures concernées ne peuvent être considérées comme étant du béton armé. Aussi, par analogie aux exemples de caractéristiques physico-mécaniques des constituants de maçonnerie contenus en annexe II du D.T.R. C 2.45 *règles de conception et de calcul des maçonneries* [147] et au regard de leur usage de murs de parement et non portant, la résistance minimale acceptable à la compression que nous ciblons sera limitée à 15 MPa.

À ce stade, il est nécessaire de préciser la différence fondamentale qu'il y a entre les notions de « résistance du mur » et « résistance du matériau ». Certains auteurs déterminent la résistance du mur à l'aide d'éprouvettes de hauteur d'étage, tandis que d'autres utilisent des petites éprouvettes. Dans le premier cas, la résistance obtenue est celle du mur. Elle est directement utilisable car elle intègre l'influence de l'élancement. Dans le second cas, on obtient la résistance du matériau dans le but de l'utiliser dans des méthodes théoriques à l'aide desquelles seront introduites les influences de l'excentricité et de l'élancement. Ces méthodes sont établies dans l'hypothèse de la connaissance de la résistance à la compression simple d'un matériau homogène.¹²

En règle générale, la résistance à la compression de la maçonnerie varie comme la racine carrée de la résistance normale des briques et comme la racine cubique ou quatrième de la résistance à la compression du mortier.

En définitive, la classe de béton voulue est C20/25 et la résistance moyenne visée pour le béton témoin à 28 jours : $R'_{28} = 1.15 \times 25$, ce qui donne donc :

$$R'_{28} = 28.75 \text{ MPa}$$

¹²Mourad Lateb. Calcul de la capacité portante des murs en maçonnerie de petits éléments sous charges verticales. Mécanique des structures [physics.class-ph]. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995. P.

En définitive, la formulation du béton témoin obtenue suite à l'utilisation de la méthode de Dreux-Gorisse (annexe) est consignée dans le [Tableau 19](#).

Tableau 19: Formulation volumique et en massique du béton témoin

	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/16	Eau	Ciment
Volume (L/ m ³ de béton)	233.55	85.68	371.75	200	129.03
masse (kg/m ³ de béton)	623	228	991	200	400

4.2.3 Essais mécaniques d'études (sur les échantillons témoins)

Les essais mécaniques normalisés concernent des essais simples de compression et de flexion. Trois éprouvettes normalisées sont prévues pour chaque essai.

Pour déterminer la valeur moyenne de la résistance mécanique, les tests sont réalisés sur des éprouvettes de béton coulées dans des moules de section carrée (un cube de 10 cm de côté pour la compression et un prisme de 7 x 7 x 28 cm³ pour la flexion) et âgées de 28 jours. Ces éprouvettes (visibles sur la [Figure 40](#)) sont maintenues pendant 24h à une température de 20 ± 5 °C avant d'être démoulées. Elles sont par la suite entreposées dans un bac rempli d'eau à 20 ± 2°C puis séchées sur une durée de 24h à température ambiante avant l'opération d'écrasement.

Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture sur deux machines pour essai de compression et de flexion (Autotest d'International ELE et Elib-200W d'IBERTEST, visibles sur la [Figure 42](#), la [Figure 41](#), la [Figure 43](#) et la [Figure 39](#)), sans surfaçage des faces d'appui des éprouvettes. La mesure de la résistance en compression est réalisée selon la norme NF EN 12390-3 sur des échantillons témoins contenant uniquement du béton (sans MCP), dont la composition est détaillée sur le [Tableau 20](#) et le [Tableau 21](#).

Tableau 20 : Préparation des échantillons témoins pour les essais de compression

C-R : (2436 kg/m ³ -- 2.436 kg/échantillon)				
Composant	Ciment (kg)	Granulats (8/16+3/8) (kg)	Sable (kg)	Eau (L)
C-R	0.400	1.219	0.623	0.200

Tableau 21 : Préparation des échantillons témoins pour les essais de flexion

C-R : (2436 kg/m ³ -- 3.342 kg/échantillon)				
Composant	Ciment (kg)	Granulats (8/16+3/8) (kg)	Sable (kg)	Eau (L)
C-R	0.550	1.670	0.850	0.270

Avant de lancer les essais sur les échantillons de béton composite, nous avons procédé à la vérification de la formulation initiale des bétons de référence par le biais d'échantillons témoins ne contenant que du béton. La valeur de la résistance moyenne à la compression obtenue sur ces échantillons (26.32 MPa) est en deçà de la valeur R'₂₈ ciblée (28.75 MPa), ce qui nous contraint à un réajustement du dosage de certains constituants ([Tableau 22](#) et [Tableau 23](#)). En effet, la méthode de formulation de Dreux-Gorisse, comme la plupart des méthodes théoriques, suit deux grandes étapes : détermination théorique de la formulation

puis ajustement des proportions en fonction de l'exploitation de l'ouvrage et de la résistance à atteindre. Cependant, dans nos tests, la correction des paramètres de formulation n'est intervenue qu'après la mesure des résistances sur les bétons composites intégrant les MCP.

Tableau 22 : Résistance à la compression des échantillons témoins sans MCP (R-C)

Échantillon	C-R 1	C-R 2	C-R 3
R (MPa)	26.23	27.05	25.68
R' (MPa)		26.32	

Tableau 23 : Résistance à la flexion des échantillons témoins sans MCP (R-C)

Échantillon	C-R 1	C-R 2	C-R 3
R (MPa)	2.98	3.34	2.62
R' (MPa)		2.98	



Figure 39. Essais en compression sur échantillons cubiques



Figure 43. Essais en flexion sur échantillons cubiques



Figure 41. Essais en compression sur échantillon cubique



Figure 42. Essais en flexion sur échantillon parallélépipédique

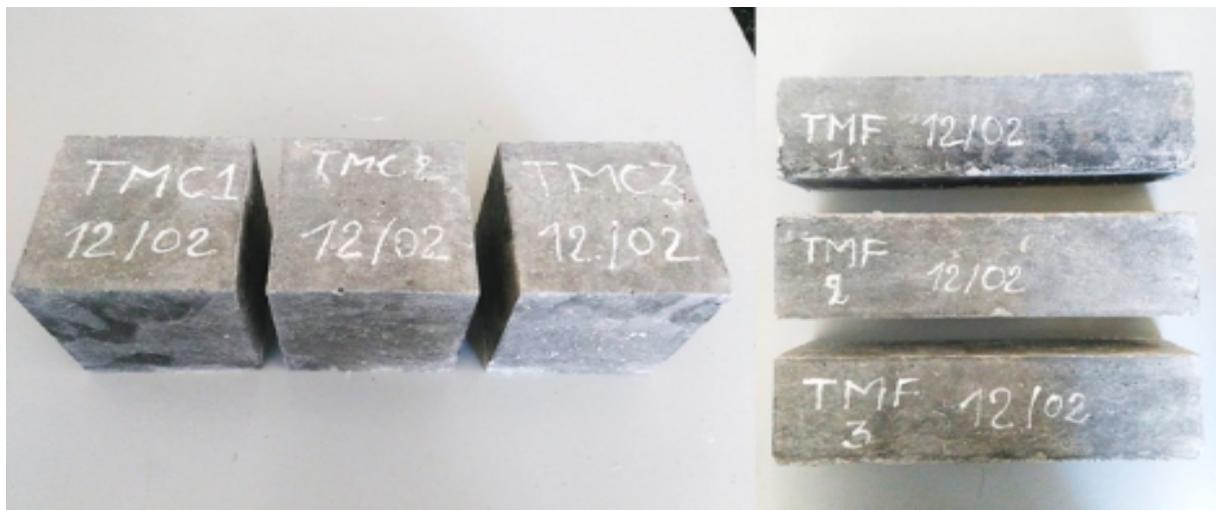


Figure 40 : Échantillons témoins (C-R) pour les essais de compression et de flexion

4.3 Élaboration des bétons composites

4.3.1 Scénarii d'ajouts des MCP composites dans le béton et quantités associées

Après la caractérisation thermochimique des matrices et des MCP et après les tests d'imprégnation des matrices par les MCP, vient la réalisation des mélanges béton-MCP composites et la préparation des différents échantillons devant subir les essais mécaniques. Pour cela, un protocole expérimental basé sur trois options est suivi :

- Ajout du MCP-composite au béton ordinaire sans substitution,
- Le MCP-composite est substitué au granulats (8/16),
- Le MCP est substitué au sable (0/3).

Les MCP-composites sont obtenus par trempage pendant 30 min à 60°C et sont mélangés aux bétons à un dosage de 15, 20, 25, 30 et 50 % du volume total de l'échantillon. L'objectif de ces tests mécaniques est d'arriver à une formulation qui contienne la plus grande quantité de MCP tout en gardant un niveau de résistance mécanique admissible.

Les essais mécaniques utilisent deux tailles d'éprouvettes de section carrée (*Figure 44*) :

- $0.1 \times 0.1 \times 0.1 \text{ m}^3$ pour les tests en compression ;
- $0.07 \times 0.07 \times 0.28 \text{ m}^3$ pour les tests en flexion.

Les Tableaux 10 à 15 donnent le détail des formulations pour les différents échantillons de béton testés en précisant les quantités et pourcentages de MCP composite et MCP pur ajoutés.



Figure 44. Échantillons TESC pour des essais de flexion et de compression (de gauche à droite)

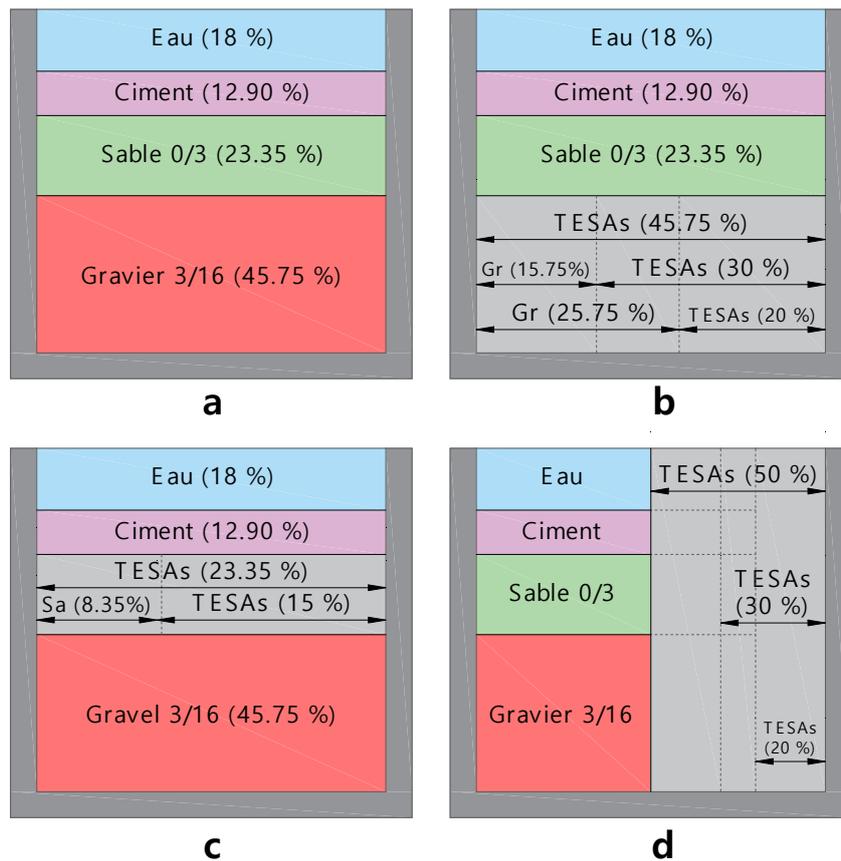


Figure 45. Composition des différents échantillons cubiques, a : C-R (béton témoin sans ajout de CLWA), b : Incorporation de CLWA par substitution de granulats, c : Incorporation CLWA par substitution de sable, d : Ajout ordinaire CLWA sans substitution

4.3.1.1 Désignation et acronymes

Vu la variété et le nombre important d'échantillons à caractériser, une nomenclature appropriée s'impose. Comme il est montré dans le [Tableau 24](#), les acronymes utilisés pour nommer ces échantillons sont composés de l'initiale de la matrice minérale et du pourcentage de MCP composite ajouté au béton.

Tableau 24 : Désignation des acronymes en fonction du dosage en MCP-composite

		Taux d'ajout de CLWA							
		0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	50%
C-R	Témoin	C-R	/	/	/	/	/	/	/
	Gel de silice (GS)	/	GS5	GS10	GS15	GS20	GS25	GS30	GS50
TESC	Bentonite (B)	/	B5	B10	B15	B20	B25	B30	B50
	Sépiolite (S)	/	S5	S10	S15	S20	S25	S30	S50

4.3.1.2 Incorporation par ajout à un béton ordinaire

La première technique utilisée consiste à incorporer dans le béton par ajout simple des MCP composites à différents dosages.

Avant d'entamer les mélanges, quelques précautions et travaux préparatoires sont nécessaires. Il faut :

- Préparer les moules en acier, les graisser suffisamment et procéder à leur numérotation.
 - laver les graviers et le sable avant de les mettre à l'étuve à 105 °C pendant 24h en respectant les quantités à utiliser pour chacun des échantillons (*Tableau 25, Tableau 26, Tableau 27, Tableau 28, Tableau 29 et Tableau 30*). (Les pesées sont effectuées sur une balance de marque "OHAUS", Pioneer TM model PA64 avec une précision à 10^{-4} g).
 - Vibrer les moules pendant 20 secondes après leur remplissage.
- A noter que le malaxage des bétons a été fait à la main.

Tableau 25. Préparation des échantillons pour les essais de compression - Incorporation par ajout à un béton

Échantillon	Ciment (kg)	Granulats (kg)	Sable (kg)	Eau (L)	CLWA / MCP à ajouter			
					CLW A (%v)	CLWA (kg)	MCP (%v)	MCP (kg)
C-R	0.4	1.219	0.623	0.200	/	/	/	/
TESC-GS20	0.4	1.219	0.623	0.200	20	0.173	11.57	0.081
TESC-GS30	0.4	1.219	0.623	0.200	30	0.259	17.28	0.121
X TESC-GS50	0.4	1.219	0.623	0.200	50	0.431	28.70	0.201
TESC-S20	0.4	1.219	0.623	0.200	20	0.225	10.42	0.073
TESC-S30	0.4	1.219	0.623	0.200	30	0.337	15.57	0.109
X TESC-S50	0.4	1.219	0.623	0.200	50	0.561	25.85	0.181
TESC-B20	0.4	1.219	0.623	0.200	20	0.165	3.85	0.027
TESC-B30	0.4	1.219	0.623	0.200	30	0.247	5.71	0.040
X TESC-B50	0.4	1.219	0.623	0.200	50	0.411	9.42	0.066

Tableau 26. Préparation des échantillons pour les essais de flexion - Incorporation par ajout à un béton

Echantillon	Ciment (kg)	Granulats (kg)	Sable (kg)	Eau (L)	CLWA / MCP à ajouter			
					CLWA (%v)	CLWA (%v)	MCP (%v)	MCP (kg)
C-R	0.55	1.67	0.85	0.27	/	/	/	/
TESC-GS20	0.55	1.67	0.85	0.27	20	0.237	11.66	0.112
TESC-GS30	0.55	1.67	0.85	0.27	30	0.355	17.38	0.167
X TESC-GS50	0.55	1.67	0.85	0.27	50	0.591	28.93	0.278
TESC-S20	0.55	1.67	0.85	0.27	20	0.225	10.42	0.073
TESC-S30	0.55	1.67	0.85	0.27	30	0.337	15.57	0.109
X TESC-S50	0.55	1.67	0.85	0.27	50	0.561	25.85	0.181
TESC-B20	0.55	1.67	0.85	0.27	20	0.227	3.95	0.038
TESC-B30	0.55	1.67	0.85	0.27	30	0.340	5.92	0.057
X TESC-B50	0.55	1.67	0.85	0.27	50	0.566	9.76	0.094

Le *Tableau 25* et le *Tableau 26* montrent qu'on peut atteindre des taux d'intégration de MCP purs de 11.57%_m, 17.28%_m et 28.70%_m en incorporant dans le béton des proportions de 20%, 30% et 50% de MCP composite (GS+GV23-26), 10.42%_m, 15.57%_m et 25.85%_m avec 20%, 30% et 50% de MCP composite (S+GV23-26) et 3.85%_m, 5.71%_m et 9.42%_m avec 20%, 30% et 50% de MCP composite (B+GV23-26), respectivement.

Il faut noter que le remplissage des moules par le béton composite comportant de la bentonite était particulièrement malaisé. En effet, la forme pâteuse et collante de ce béton rendait sa mise en œuvre et son incorporation dans les moules très délicates (voir *Figure 46*). Cela s'explique par le caractère argileux et colloïdal de la bentonite qui au contact de l'eau

prend une forme visqueuse réduisant la maniabilité et la plasticité du béton auquel elle est ajoutée. Il a fallu donc plusieurs cycles de vibration mécanique pour parvenir à une homogénéité convenable des échantillons.

Contrairement à la bentonite, la mise en œuvre et en forme des bétons contenant du gel de silice et de sépiolite était bien plus facile, comme le montrent la [Figure 47](#) et la [Figure 48](#).



Figure 46. Mise en œuvre des bétons composites TESC-B



Figure 47. Mise en œuvre des bétons composites TESC-SG



Figure 48. Mise en œuvre des bétons composites TESC-S

Précisons que certains mélanges ne sont pas réalisables comme les échantillons GS50, S50 et B50. En effet, le rajout de 50% de MCP composite au béton ordinaire ne permet pas la prise en masse du mélange, dû au manque de ciment et d'eau et les gâchées obtenues ont une très faible homogénéité, leurs caractéristiques tendant davantage vers celles d'un béton de propreté.

À la lecture des résultats obtenus, nous pouvons conclure que les taux de MCP pur contenu dans le béton, dans le cas où les MCP composite y sont simplement incorporés, sont plus élevés pour le gel de silice et la sépiolite, que pour la bentonite.

4.3.1.3 Incorporation par substitution de sable

La seconde manière d'incorporer les MCP dans le béton consiste à les ajouter à différents dosages, par substitution aux mêmes quantités de sable (0/3). Le [Tableau 27](#) et le [Tableau 28](#) montrent qu'on peut atteindre des taux d'intégration de MCP purs de 8.71%_m et 14.42%_m en incorporant dans le béton des proportions de 15% et 25% de MCP composite (GS+GV23-26), 7.71%_m et 12.85%_m avec 15% et 25% de MCP composite (S+GV23-26) et 2.85%_m et 4.70%_m avec 15% et 25% de MCP composite (B+GV23-26), respectivement. Le taux de MCP est naturellement limité par la quantité de sable du béton (623 kg pour 1 m³ de béton correspondant à 25% du volume des échantillons).



Figure 49 : TESC-SG50 à faible homogénéité

Par le fait que les quantités de ciment ne sont pas diminuées dans le mélange et par rapport à la similarité granulométrique (forme et dimension) des grains de gel de silice, de sépiolite, ou de bentonite avec les grains de sable, et surtout compte tenu des résultats obtenus dans les essais mécaniques, cette technique semble à priori la plus appropriée.

Dans ce cas aussi, les échantillons contenant 50 % de cLWA correspondant aux cases rayées dans le tableau n'ont pu être réalisés par manque de cohésion du béton produit (voir [Figure 49](#)).

Tableau 27. Préparation des échantillons pour les essais de compression -
Incorporation par substitution de sable

Échantillon	Ciment (kg)	Granulats (kg)	Sable (kg)	Eau (L)	Sable à enlever (kg)	cLWA / MCP à ajouter			
						cLWA (%v)	cLWA (Kg)	MCP (%v)	MCP (Kg)
C-R	0.4	1.219	0.623	0.200	/	/	/	/	/
TESC-GS15	0.4	1.219	0.223	0.200	0.4000	15	0.130	8.71	0.061
TESC-GS25	0.4	1.219	0.00	0.200	0.6667	25	0.216	14.42	0.101
X TESC-GS50	/	/	/	/	/	/	/	/	/
TESC-S15	0.4	1.219	0.223	0.200	0.4000	15	0.168	7.71	0.054
TESC-S25	0.4	1.219	0.00	0.200	0.6667	25	0.281	12.85	0.090
X TESC-S50	/	/	/	/	/	/	/	/	/
TESC-B15	0.4	1.219	0.223	0.200	0.4000	15	0.124	2.85	0.020
TESC-B25	0.4	1.219	0.00	0.200	0.6667	25	0.206	4.70	0.033
X TESC-B50	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Tableau 28. Préparation des échantillons pour les essais de flexion - Incorporation
par substitution de sable

Échantillon	Ciment (kg)	Granulats (kg)	Sable (kg)	Eau (L)	Sable à enlever (kg)	cLWA / MCP à ajouter			
						cLWA (%v)	cLWA (kg)	MCP (%v)	MCP (kg)
C-R	0.55	1.67	0.85	0.27	/	/	/	/	/
TESC-GS15	0.55	1.67	0.301	0.27	0.5488	15	0.178	8.75	0.084
TESC-GS25	0.55	1.67	0.00	0.27	0.9147	25	0.297	14.58	0.140
X TESC-GS50	/	/	/	/	/	/	/	/	/
TESC-S15	0.55	1.67	0.301	0.27	0.5488	15	0.231	7.81	0.075
TESC-S25	0.55	1.67	0.00	0.27	0.9147	25	0.385	13.01	0.125
X TESC-S50	/	/	/	/	/	/	/	/	/
TESC-B15	0.55	1.67	0.301	0.27	0.5488	15	0.170	2.91	0.028
TESC-B25	0.55	1.67	0.00	0.27	0.9147	25	0.283	4.88	0.047
X TESC-B50	/	/	/	/	/	/	/	/	/

4.3.1.4 Incorporation par substitution de granulats

Cette dernière technique repose sur l'incorporation des MCP composites par substitution au même volume de granulats (3/8 et 8/16). Les taux d'intégration de MCP purs sont les mêmes que ceux de l'incorporation par ajout au béton ordinaire.

Des échantillons confectionnés sont les GS20, GS30, S20, S30, B20 et B30. Comme dans les cas précédents, les GS50, S50 et B50 correspondant aux cases rayées dans le [Tableau 29](#) et le [Tableau 30](#), ne sont pas réalisés, car il aurait fallu enlever la totalité des granulats (3/8 et 8/16), ce qui revient à transformer le béton formulé en mortier simple. Dans le [Tableau 29](#) et le [Tableau 30](#), sont données les quantités de matières utilisées dans les échantillons réalisés.

Tableau 29. Préparation des échantillons pour les essais de compression -
Incorporation par substitution de granulats

Échantillon	Ciment (kg)	Granulats (kg)	Sable (kg)	Eau (L)	Granulats à enlever (kg)	cLWA / MCP à ajouter			
						cLWA (%v)	cLWA (kg)	MCP (%v)	MCP (kg)
C-R	0.4	1.219	0.623	0.200	/	/	/	/	/
TESC-GS20	0.4	0.6856	0.623	0.200	0.5334	20	0.173	11.57	0.081
TESC-GS30	0.4	0.4189	0.623	0.200	0.8001	30	0.259	17.28	0.121
X TESC-GS50	0.4	0.0000	0.623	0.200	1.3325	50	0.431	28.70	0.201
TESC-S20	0.4	0.6856	0.623	0.200	0.5334	20	0.225	10.42	0.073
TESC-S30	0.4	0.4189	0.623	0.200	0.8001	30	0.337	15.57	0.109
X TESC-S50	0.4	0.0000	0.623	0.200	1.3325	50	0.561	25.85	0.181
TESC-B20	0.4	0.6856	0.623	0.200	0.5334	20	0.165	3.85	0.027
TESC-B30	0.4	0.4189	0.623	0.200	0.8001	30	0.247	5.71	0.040
X TESC-B50	0.4	0.0000	0.623	0.200	1.3325	50	0.411	9.42	0.066

Tableau 30. Préparation des échantillons pour les essais de flexion - Incorporation
par substitution de granulats

Échantillon	Ciment (kg)	Granulats (kg)	Sable (kg)	Eau (L)	Granulats à enlever (kg)	cLWA / MCP à ajouter			
						cLWA (%v)	cLWA (%v)	MCP (%v)	MCP (%v)
C-R	0.55	1.67	0.85	0.27	/	/	/	/	/
TESC-GS20	0.55	1.0016	0.85	0.27	0.7318	20	0.237	11.66	0.112
TESC-GS30	0.55	0.6674	0.85	0.27	1.0977	30	0.355	17.38	0.167
X TESC-GS50	0.55	0.0000	0.85	0.27	1.8294	50	0.591	28.93	0.278
TESC-S20	0.55	1.0016	0.85	0.27	0.7318	20	0.308	10.41	0.100
TESC-S30	0.55	0.6674	0.85	0.27	1.0977	30	0.462	15.61	0.150
X TESC-S50	0.55	0.0000	0.85	0.27	1.8294	50	0.770	26.01	0.250
TESC-B20	0.55	1.0016	0.85	0.27	0.7318	20	0.227	3.95	0.038
TESC-B30	0.55	0.6674	0.85	0.27	1.0977	30	0.340	5.92	0.057
X TESC-B50	0.55	0.0000	0.85	0.27	1.8294	50	0.566	9.86	0.095

4.3.2 Essais mécaniques sur les échantillons composites (TESC)

En adoptant le même procédé expérimental et en utilisant les mêmes machines que lors des mesures sur les échantillons témoins, des tests expérimentaux sont réalisés pour évaluer les propriétés mécaniques des mélanges de TESC ainsi que l'effet du cyclage thermique sur ces caractéristiques.

À partir de ces mesures, il apparaît de manière nette que l'incorporation, sous toutes ses formes, de cLWA dans le béton classique entraîne systématiquement une perte en termes de résistance mécanique ; néanmoins le TESC obtenu peut toujours être utile dans certaines applications et sous certaines limites dans le bâtiment. Comme on peut le voir sur la [Figure 50](#), les résultats obtenus selon les trois modes d'addition démontrent clairement cette chute de la résistance mécanique. Les explications de ce phénomène sont diverses. Selon les sources disponibles dans la littérature, certains imputent la cause de cette baisse à la fuite de MCP entre les cLWA et le béton. Cela provoquerait une dégradation de l'adhérence des cLWA au béton [112], [131], [135], [139], d'autres à la porosité élevée des LWA et leur taux de chargement avec les MCP [110], [140], ou encore aux propriétés mécaniques plus faibles des LWA et à la méthodologie de rupture des TESC affectés par la présence des cLWA [138] ; ou enfin au retard de la réaction d'hydratation du ciment provoqué par l'ajout de MCP [66].

La raison est peut-être une combinaison de tous ces facteurs ; ce qui pourrait déterminer l'importance de chacun d'entre eux serait une analyse fine des liaisons dans le béton (figures MEB).

Des trois cLWA, c'est celui qui est à base de sépiolite qui présente les meilleures performances mécaniques grâce à sa haute densité et à sa grande capacité d'absorption et c'est la méthode du remplacement du sable par le MCP qui est le mode d'incorporation la plus efficace. Ainsi, le TESC-S15-b est le plus performant avec une résistance à la compression de 16,77 MPa, perdant cependant 36,28 % de sa résistance par rapport au C-R (de 26,32 à 16,77 MPa).

La résistance à la flexion diminue également avec l'augmentation du volume de cLWA, même si la baisse est moins importante que pour la résistance à la compression. Dans ce cas aussi, c'est la sépiolite par substitution au sable qui présente les meilleures performances, en raison de la similitude des grains de sépiolite (forme et taille) avec celles du sable ; les taux d'incorporation étant naturellement limités à 25 %v. Enfin, les mélanges TESC-S25 et TESC-S15 sont les seuls qui répondent aux critères de résistance pour une utilisation structurelle.

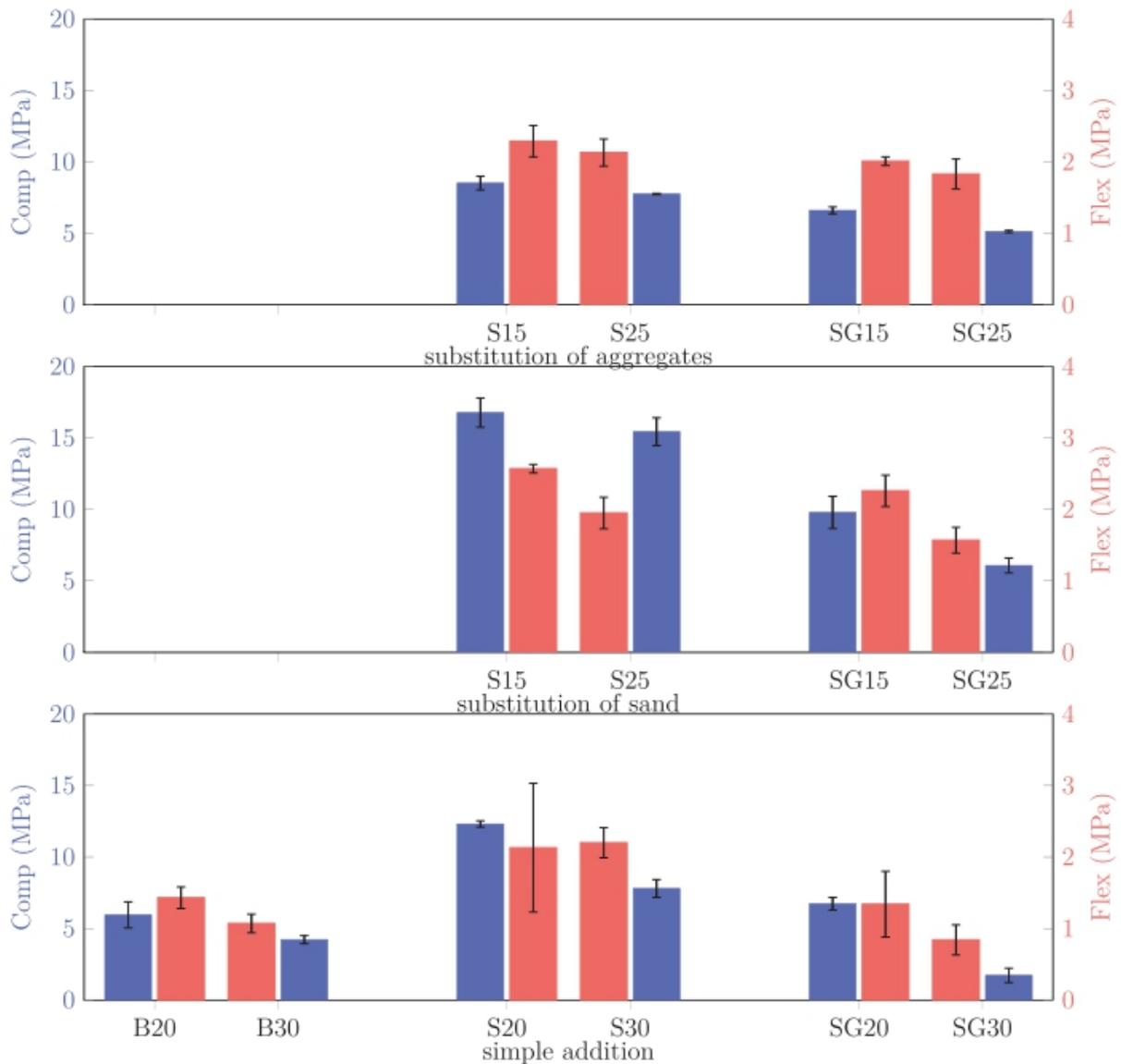
Concernant le TESC-SG, la forme anguleuse des grains de gel de silice favorise une bonne adhérence au béton, et l'absence de traces de graisse végétale (GV) sur le béton aux alentours des grains de gel de silice (GS) imprégnés dévoile une bonne qualité d'absorption. Malheureusement, la fracturation et parfois l'effritement total de ces grains, clairement observables lors de leur imprégnation par les graisses végétales, entraînent une dégradation importante de leur résistance mécanique.

S'agissant du TESC-S, des décollements prononcés apparaissent au niveau de l'interface cLWA-S / béton. La succession de ces failles donne naissance au front de rupture du TESC-S avec de plus grandes fissurations. Le cLWA-S quant à lui reste sain et ne présente aucun affaiblissement ou désordre aux niveaux structurel et formel. L'observation du faciès de rupture qui se matérialise par un plan de clivage net, renseigne tout de même sur la fragilité du cLWA-S (comparé aux grains de sable).

Sur les images MEB du TESC-B, la dislocation d'une importante part des cLWA-B est constatée, laissant des formes de cratères portant des traces d'huile. En plus de la forme argileuse de la bentonite et colloïdale du cLWA-B qui empêchent leur adhérence au béton, le relargage de la graisse végétale dans l'interface cLWA-B / béton demeure l'une des principales causes de la faible résistance mécanique de ce TESC-B. On observe aussi des traces d'assèchement sur le béton. Celles-ci sont dues au défaut d'hydratation du béton en relation à son imprégnation de graisse végétale.

Tableau 31. Synthèse des essais mécaniques des TESC

Mesure	Réf.	Type d'échantillon									
		Substitution de granulats									
		TESC-B20	TESC-B30	TESC-B50	TESC-S20	TESC-S30	TESC-S50	TESC-SG20	TESC-SG30	TESC-SG50	
Rés. Comp. (MPa)	26.32 ± 0.69	X	X	X	8.52 ± 0.48	7.76 ± 0.04	X	6.61 ± 0.24	5.13 ± 0.08	X	
Rés. Flexion (MPa)	2.98 ± 0.36	X	X	X	2.29 ± 0.22	2.13 ± 0.19	X	2.01 ± 0.06	1.83 ± 0.21	X	
Substitution de sable											
B15 B25 B50 S15 S25 S50 SG15 SG25 SG50											
Rés. Comp. (MPa)	26.32 ± 0.69	X	X	X	16.77 ± 1.02	15.44 ± 0.97	X	9.79 ± 1.13	6.08 ± 0.52	X	
Rés. Flexion (MPa)	2.98 ± 0.36	X	X	X	2.57 ± 0.06	1.95 ± 0.22	X	2.26 ± 0.22	1.57 ± 0.18	X	
Addition simple											
B20 B30 B50 S20 S30 S50 SG20 SG30 SG50											
Rés. Comp. (MPa)	26.32 ± 0.69	5.95 ± 0.91	4.22 ± 0.28	X	12.31 ± 0.22	7.80 ± 0.62	X	6.73 ± 0.44	1.72 ± 0.50	X	
Rés. Flexion (MPa)	2.98 ± 0.36	1.43 ± 0.15	1.07 ± 0.13	X	2.13 ± 0.90	2.20 ± 0.21	X	1.34 ± 0.46	0.84 ± 0.21	X	



(a) Compressive (left) and flexural (right) strength of TESC as a function of the method of fabrication

Figure 50. Résistance à la compression et à la flexion des TESC

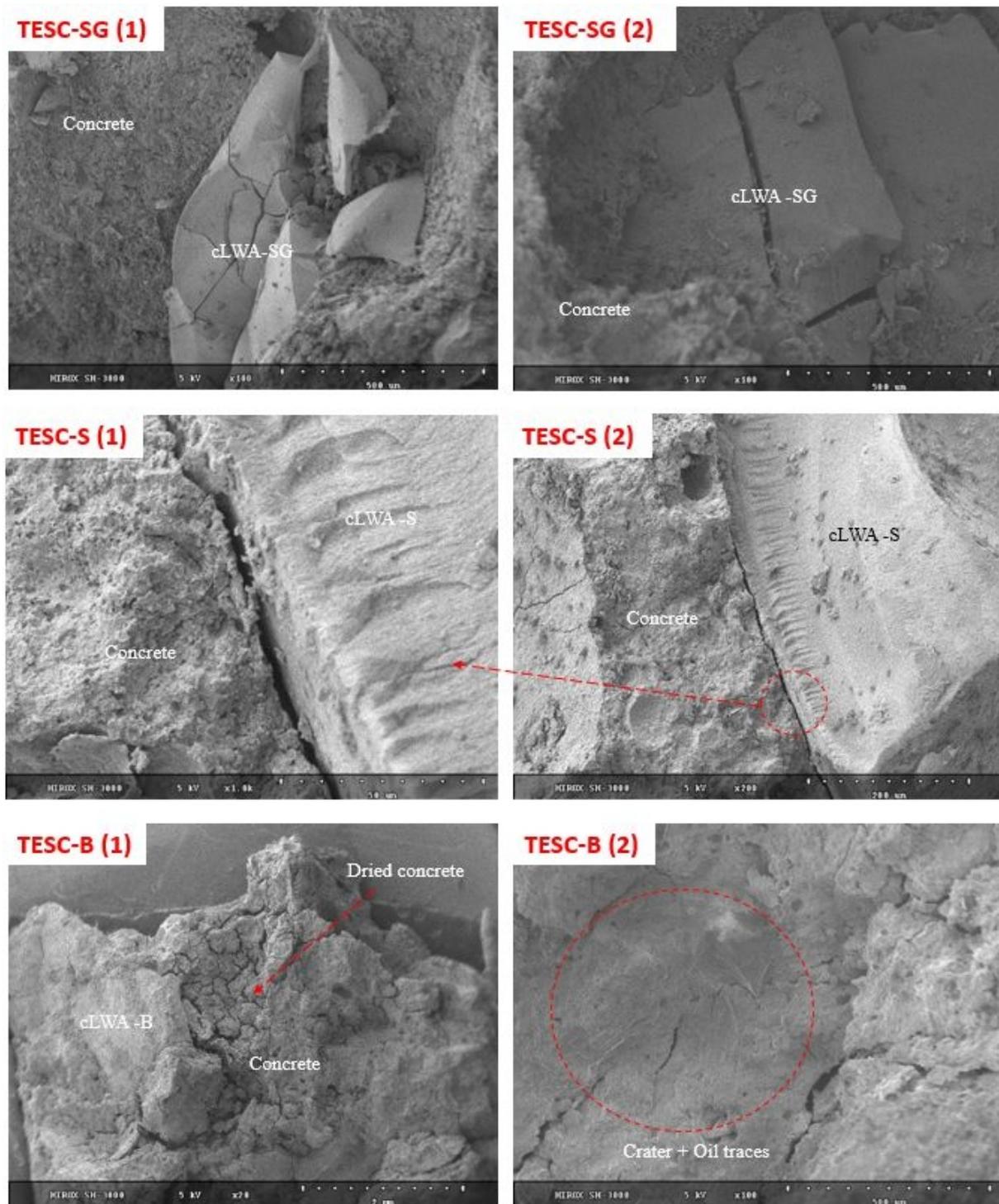


Figure 51. Observations au MEB des interfaces CLWA-Béton

4.3.3 Impact des cycles thermiques sur la résistance mécanique (Vieillessement)

Comme l'illustrent la [Figure 52](#) et la [Figure 53](#), l'impact des cycles thermiques sur la résistance à la compression des bétons TESC a été étudié. L'échantillon de TESC-S25-b a été

sélectionné pour subir une autre série d'essais de compression après deux types de cycles thermiques en raison du bon compromis qu'il présente entre les propriétés mécaniques et la capacité d'absorption. Ainsi nous avons réalisé 9 échantillons de TESC-S25-b de forme cubique (10 cm³). Les trois premiers échantillons, qui vont servir de référence, ont été testés après 28 jours ; trois autres sont soumis en chambre climatique (CC) à 100 cycles thermiques alternés, 24 heures à 5 °C suivis de 24 heures à 45 °C ; et les trois derniers ont été exposés pendant 8 mois au climat extérieur d'avril à novembre (*Figure 53*). Il apparaît pour ces échantillons une altération de leur résistance à la compression, en accord avec les résultats rapportés par Mohseni et al [110]. Comme le montre la *Figure 52*, les échantillons placés en chambre climatique ont perdu en moyenne 2,37 % de leur résistance à la compression, tandis que la chute en extérieur, légèrement supérieure, est de 4,68 %. Compte tenu de la durée des essais et des conditions sévères dans lesquelles ces échantillons ont été placés, les altérations subies restent acceptables et ne poseraient certainement pas de problèmes de stabilité à long terme. La fuite de MCP serait la principale explication de cette diminution de la résistance à la compression, la solution envisageable étant un revêtement imperméable aux graisses des surfaces exposées.

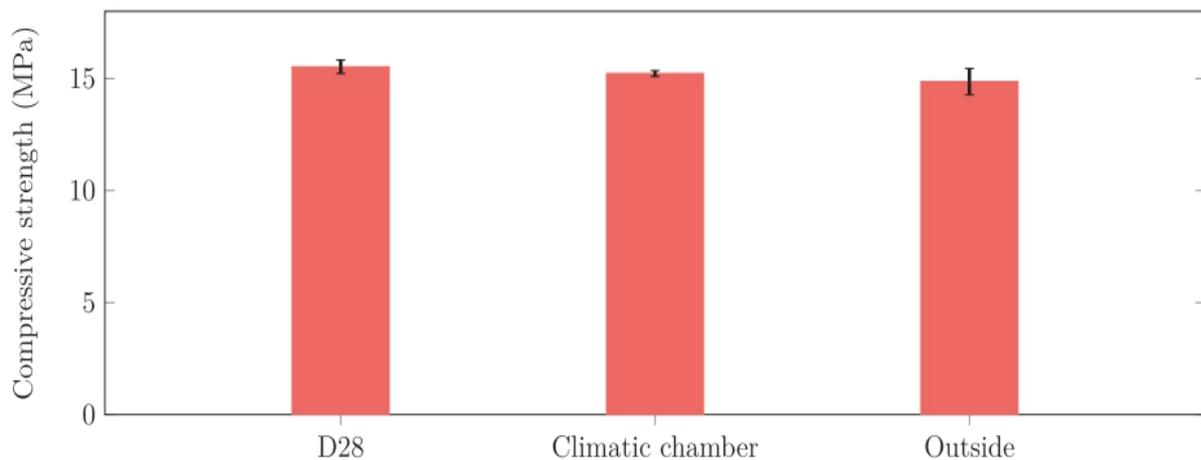


Figure 52. Essais de vieillissement à la compression des TESC-S25-b après traitements thermique



Figure 53. Échantillons du TESC-S25-b exposés aux conditions climatiques naturelles et placés en enceinte climatique (de gauche à droite)

4.4 Propriétés thermiques

Compte tenu des performances satisfaisantes en termes de résistance mécanique et de capacité d'absorption, la sépiolite a été choisie pour servir de matrice à la graisse végétale. Trois types d'échantillons de béton de $20 \times 20 \times 3 \text{ cm}^3$ sont produits pour l'exploration de leurs propriétés thermiques (Figure 55). Le premier est du béton ordinaire appelé C-R, pour servir de référence, le second appelé TESC-S25-b est du béton contenant le MCP avec matrice de sépiolite à 25 v% de cLWA-S et un dernier échantillon contenant 25 v% de sépiolite non imprégnée de MCP appelé C-S25-b.

Les propriétés thermiques de ces échantillons sont mesurées par la méthode des plaques chaudes gardées (visible en Figure 56 et Figure 54), une technique largement utilisée pour ce type d'échantillons [30], [137], [154], [155].

Pendant l'essai, les variations de température et les flux de chaleur échangés entre l'échantillon et les plaques sont enregistrés. Le dispositif expérimental est constitué de deux plaques d'aluminium servant d'échangeurs de chaleur reliés à deux bains thermostatés à circulation (Labtech., LCB-11 D) qui règlent la température des deux côtés de l'échantillon testé. Pendant la durée de l'essai, l'échantillon étant placé entre les deux échangeurs, des fluxmètres (Captec, France) et des thermocouples de type K (TC Ltd., Royaume-Uni) insérés de chaque côté de l'échantillon mesurent les variations de température et les flux de chaleur qui le traversent. Des feuilles de polystyrène expansé de 10 cm d'épaisseur forment une enveloppe isolante autour de l'échantillon et des échangeurs de chaleur afin d'éviter les fuites thermiques latérales. Un système d'acquisition de données (Pico technologie. TC-08., UK) enregistre les mesures de température et de flux de chaleur.

Ainsi, le dispositif expérimental permet de mesurer la conductivité thermique, les capacités thermiques spécifiques et les quantités de chaleur stockées par chaque échantillon en phase liquide et en phase solide.

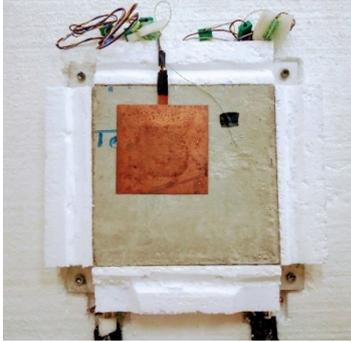
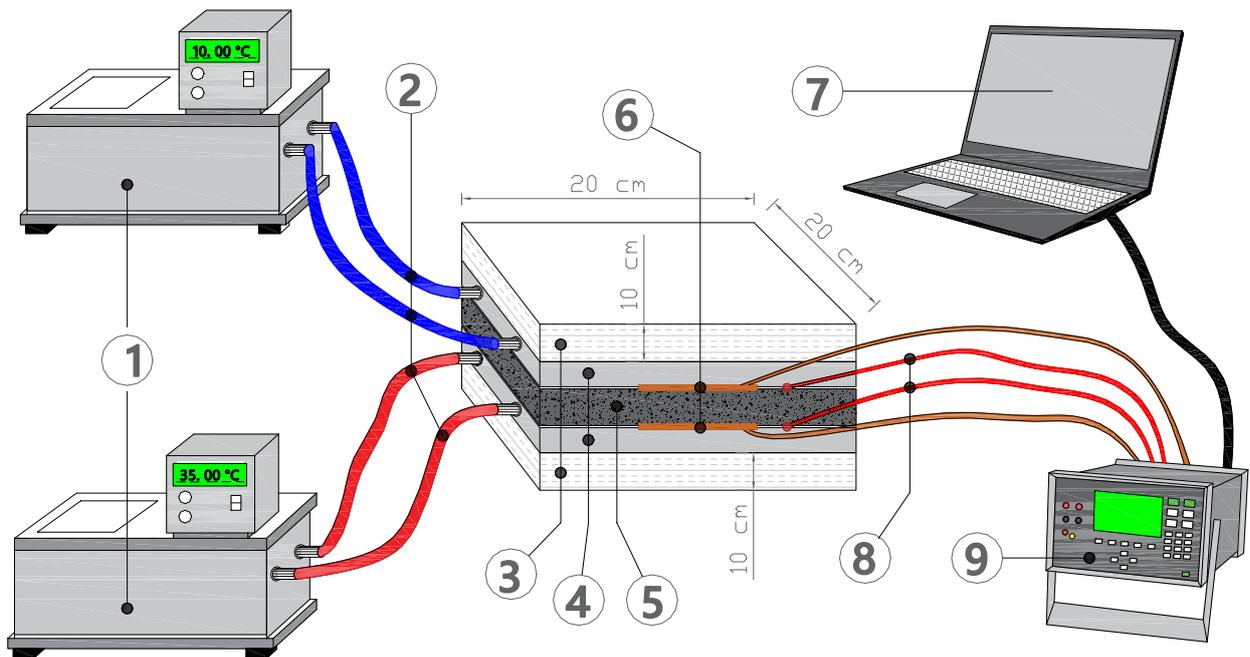


Figure 55. Échantillon testé



Figure 54. Montage expérimental des plaques chaudes gardées réalisé



- ① Bains thermostatés à circulation ② Tuyaux isolés ③ Isolant ④ Échangeurs thermiques ⑤ Échantillon
⑥ Flumètres ⑦ Ordinateur ⑧ Thermocouples ⑨ Enregistreur de données

Figure 56. Schémas du montage expérimental des plaques chaudes gardées

4.4.1 Chaleur sensible et capacité calorifique spécifique

La capacité thermique spécifique et la chaleur sensible des échantillons C-R, C-S25-b et TESC-S25-b (à l'état solide et liquide) sont mesurées à l'aide de l'appareil présenté à la [Figure 56](#) et la [Figure 54](#). À l'état initial, l'échantillon ainsi que les plaques des deux échangeurs de chaleur, alimentées à partir des bains thermostatés, sont mis en équilibre thermique à température T_0 . Par suite, l'ensemble est chauffé par l'intermédiaire de l'eau des bains dont la température de consigne est réglée à une valeur supérieure à T_0 . Ainsi, avec l'élévation progressive de température l'échantillon stocke une quantité de chaleur sensible qui augmente tant que sa température croît ; L'expérience est arrêtée lorsque l'équilibre thermique de l'échantillon est atteint, la température finale T_f de l'échantillon est alors légèrement inférieure à la température de consigne des bains, les flux de chaleur devenant

quasiment nuls. Q_s est calculée comme la sommation pas à pas sur toute la durée de l'expérience des quantités de chaleur cédées par les plaques à l'échantillon ; cette quantité intégrale étant par ailleurs égale à la variation de l'énergie interne du système. Connaissant la différence de température de l'échantillon entre le début et la fin de l'expérience, la capacité thermique se déduit de l'égalité suivante :

$$Q_s = \frac{1}{\rho e} \int_{t_{init}}^{t_{fin}} \Delta\Phi \cdot dt = Cp(T_f - T_0) \quad (\text{J/kg})$$

Pour s'assurer de la fiabilité de la mesure, l'expérience a été répétée trois fois en soumettant les échantillons à trois cycles thermiques identiques de stockage - libération de chaleur et un temps de remise en équilibre thermique.

En ce qui concerne le TESC-S25-b, l'échantillon qui contient le MCP, les intervalles de température dans lesquels sont effectuées les expériences sont choisies en fonction de la température à laquelle commence la fusion du MCP (15°C). La chaleur stockée sous forme sensible et la capacité calorifique sont ainsi évaluées dans les deux situations selon que le MCP contenu dans le béton est liquide ou bien à l'état solide. L'intervalle est compris entre 10 et 15°C pour la phase solide, et entre 30 et 35°C en phase liquide. Une troisième expérience est menée dans l'intervalle 15-35°C pour en déduire la chaleur stockée pendant le changement de phase.

Les évolutions des températures et des flux de chaleur reçus par les deux faces latérales des échantillons sont représentées dans la [Figure 57](#), la [Figure 58](#), la [Figure 59](#), la [Figure 60](#) et la [Figure 61](#), et les mesures correspondantes rapportées dans le [Tableau 32](#).

Comme on peut l'observer sur ces figures, les courbes de flux suivent une allure quasi-symétrique alors que les courbes de températures sont plus ou moins semblables, des résultats conformes à ceux obtenus par Joulin et al [30]. Pour un écart entre T_f et T_0 de 5 °C, la quantité moyenne de chaleur sensible stockée en phase liquide est supérieure à la chaleur stockée en phase solide ($Q_l = 5,48 \text{ kJ/kg} > Q_s = 4,88 \text{ kJ / kg}$). La quantité de chaleur stockée entre 10°C et 35°C est de 29,43 kJ/kg dont 19,07 kJ/kg (65 %) lors du changement de phase, sous forme de chaleur latente (L).

La quantité moyenne de chaleur sensible stockée par le béton de référence C-R dans la plage de température 30°C à 35°C est de 5,71 kJ/kg, soit à peu près la même que celle du TESC-S25-b. Le tableau 6 est une comparaison entre les quantités totales de chaleur stockées par le TESC-S25-b et le C-R dans la plage de température de 10 °C à 35 °C ; il montre que le TESC-S25-b a stocké 29,43 kJ/kg et le C-R 28,30 kJ/kg, soit une différence de 1,13 kJ/kg. Bien que le gain ne soit pas très important, ce résultat est tout de même intéressant car c'est une réponse positive à l'objectif de réduire la densité du béton en maintenant voir en améliorant ses qualités thermiques. Effectivement, outre l'amélioration des propriétés thermiques, le remplacement du sable par la sépiolite a fait chuter la densité du béton, passant de 2195 kg/m³ (C-R) à 1898 kg/m³ (TESC-S25-b), soit une diminution de près de 14%.

Les capacités thermiques spécifiques moyennes calculées pour le TESC-S25-b sont de 1093 J kg⁻¹ K⁻¹ pour l'intervalle 10°C-15°C, 1151 J kg⁻¹ K⁻¹ entre 30°C et 35°C et 1145 J kg⁻¹ K⁻¹ pour l'intervalle 10°C-35°C. Ainsi la capacité à l'état liquide est supérieure de 5,04 % à celle de

l'état solide. En ce qui concerne le C-R, son Cp moyen pour une plage de température de 30°C-35°C est de 1132 J kg⁻¹ K⁻¹ (1,13 % inférieur au Cp du TESC-S25-b pour la même plage de température). Le Cp de C-S25-b indique 946 J kg⁻¹ K⁻¹ pour la plage de température de 10°C-35°C. Il est inférieur de 17,38 % au Cp du TESC-S25-b pour la même plage de température. Ce résultat permet de conclure que les CLWA ajoutés au béton permettent de stocker plus d'énergie.

4.4.2 Chaleur latente

Après avoir calculé les quantités de chaleur stockées dans chacune des deux phases, reste à déterminer la chaleur latente qui est la quantité de chaleur totale (Q) stockée ou libérée entre deux états thermiques stables. La plage de température est choisie entre 10°C et 35°C car elle doit inclure le point de fusion, tout en étant suffisamment large pour être certain d'avoir le matériau dans ses deux états uniformes, complètement solide avant la fusion et totalement fondu après. Les données de température et de flux de chaleur enregistrées au cours de cette expérience comprenant trois étapes de chauffage et de refroidissement avec une période de 3 heures sont illustrées sur la [Figure 58](#). La chaleur sous forme sensible (Qs) et latente (L) est stockée et libérée par l'échantillon entre ces deux états. La chaleur latente est alors égale à la chaleur totale (Qt) à laquelle la chaleur sensible est soustraite ($L=Qt-Qs$). La chaleur totale est déterminée selon l'équation suivante.

$$Q_t = Q_s + L = (C_{ps} \cdot \Delta T_s + C_{pl} \cdot \Delta T_l) + L \quad (\text{kJ/kg})$$

Les valeurs moyennes de la chaleur totale et de la chaleur latente stockée par le TESC-S25-b sont respectivement de 29,43 kJ/kg et 19,07 kJ/kg. Par comparaison, la chaleur totale stockée par le TESC-S25-b est supérieure de 5,06 kJ/kg à celle qui est stockée par le C-S25-b dans la plage de température de 10°C à 35°C soit 21% de plus, ce qui confirme bien l'apport des cLWA ajoutés au béton pour le stockage d'énergie.

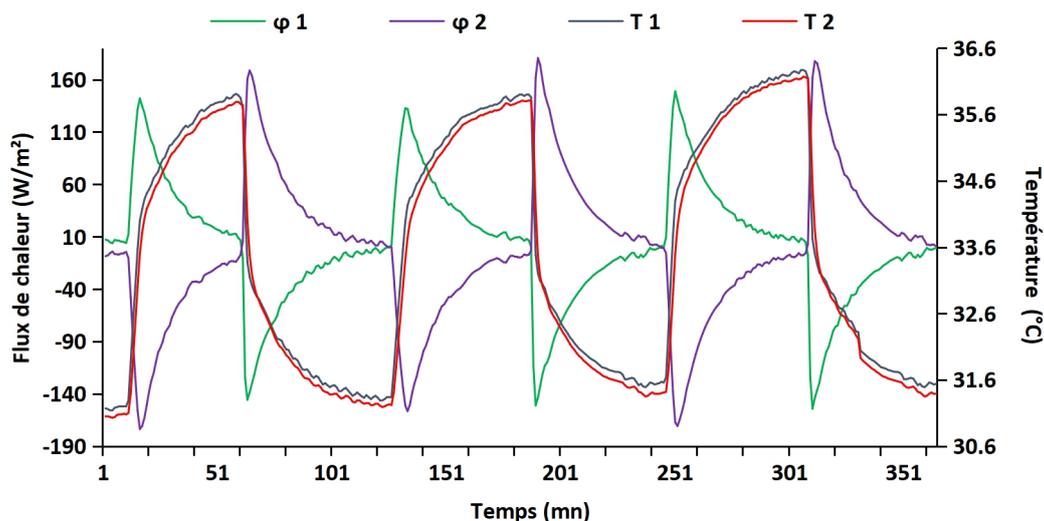
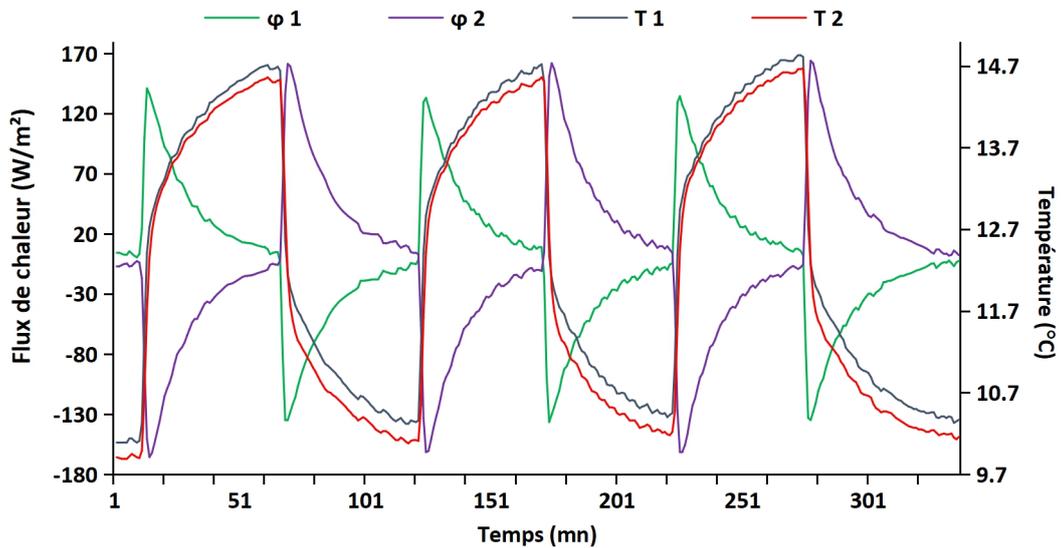
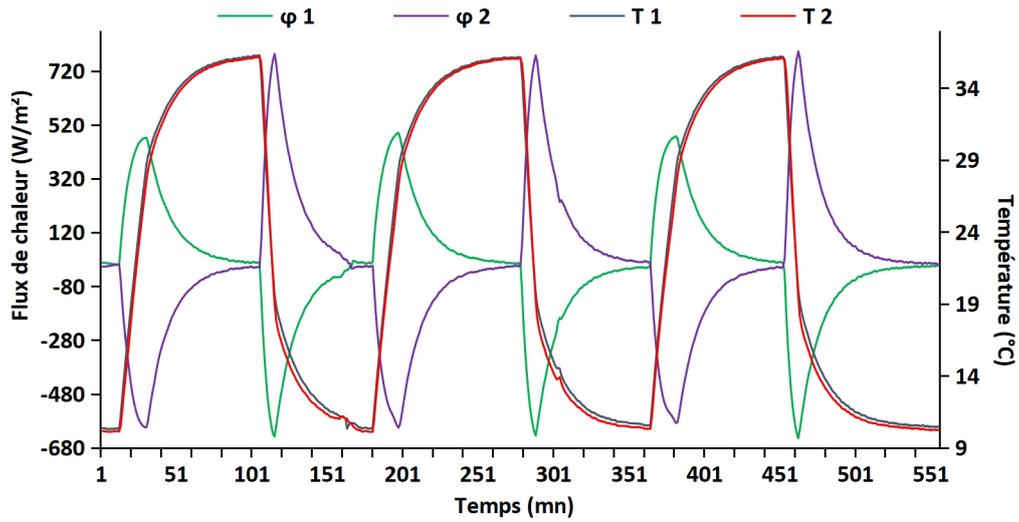


Figure 57. Évolution des flux thermique et des températures du TESC-S25-b dans la plage de température 30-35 °C



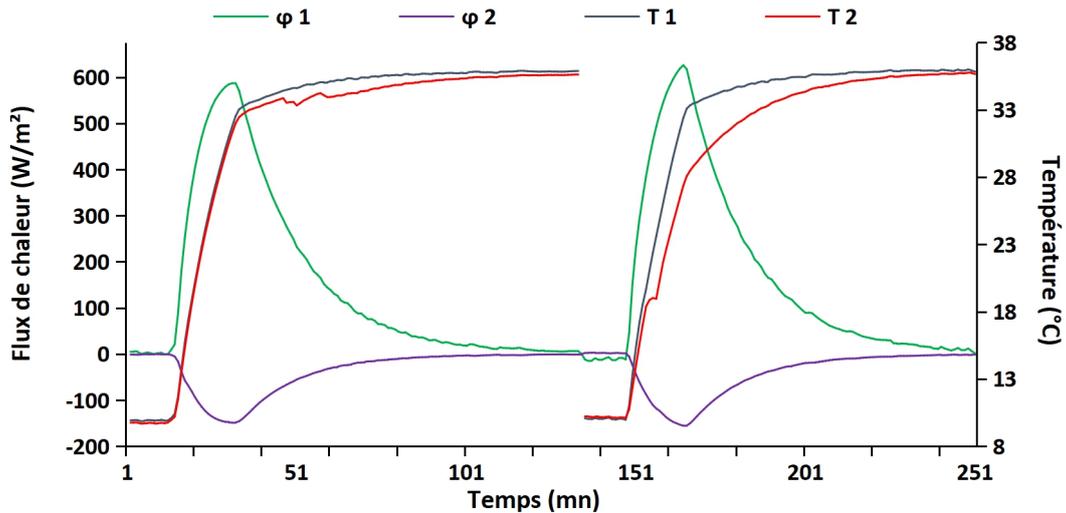


Figure 60. Flux thermique total et évolution des températures du C-S25-dans la plage de température 10-35 °C

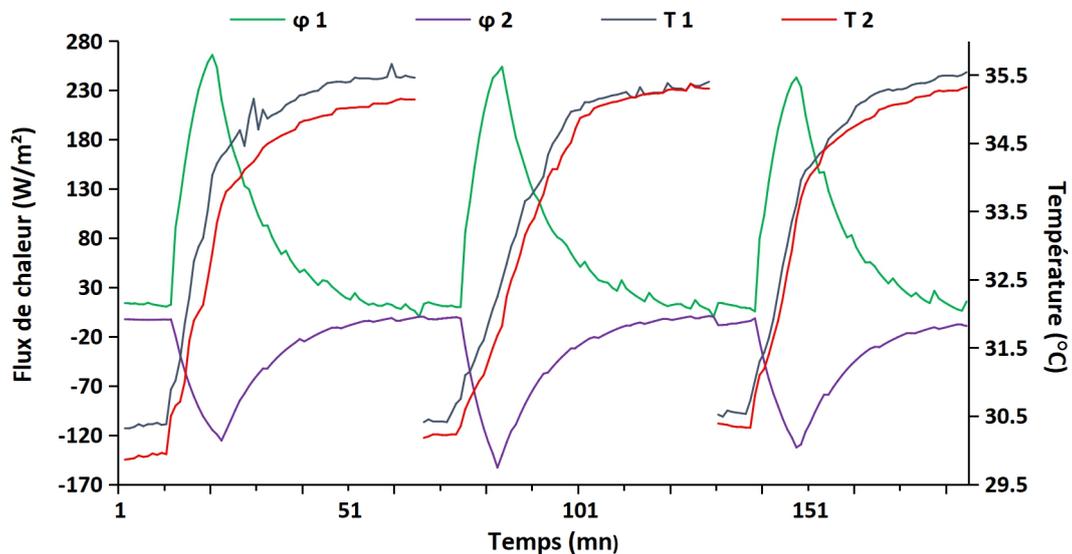


Figure 61. Flux thermique total et évolution des températures du C-R-dans la plage de température 30-35 °C

4.4.3 Conductivité thermique

La conductivité thermique moyenne λ des échantillons TESC-S25-b, C-R et C-S25-b est déterminée en utilisant le même dispositif de plaques chaudes gardées (Figure 56 et Figure 54). Lorsque la GV-23-26 contenu dans le TESC-S25-b est à l'état solide, la mesure de la conductivité consiste à imposer la même température initiale à l'échantillon et aux plaques des deux échangeurs $T_0 = 10 \text{ °C}$, l'équilibre thermique initial étant atteint quand les flux de chaleur sont quasi-nuls. Ensuite, une différence de température d'environ 5 °C est imposée entre les deux plaques, ce qui donne naissance à une élévation de température de l'échantillon sur la face en contact avec la plaque chaude. Ce régime de transfert thermique, par conduction et absorption dans l'échantillon, continue jusqu'à l'établissement d'un autre état d'équilibre dans lequel le flux entrant par la face chaude Φ_1 devient quasi-égal au flux sortant par la face froide Φ_2 . La température de l'extrémité chaude de la plaque de béton

atteint alors sa valeur maximale $T_f = 15 \text{ °C}$ (inférieure à la température de fusion de la VF 23-26) et l'échantillon n'absorbe plus de chaleur dans cette condition. La valeur moyenne de la conductivité thermique de l'échantillon peut alors se calculer à partir de la relation suivante :

$$\lambda = \frac{(\Phi_1 + \Phi_2)e}{2(T_1 - T_2)} \quad (\text{W} / \text{m} \cdot \text{K})$$

Où $(\Phi_1 + \Phi_2)/2$ est la moyenne des flux de chaleur mesurés, e est l'épaisseur de l'échantillon tandis que T_1 et T_2 sont les températures aux deux faces de l'échantillon.

La même expérience est renouvelée pour déterminer la conductivité thermique du TESC-S25-b lorsque le VF 23-26 est à l'état liquide dans la plage de température $30 \text{ °C} - 35 \text{ °C}$ (supérieure à la température de fusion du GS 23-26) et pour déterminer la conductivité thermique des échantillons C-R et C-S25-b dans les intervalles $30 - 35 \text{ °C}$ et $25 - 35 \text{ °C}$ respectivement.

Comme l'illustrent les [Figure 62](#), [Figure 63](#) et la [Figure 64](#), nous avons enchaîné trois cycles de chauffage successifs pour chaque échantillon, et déterminé une valeur moyenne de la conductivité thermique en vérifiant la reproductibilité des mesures. Comme on peut lire sur le tableau 6, la valeur moyenne de la conductivité thermique est de $1,09 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pour le TESC-S25-b lorsque le VF 23-26 est à l'état solide et de $0,72 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ à l'état liquide, des valeurs inférieures toutes deux à la conductivité thermique du CR qui est de $1,26 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ soit une diminution de 13,5% en phase solide et de 42,85% en phase liquide. Ce phénomène résultant de l'ajout de cLWA-S à la place du sable peut s'expliquer par l'augmentation de la porosité des bétons imprégnés ainsi que par le fait que la conductivité thermique du cLWA-S soit beaucoup plus faible que celle du sable.

La conductivité thermique du TESC-S25-b est plus faible quand le MCP est fondu (- 34% par rapport au MCP solide). Cela peut s'expliquer par le vide créé dans la matrice par le retrait volumique engendré par la fusion du VF 23-26 contenu dans le TESC-S25-b. Enfin, avec $0,46 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, la conductivité thermique moyenne de C-S25-b est la plus faible en raison de la porosité élevée de la sépiolite et de sa faible densité.

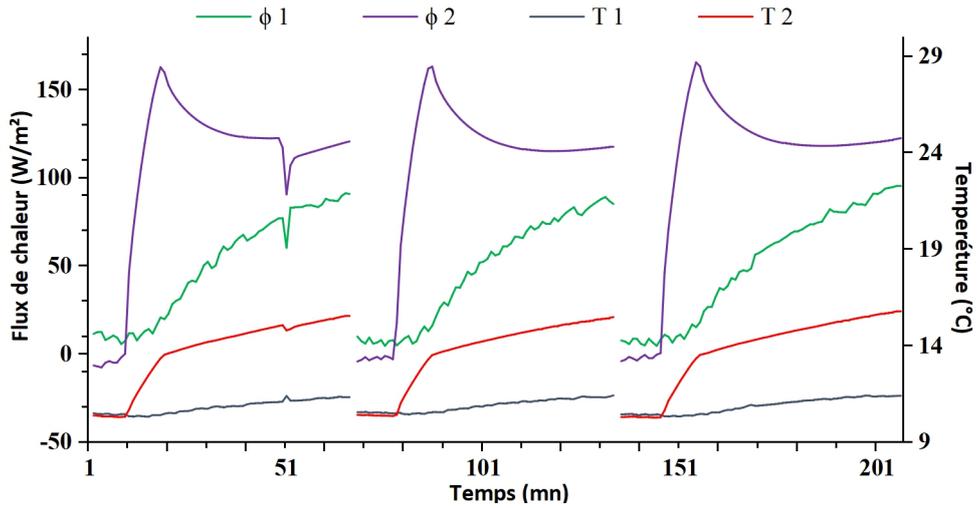


Figure 62. Évolution des flux thermique et des températures - détermination de la conductivité thermique solide du TESC-S25-b

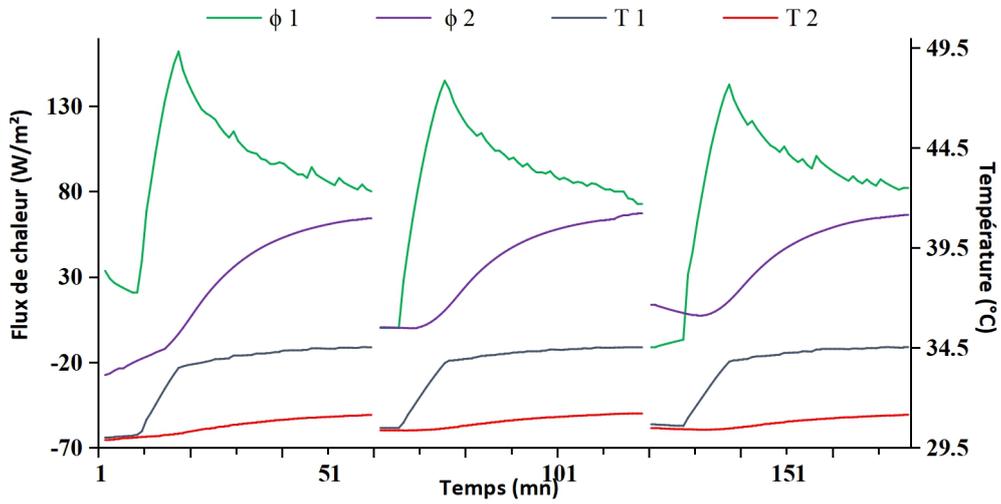


Figure 63. Évolution des flux thermique et des températures - détermination de la conductivité thermique liquide du TESC-S25-b

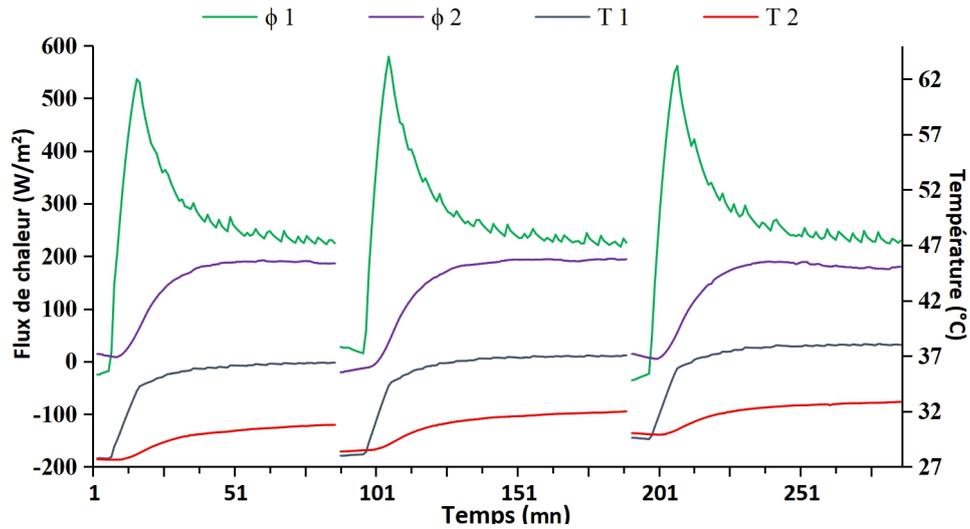


Figure 64. Évolution des flux thermique et des températures - détermination de la conductivité thermique du C-R (30 -35 °C)

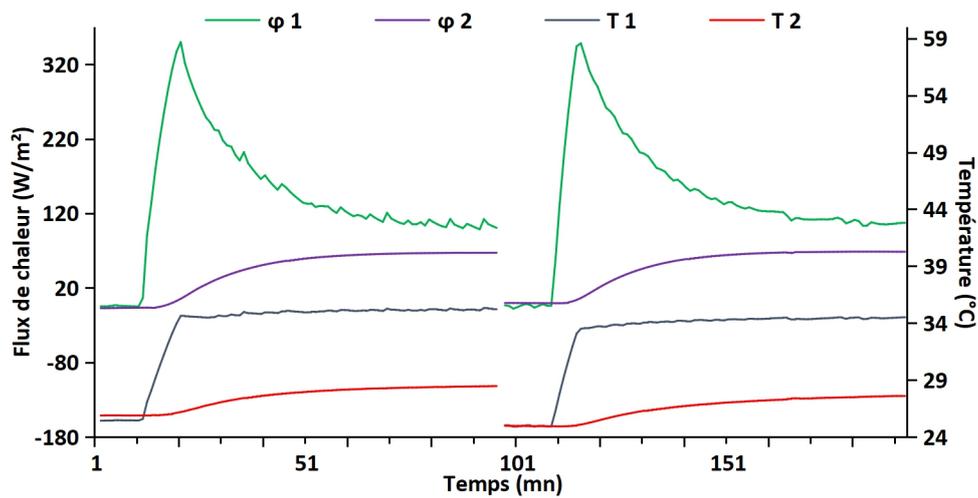


Figure 65. Évolution des flux thermique et des températures - détermination de la conductivité thermique du C-S25-b (25- 35 °C)

Tableau 32. Résumé des propriétés thermiques des échantillons testés (TESC-S25-b, C-S25-b et C-R)

Échantillon	Dimension (cm)	Composant	% _v	ρ (kg/m ³)	T (°C)	C _p (J/kg.K)	λ (W/m.K)	Q _s (kJ/kg)	L (kJ/kg)
TESC-S25-b	20x20x3.3	CLWA-S Béton	25 75	1898	10-15	C _s = 1093	$\lambda_s = 1.09$	4.88	---
					30-35	C _l = 1151	$\lambda_l = 0.72$	5.48	---
					10-35	C _t = 1145	---	29.43	19.07
C-S25-b	20x20x3.3	Sépiolite Béton	25 75	1750	10-35	C = 946	$\lambda = 0.46$	24.37	5.06
C-R	20x20x3.3	Béton	100	2195	30-35	C = 1132	$\lambda = 1.26$	5.71	---

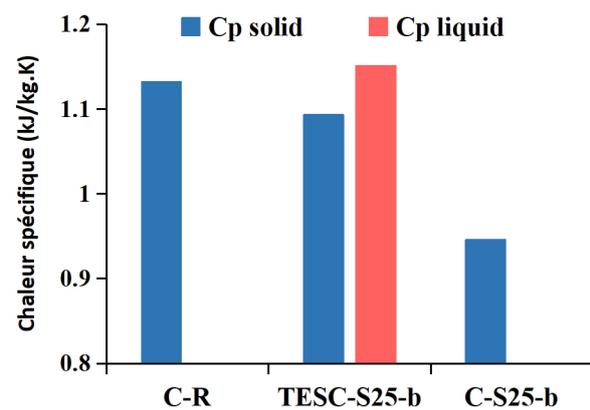
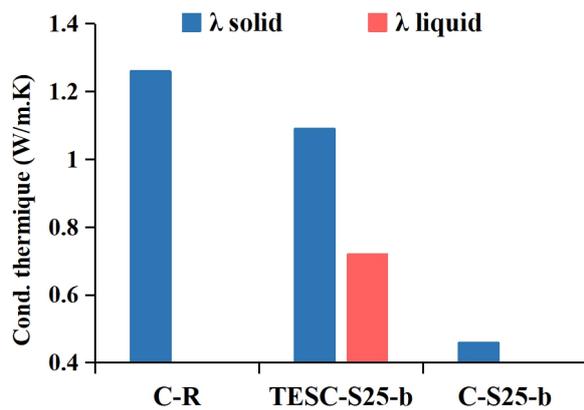


Figure 66. Comparaison des capacités thermiques Figure 67. Comparaison des conductivités thermiques

4.5 Conclusions

Sur la base de la méthode de « Dreux-Gorisse, des échantillons de béton ordinaire et de bétons imprégnés de matériaux à changement de phase, sont réalisés puis ont subi des tests d'évaluation de leurs caractéristiques mécaniques.

Réalisés sur le béton ordinaire (témoin), ces essais mécaniques et les valeurs de la résistance obtenus ont permis de valider la méthode de formulation de ce béton et de déterminer les dosages de ses différents composants. Cette formulation de base a été reconduite par la suite pour les bétons imprégnés. Les tests mécaniques effectués sur ces derniers ont permis de mettre en évidence l'extrême fragilité du béton contenant le gel de silice (TESC-SG), et à l'opposé la bonne tenue pour la sépiolite. C'est l'ajout de MCP composite par substitution au sable qui est le scénario le plus favorable.

À l'issue de ces mesures, c'est le béton imprégné de MCP dénommé TESC-S25-b, qui s'est révélé comme le matériau le mieux adapté, c'est-à-dire celui qui réalise la plus faible diminution de résistance pour le plus grand volume de MCP. Il est soumis par la suite à des tests mécaniques spécifiques après vieillissement par cyclage thermique naturel (8 mois d'exposition aux conditions climatiques extérieures) et artificiel (100 cycles thermiques de 24h à 45 °C et 24h à 5 °C) ; des baisses de 2.37 % et de 4.68 % ont été observées sur sa résistance à la compression.

En se basant sur ces premières constatations, ce matériau a été finalement retenu pour subir les essais thermiques prévus dans la suite de nos travaux, des caractérisations multi-échelles et des expériences plus approfondies sur l'aspect thermique qui seront présentées dans les chapitres suivants.

À une échelle macroscopique, le dispositif dit des plaques chaudes gardées est utilisé pour quantifier expérimentalement la conductivité thermique, les capacités thermiques spécifiques et les quantités de chaleur stockées. Les tests ont concerné des échantillons de béton ordinaire, de béton contenant de la sépiolite et du béton contenant de la sépiolite

imbibée de graisse en phase liquide puis en phase solide. Ces expériences ont montré que l'ajout de MCP au béton lui permet de stocker un peu plus d'énergie thermique, tout en lui donnant une conductivité thermique plus faible. Ces résultats combinés à une densité réduite du fait de la substitution du sable par la sépiolite dans la composition des bétons, sont très intéressants dans la perspective de l'amélioration simultanée de l'inertie et de l'isolation thermiques des parois avec une réduction d'environ 14% de leur poids.

5

**ÉTUDE À L'ÉCHELLE RÉELLE PAR
LE MOYEN DE CELLULES-TEST**

5 Étude à l'échelle réelle par le moyen de cellules-test

5.1 Introduction

Dans le secteur de la construction, la tendance est à la réduction de l'épaisseur des murs pour en diminuer le poids, les coûts de transport et le temps de construction. Les enveloppes légères sont de plus en plus fréquemment utilisées dans les bâtiments modernes ; Cependant elles présentent l'inconvénient d'une inertie thermique insuffisante. Une des solutions préconisée par bon nombre de spécialistes est d'incorporer un MCP dans l'enveloppe [156].

Ce dernier chapitre de notre thèse est consacré à l'évaluation des performances thermiques d'une cellule-test appelée TESC-S25-b-Cell conçue avec des panneaux muraux légers de béton dont le sable, qui représente 25% du volume total, est remplacé par un même volume de sépiolite imprégnée de graisse végétale (huile de coprah). Cette cellule est soumise aux aléas des variations climatiques sur quelques jours en même temps qu'une autre cellule, de mêmes dimensions, aux parois en béton ordinaire appelée C-R-Cell, à des fins de comparaison. Les mesures ont porté sur la température de l'air à l'intérieur et à l'extérieur des cellules, la température des parois ainsi que sur les flux de chaleur échangés au niveau des parois et la quantité de chaleur absorbée par ces parois. Une attention particulière est prêté à la température interne, paramètre essentiel du confort thermique des cellules.

Pour réduire les apports de chaleur extérieurs et augmenter la résistance thermique des panneaux, des plaques isolantes en polystyrène sont collées aux parois de béton. Les panneaux de TESC-S25-b démontrent un potentiel d'inertie thermique intéressant, mais l'ajout de panneaux d'isolation donne un complexe mural, toujours léger, plus efficace, avec des qualités combinées d'isolation et d'inertie thermique. Sur les cinq scénarii proposés à l'expérimentation, deux cas concernent ce type de parois équipées de panneaux d'isolation.

Les expériences sont réalisées dans l'enceinte de l'ex institut d'architecture de l'université de Tizi Ouzou (Algérie) où les deux cellules-test sont disposées l'une à côté de l'autre au milieu d'un espace ouvert et ensoleillé, suffisamment éloignées l'une de l'autre pour éviter les effets d'ombre. La région de Tizi Ouzou, située au nord de l'Algérie est représentative du climat méditerranéen type, relativement proche du climat du Sud de la France. Il est caractérisé par des hivers humides et froids et des étés chauds et secs, marqué par des amplitudes de température assez importantes entre le jour et la nuit. *La figure 68* montre les moyennes mensuelles des températures maximales et minimales enregistrées par la station météorologique locale de l'office national de météorologie (ONM).

Le MCP utilisé est une graisse végétale de type huile de coprah 23-26, dont la chaleur latente de fusion a une valeur variant de 72 à 91.6 kJ/kg selon les tests DSC menés sur ce MCP. Les plages de température de fusion et de solidification du MCP composite (GV+S) correspondant à un cycle de fusion/solidification complet sont compatibles avec les

conditions climatiques de la période estivale hors périodes de canicules, c'est-à-dire des températures diurnes supérieures à 25 °C et nocturnes inférieures à 16 °C. Au vu des températures extérieures dans la région de Tizi-Ouzou (voir données du climat pour la décennie 2008-2018 sur la [Figure 68](#)) et des caractéristiques thermodynamiques du MCP utilisé dans le béton des cellules, les cycles de stockage-déstockage d'énergie par chaleur latente restent totalement actifs pendant les mois de mai, juin et octobre et partiellement durant les mois d'avril et de septembre, mais pour les mois de juillet et août qui sont les mois les plus chauds de l'année, les températures nocturnes sont trop élevées pour permettre la solidification de l'huile de coprah. Par contre, en période hivernale, ce cycle peut très bien fonctionner car l'élévation de température au niveau des enveloppes est suffisante pour ce type de climat, une élévation qui est obtenue généralement de manière naturelle lorsque la journée est ensoleillée ou alors grâce aux dispositifs bioclimatiques telles que le mur trombe [62] dans les cas défavorables ; Le stockage thermique reste actif dans cette période et il peut apporter une part non négligeable au confort thermique hivernal.

Nos expériences, menées essentiellement en période estivale, ont démontré une augmentation de la capacité thermique de l'enveloppe des cellules par l'ajout des MCP, qui en stockant une part supplémentaire de l'énergie solaire incidente, conduit à la réduction de la température intérieure des cellules. Cet effet, positif pour le confort thermique des cellules, s'accompagne d'une réduction de l'épaisseur et donc du poids des panneaux muraux par comparaison aux panneaux muraux de béton ordinaire.

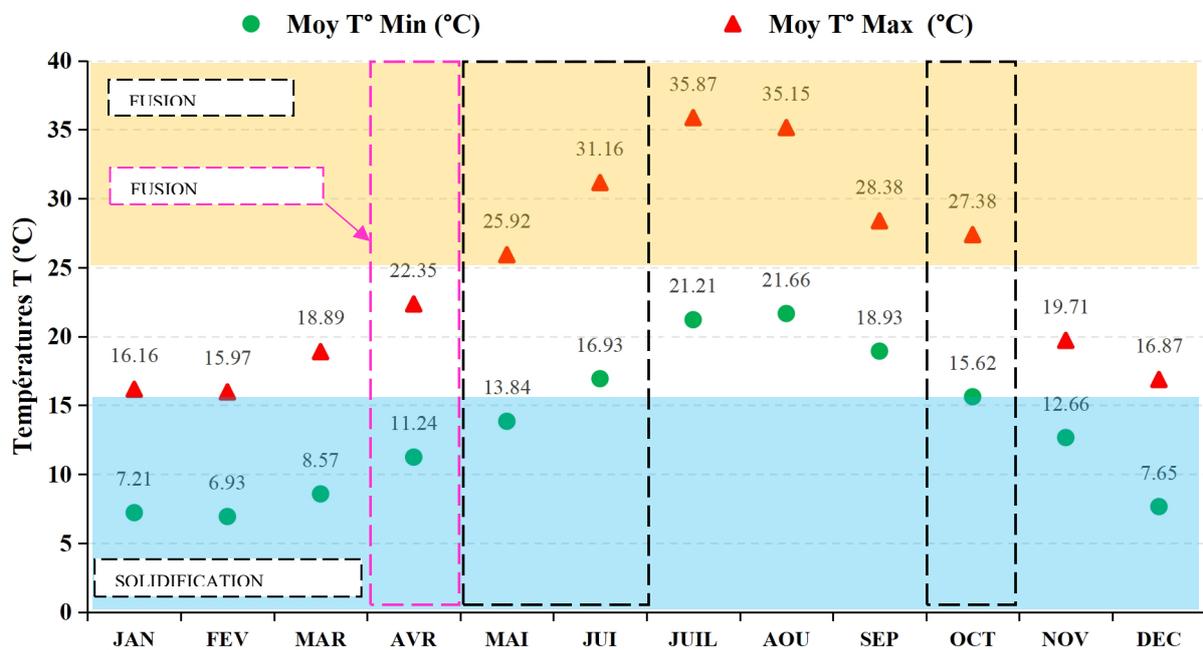


Figure 68. Performance du MCP en fonction des périodes de l'année et du climat

5.2 Démarche expérimentale

Les deux cellules-test expérimentées sont en réalité une reproduction avec un facteur 1/4 d'une pièce de taille réelle de 3 x 3 x 3 m³ comprenant une fenêtre aux dimensions standard (1,40 x 1.20 m²). Les détails sont consignés dans le [Tableau 33](#).

Tableau 33. Coefficient de réduction de dimension réalité/cellule-test

	Composant	Bâtiment	Coefficient	Cellule-test
Côté	Parois opaques	3 m		0.75
	Fenêtre	H : 1.40 m L : 1.20 m	1/4	H : 0.35 m L : 0.30 m
Surface	Parois opaques	9 m ²		0.562 m ²
	Fenêtre	1.68 m ²	1/16	0.105 m ²
Volume	Chambre/bureau	27 m ³	1/64	0.422 m ³

Le plan de travail pour cette partie expérimentale de nos travaux de thèse est composé de quatre étapes :

- 1) Conception et réalisation de l'ossature en bois des deux cellules-test.
- 2) Confection des moules et coulage des panneaux de béton.
- 3) Transfert à partir du laboratoire vers le site de mesure pour l'assemblage sur place des panneaux sur l'ossature.
- 4) Campagnes de mesures de température et de flux thermique sur les cellules-test exposées aux conditions climatiques extérieures avec enregistrement en temps réel des données.

Ces quatre étapes sont détaillées dans les points suivants.

5.2.1 Étapes 1 et 2 : Conception et construction des cellules-test

Des moules en bois de 77 cm de côté et de 3 cm de profondeur sont confectionnés au tout début. Comme le montre la [Figure 69](#), avant de procéder au coulage des bétons, les moules sont préalablement huilés et des treillis soudés en acier y sont posés. Après coulage uniforme du béton, les panneaux sont soumis à des opérations de vibration et de surfacage jusqu'à obtenir un béton de densité homogène avec une surface la plus horizontale possible. 24 heures plus tard, les panneaux sont décoffrés puis entreposés à l'abri du soleil, dans un endroit où la température et l'humidité restent constantes, en prenant le soin de les arroser en permanence pendant 28 jours.

Les panneaux, 12 au total pour les deux cellules, sont solidement fixés à une ossature formée à partir de tiges en bois de section 5x5 cm². La nature du bois a été choisie pour ses qualités d'isolation thermique, de solidité et de facilité d'usage et d'assemblage. Les cellules ainsi formées sont assimilables géométriquement à des cubes de 87 cm de côté.

Pour permettre une étude comparative, une des cellules ne comporte que des panneaux en béton ordinaire (C-R), c'est la cellule « témoin », tandis que la seconde est formée à partir

des panneaux de béton dans lesquels le sable, représentant 25% du volume total, est remplacé par des cLWA-S, de la sépiolite imbibée de MCP (TESC-S25-b).

5.2.2 Étapes 3 : Assemblage des éléments des cellules-test

Les deux cellules-test sont installées au milieu d'une vaste surface pleinement exposée au soleil, sans aucun obstacle physique aux alentours pouvant porter ombrage aux rayons solaires. Après des observations sur plusieurs jours, nous avons trouvé le positionnement idéal pour les cellules, avec une orientation Nord-Sud favorable à une exposition au soleil symétrique dans la journée. Les deux cellules sont suffisamment éloignées entre elles pour éviter des effets d'ombrage mutuels. Pour éviter les échanges thermiques avec le sol, les cellules sont relevées de 20 cm par le prolongement des tiges verticales de l'ossature en bois.

Les faces des cellules sont munies de panneaux en béton de 3 cm d'épaisseur à l'exception des faces non exposées au soleil, c'est-à-dire les faces inférieures et les faces Nord, lesquelles sont composées de panneaux de polystyrène de 5cm d'épaisseur (*Figure 69*). Les panneaux postérieurs orientés au nord comportent une ouverture de 35x30 cm² que l'on peut maintenir ouverte ou fermée en fonction des exigences de chaque expérience (*Figure 69*).

Les ouvertures sont pratiquées sur les façades nord pour réduire les apports solaires directs, ce qui affecterait quelque peu la pertinence des mesures.

La *Figure 69* présente les différentes étapes de production des panneaux et la composition des cellules.

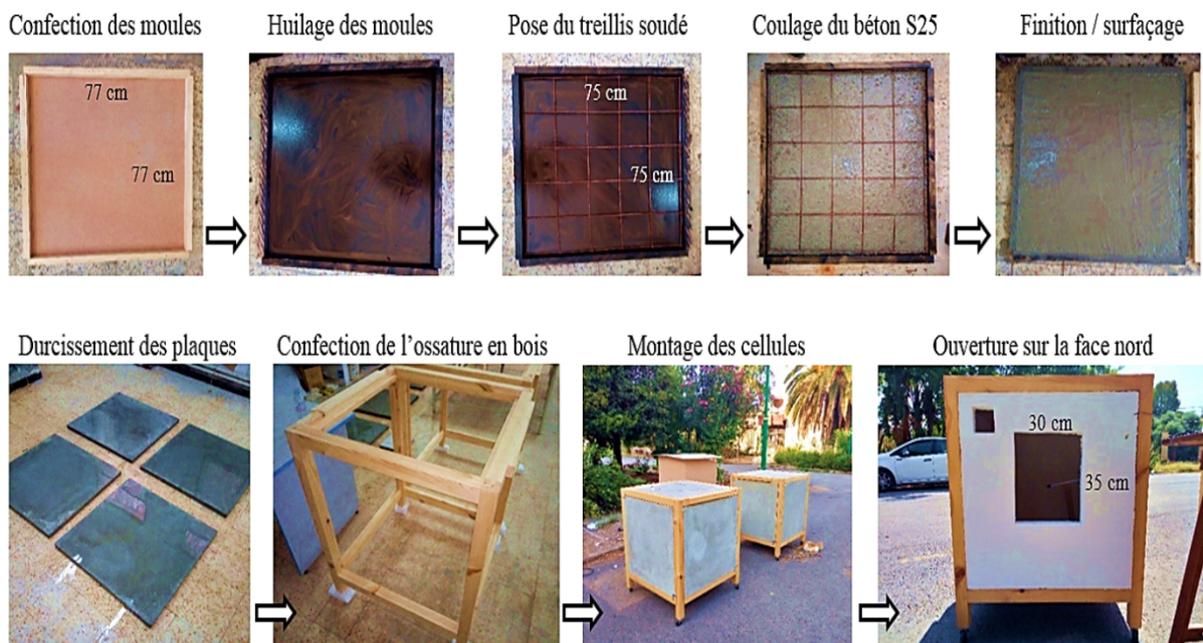


Figure 69. Étapes de la conception et de la construction des cellules

5.2.3 Étape 4 : Campagne de mesure ; instruments utilisés et paramètres étudiés

Les cellules-test sont équipées des mêmes instruments de mesure que ceux qui ont été utilisés dans les expériences précédentes : six thermocouples de type K et deux fluxmètres reliés à une chaîne d'acquisition pilotée par ordinateur pour la sauvegarde simultanée des mesures. Le micro-ordinateur et la chaîne d'acquisition sont placés sur toute la durée de la campagne expérimentale dans un abri météorologique conçu pour l'occasion. Ce sont huit capteurs, qui ont été utilisés pour équiper les deux cellules-test : 4 thermocouples et un fluxmètre pour la TESC-S25-b-Cell, un thermocouple et un fluxmètre pour la C-R-Cell et enfin 1 thermocouple pour la mesure de la température du milieu extérieur (voir [Figure 70](#)).

Cette dernière sonde est suspendue à 1.5 m du sol, placée à l'ombre, à l'abri des vents et de la pluie et suffisamment éloignée des deux cellules-test pour réduire les incertitudes de cette mesure. La température à l'intérieur des deux cellules-test est mesurée par des thermocouples placés au centre des cellules.

Les thermocouples de types K et les fluxmètres devant mesurer la température interne et de surface des panneaux supérieurs ainsi que les flux de chaleur les traversant, sont collés sur la surface à l'aide d'un ruban adhésif en aluminium, ce qu'il faut faire en empêchant la formation de toute poche d'air résiduel qui en fausserait les mesures. Le choix de faire ces mesures de flux en se limitant aux panneaux supérieurs est motivé par le fait que les apports thermiques sur la toiture des cellules représentent en été environ 70 % des apports globaux. D'où l'importance particulière à accorder à cette face. Le dispositif dans sa globalité est illustré par [Figure 71](#).



Figure 70. Plaques de béton équipées de thermocouples et fluxmètres

5.3 Les cinq scénarii expérimentaux

Les deux cellules-test sont soumises pendant plusieurs jours aux conditions climatiques extérieures suivant cinq scénarii différents (voir la composition des parois dans les cinq scénarii dans la [Figure 72](#) et le [Tableau 33](#)). Dans les deux premiers scénarii, les cellules ne comportent aucun dispositif d'isolation thermique avec des fenêtres fermées dans le premier cas et ouvertes dans le second. Dans le troisième essai, les panneaux muraux ne comportent pas de plaques isolantes et les fenêtres sont fermées le jour et ouvertes la nuit.

Enfin, les panneaux sont isolés en ajoutant une feuille de polystyrène de 1,5 cm d'épaisseur, côté intérieur dans le quatrième essai et côté extérieur pour la cinquième et dernière expérience en maintenant les fenêtres fermées pendant la journée et ouvertes pendant la nuit. L'intégration des feuilles d'isolant est rendue facile par la conception des cellules avec des panneaux muraux amovibles, cet ajout ne nécessitant ni démontage des panneaux et ni changement de structure. Dans ce type d'expérience, il est important de signaler que la surveillance rigoureuse et fréquente des instruments de mesures et de l'appareil d'enregistrement est à prendre en charge pendant tout le temps que durent les mesures. En effet, si des anomalies ou des incidents techniques surviennent à un moment quelconque de l'expérience, cela risque de remettre en question toute l'opération de mesure et l'exploitation de ses résultats.

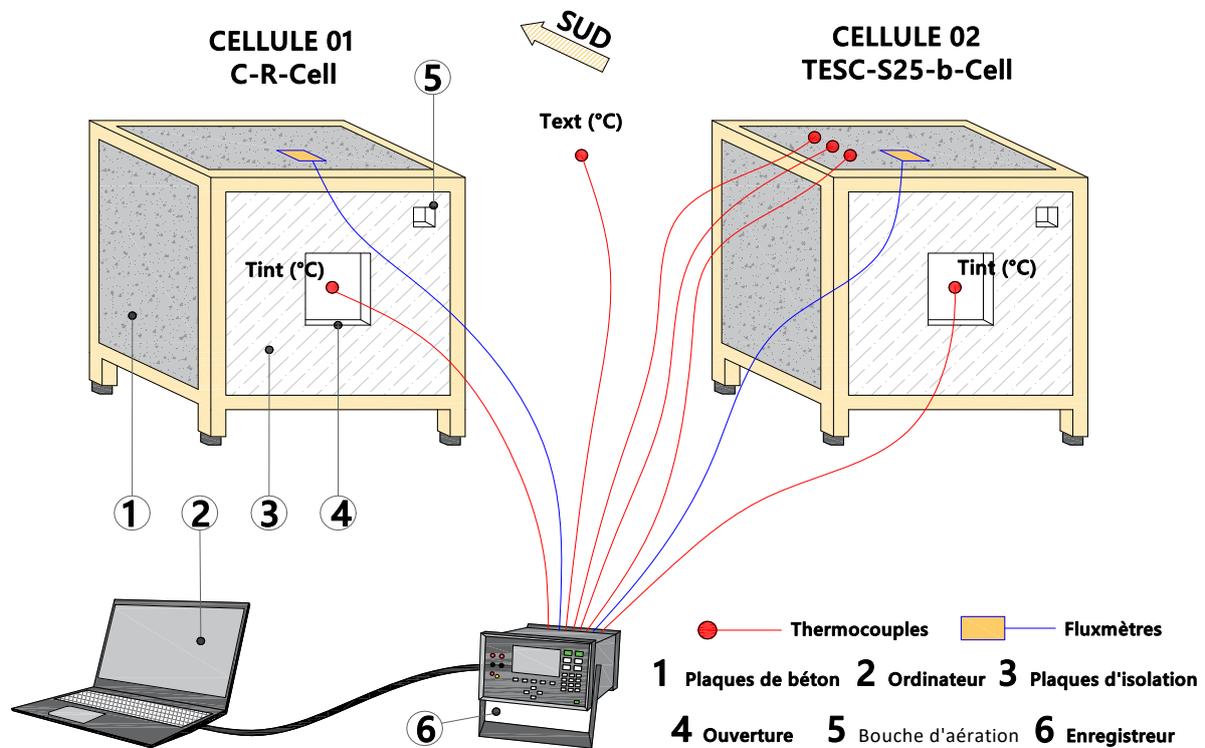


Figure 71. Schéma du dispositif expérimental des cellules-test

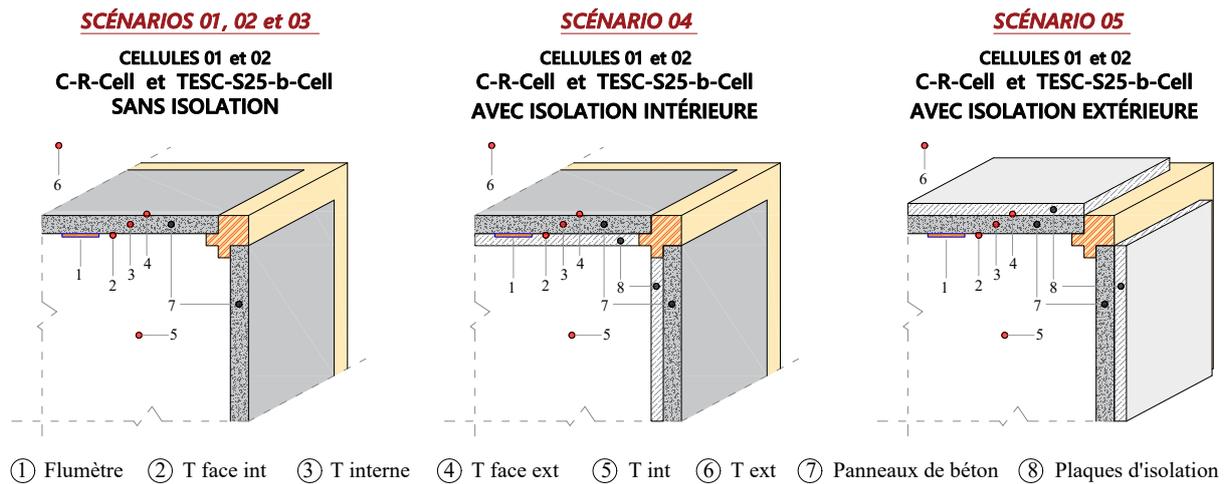


Figure 72. Composition des parois des cellules-test dans les 5 scénarii

Tableau 34. Caractéristiques thermo physiques des composants des cellules-test

Scénario	C-R-Cell					TESC-S25-b-Cell					e (m)
	Composition	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	ρ (kg/m ³)	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Ut (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Composition	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	ρ (kg/m ³)	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Ut (W.m ⁻² .K ⁻¹)	
4-5	Polystyrène	0.035	20	1450	2.09	Polystyrène	0.035	20	1450	Us = 2.07	0.01
	C-R	1.26	2195	1132		TESC-S25-b	λ_s : 1.09 λ_l : 0.72	1898	Cp _s : 1093 Cp _l : 1151	Ul = 2.01	0.03
1-3	C-R	1.26	2195	1132		TESC-S25-b	λ_s : 1.09 λ_l : 0.72	1898	Cp _s : 1093 Cp _l : 1151		0.03

5.3.1 Scénario 01 : Fenêtres fermées toute la journée -- sans isolation

Sur les trois journées successives de l'expérience, la température extérieure a une évolution similaire et atteint la même valeur maximale de 34 °C. À l'intérieur des cellules, la température maximale atteinte oscille entre 40 et 43 °C pour la TESC-S25-b-Cell et entre 41 et 44 °C dans le cas de la C-R-Cell. À l'exception d'une courte période entre 8h et 10h du matin, la température reste légèrement plus élevée dans la C-R-Cell et l'écart atteint à la mi-journée 1 °C. Une étude de Cabeza et al [62] menée sur deux cellules, béton brut pour l'une et MCP-béton pour l'autre, non isolées et fenêtres maintenues fermées, a rapporté qu'aucune différence n'est constatée à la mi-journée entre les températures maximales à l'intérieur des cellules [62].

Comme il était prévisible, la fermeture des fenêtres a entraîné une surchauffe (S) conséquente. Elle évolue dans la journée en phase avec la température extérieure et atteint un maximum d'environ 10 °C dans la C-R-Cell et 9 °C dans la TESC-S25-b-Cell. Ces valeurs sont rapportées dans le *Tableau 34* et la *Figure 73*. L'absence d'isolation thermique des cellules et leur dimension réduite, combinées à l'inexistence de ventilation, accentuent un peu plus ce phénomène de surchauffe.

Tableau 34. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules et valeur de la surchauffe dans le scénario 1

		T (°C)		
		Jour 1	Jour 2	Jour 3
	Text _{max}	33.5	34	34
C-R-Cell	Tint _{max}	41	44.5	42
TESC-S25-b-Cell	Tint _{max}	40	43	40.5

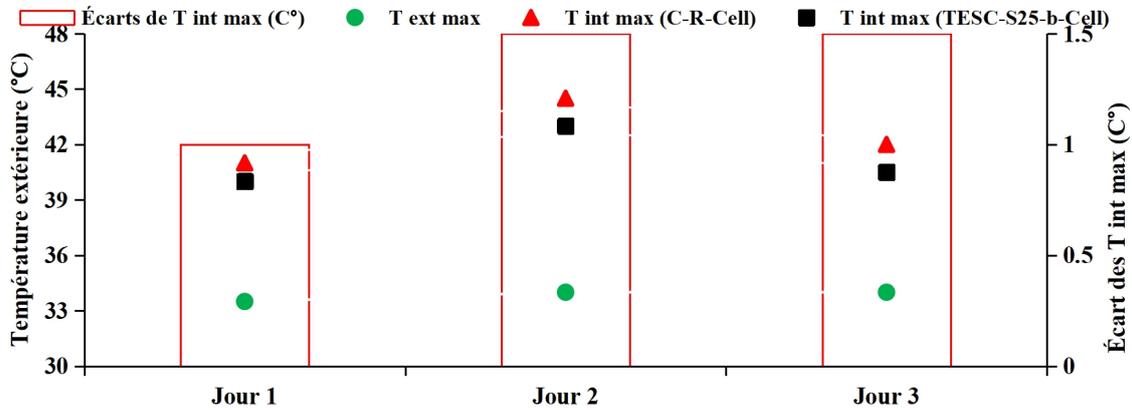


Figure 73. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules et valeur de la surchauffe dans le scénario 1

Estimé à partir de la [Figure 74](#), le déphasage thermique dans les deux cellules est quasi identique ($D \approx 1$ heure). Ainsi, il est d'environ 59 mn dans la C-R-Cell et il vaut 69 mn dans la TESC-S25-b-Cell, le MCP étant en phase liquide durant toute la durée de l'expérience. Durant ces journées, les températures extérieures nocturnes ne sont jamais descendues à un niveau suffisamment bas pour solidifier le MCP et activer le cycle de stockage-déstockage par chaleur latente.

Globalement, les flux enregistrés sur les deux cellules sont très voisins et suivent la même évolution journalière. Les valeurs numériques des flux sont cependant très légèrement différentes, plus importantes dans la C-R-Cell durant les périodes de sous-chauffe, en fin de journée et durant la nuit, et supérieures dans la TESC-S25-b-Cell entre 6h et 14h.

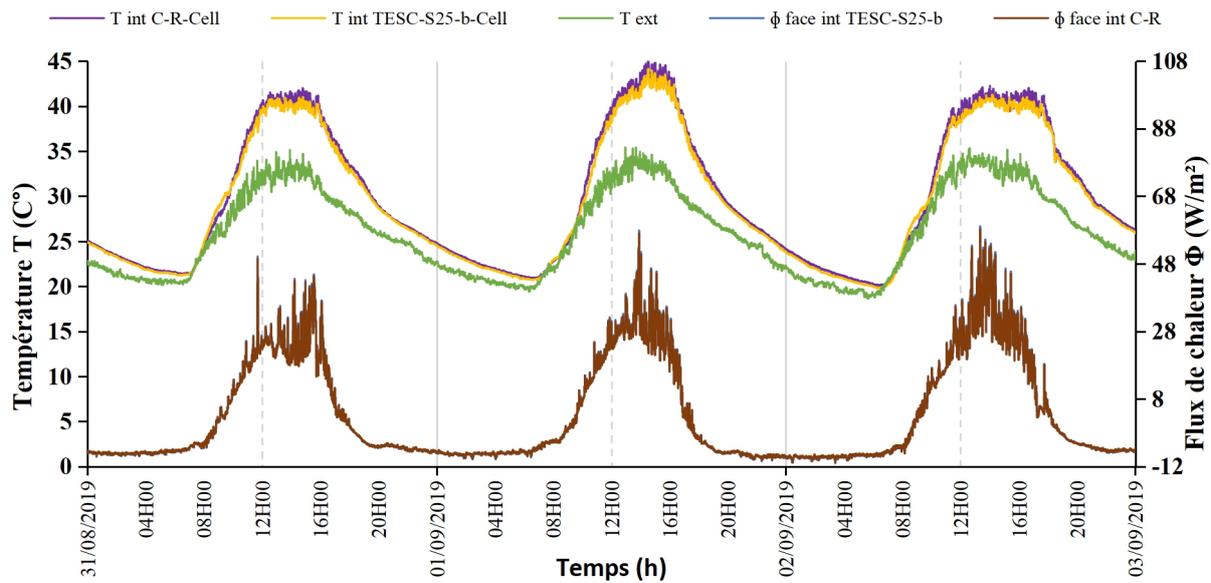


Figure 74. Variation des températures intérieures et extérieure des cellules-test et flux thermique traversant les parois supérieures (Scl)

5.3.2 Scénario 02 : Fenêtres ouvertes toute la journée -- sans isolation

Durant les trois journées de la campagne de mesures (le 3, 4 et 5 septembre 2019), le temps était ensoleillé avec une température extérieure maximale moyennement haute (de 31 °C à 35°C). À l'intérieur des cellules, la température maximale atteint en journée une valeur plus élevée que la température ambiante (environ 33 à 37 °C pour la TESC-S25-b-Cell et 34 à 38.5 °C pour la C-R-Cell) (Figure 76). Tempérée par la ventilation, la surchauffe, 2 °C pour la TESC-S25-b-Cell et entre 3 °C et 3.5 °C dans la C-R-Cell, est beaucoup moins importante (voir Tableau 35 et Figure 75). La température reste plus élevée dans la C-R-Cell, à l'exception de la période 8h- 10 h, avec un écart moyen à la mi-journée de 1.5 °C pour les deux premiers jours et 1 °C au troisième. La substitution du sable par la sépiolite imbibée de MCP a légèrement renforcé le caractère isolant des parois, synonyme de l'amélioration du facteur d'amortissement thermique des parois. Le flux de chaleur est plus important, dans la C-R-Cell en fin de journée et durant la nuit et dans la TESC-S25-b-Cell de 6h à 14h. Comme dans le premier scénario, le déphasage thermique est de l'ordre de 60 minutes environ pour les deux cellules. Là aussi les températures extérieures nocturnes ne sont pas suffisamment basses, le MCP est resté dans le domaine liquide et le stockage par chaleur latente est non activé.

Tableau 35. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules dans le scénario 2

	T (°C)	Jour 1	Jour 2	Jour 3
	$T_{ext_{max}}$	35	33.5	31
C-R-Cell	$T_{int_{max}}$	38.5	37	34
TESC-S25-b-Cell	$T_{int_{max}}$	37	35.5	33

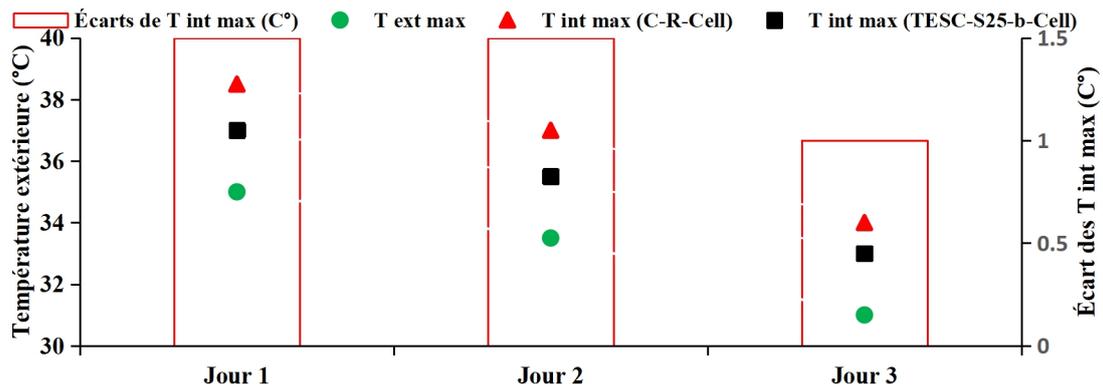


Figure 75. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules dans le scénario 2

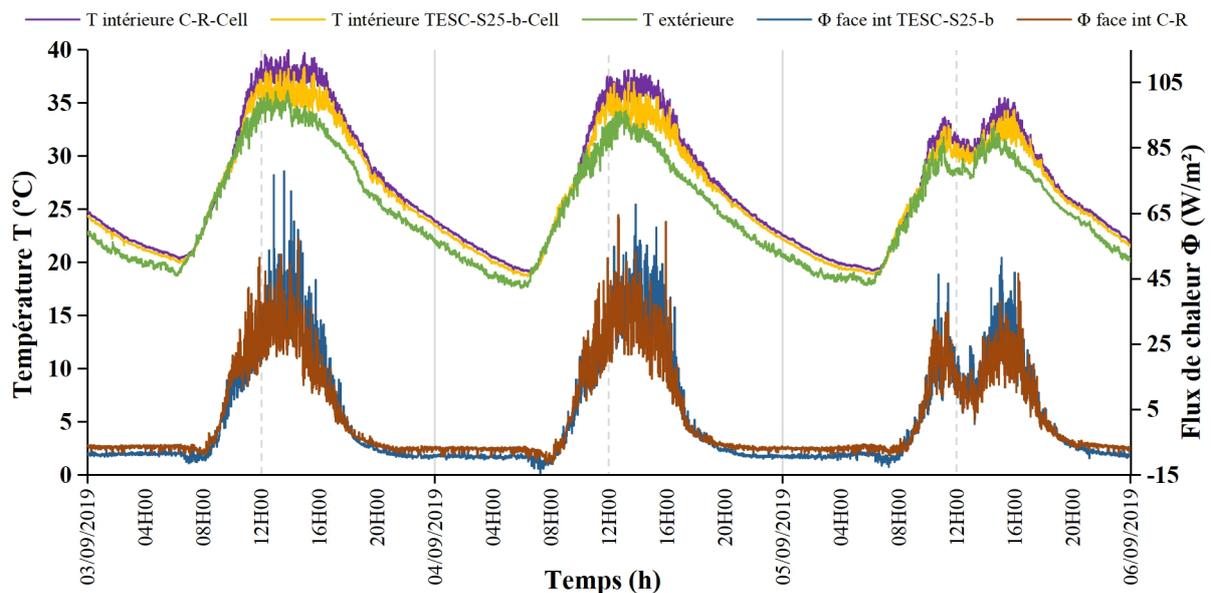


Figure 76. Variation des températures intérieures et extérieure des cellules-test et flux thermique traversant les parois supérieures (Sc2)

En conclusion de ces deux scénarii, les mesures de températures et flux effectuées, bien qu'intéressantes pour montrer certains aspects positifs dus à l'incorporation de la sépiolite imbibée de MCP dans le béton, ne sont pas suffisantes pour rendre compte de l'apport du MCP, car les températures extérieures nocturnes élevées n'ont jamais permis au processus de solidification de se faire. Concrètement, le MCP est resté liquide pendant toute la durée de ces expériences sans activation du stockage/déstockage par chaleur latente.

Le résultat le plus intéressant reste l'amélioration relative du facteur d'amortissement thermique dans la TESC-S25-b-Cell, qui semble être mieux isolée, surtout que c'est combiné avec une diminution de la densité moyenne des panneaux synonyme de panneaux plus légers (Tableau 35 et Figure 75). L'ouverture des fenêtres a apporté un rafraîchissement de l'ambiance intérieure des cellules et réduit la surchauffe mais sans pour autant assurer un niveau acceptable de confort thermique. Aussi, un gain important en masse a été réalisé, ce qui constitue un autre avantage de ce scénario.

C'est pour obtenir plus de renseignements sur ces cellules et analyser l'apport du MCP avec un cycle de changement de phase activé que des expériences complémentaires ont été menées sous des conditions climatiques plus favorables.

5.3.3 Scénario 03 : Fenêtres fermées le jour et ouvertes la nuit -- sans isolation

Les courbes tracées à partir des mesures de température et de flux de chaleur effectuées durant une période de 5 jours (du 27/09 au 01/10) dans les cellules-test ont des allures semblables avec cependant quelques différences en rapport avec leur isolation thermique. Durant les quatre premiers jours, la température est en effet inférieure d'environ 3 °C dans



Figure 77. Apparence extérieure des deux cellules-test dans les scénarios 1, 2 et 3

la TESC-S25-b- Cell.

Cependant, les niveaux de température restent excessivement élevés, avec un maximum d'environ 45 °C pour la TESC-S25-b- Cell et 48 °C pour la C-R-Cell. Entre 6h et 9h30, heure de fermeture de la fenêtre, la température interne augmente plus lentement que la température extérieure. Après 9h30, la température monte rapidement dans les cellules donnant des écarts entre les températures intérieures et extérieures maximales atteignant les 9 °C pour la TESC-S25-b-Cell et 12 °C pour la C-R-Cell. Dans le [Tableau 36](#) et la [Figure 78](#), on peut constater que l'écart moyen des températures maximales entre les faces intérieure et extérieure du panneau supérieur de la TESC-S25-b-Cell est de 3 °C. Il devient insignifiant pour les températures minimales (autour de 0.15 °C).

Le déphasage thermique moyen calculé donne 69 min pour la TESC-S25-b-Cell avec un MCP à l'état liquide, et 59 min dans la C-R-Cell, et la TESC-S25-b-Cell avec le MCP à l'état solide.

Le déphasage thermique moyen relevé sur le graphique des deux cellules ([Figure 79](#)) est d'environ 1.5 heures. Ainsi, environ 2 heures plus tôt, la température dans la C-R-Cell a déjà atteint la même valeur que la température maximale de la cellule TESC-S25-b-Cell.

Concernant les flux de chaleurs enregistrés dans les deux cellules-test, l'évolution est globalement la même, avec cependant des valeurs plus faibles sur la face intérieure du toit de la TESC-S25-b-Cell.

Durant la campagne de mesures, le temps était ensoleillé jusqu'à la quatrième journée, puis très pluvieux au cinquième ; les températures diurnes étaient élevées, largement au-dessus de la température de fusion de l'huile de coprah et durant les nuits, elles ont baissé pour se situer dans l'intervalle 15 °C à 25 °C permettant ainsi sa solidification. En d'autres termes, les conditions météorologiques étaient favorables pour le cycle de changement de phase du MCP.

Cette configuration sans isolation est celle qui permet d'observer au mieux l'effet thermique des MCP et leur impact sur le confort thermique à l'intérieur des cellules-test [62]. Effectivement, l'examen des courbes des flux et de températures des cellules-test permet de déceler une relative efficacité du procédé avec une baisse des valeurs pour la température dans la TESC-S25-b-Cell et des flux de chaleurs échangés avec l'intérieur de cette cellule par suite du stockage d'une partie de la chaleur reçue sous forme de chaleur latente. En période nocturne, ce flux est plus élevé dans la TESC-S25-b-Cell, ce qui s'explique par le déstockage de l'énergie thermique absorbée par ses parois pendant la journée, plus importante par rapport à celle qui a été stockée par les panneaux de la C-R-Cell.

Compte tenu de ces résultats, la cellule TESC-S25-b-Cell, telle qu'elle a été conçue avec des panneaux de béton imprégnés de MCP a eu un comportement très prometteur. Une amélioration par rapport à la C-R-Cell est constatable, ceci malgré la qualité assez moyenne du MCP utilisé, une graisse végétale de chaleur latente relativement modérée. Notons que dans ces expériences, la température intérieure dans la TESC-S25-b-Cell reste toutefois assez élevée. Le déphasage et l'amortissement thermiques peuvent être augmentés avec une épaisseur de parois plus importante, une plus grande quantité de MCP incorporé ainsi que par l'ajout d'une plaque isolante sur les panneaux.

C'est pour cela et pour avoir une simulation qui se rapproche le mieux de la réalité du bâtiment que deux autres expériences ont été menées sur ces cellules où des feuilles de polystyrène sont rajoutées sur les faces intérieures des panneaux de béton pour la première expérience puis sur leurs faces extérieures pour la seconde. Les mesures sur ces cellules ont duré sept jours successifs à fenêtres ouvertes la nuit et fermées le jour.

Tableau 36. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules et valeur de la surchauffe dans le scénario 3

	T (°C)	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4
	Text _{max}	35.5	36.5	36.5	37.5
C-R-Cell	Tint _{max}	47.5	47.5	47.5	47
TESC-S25-b-Cell	Tint _{max}	44.5	44.5	44.5	45

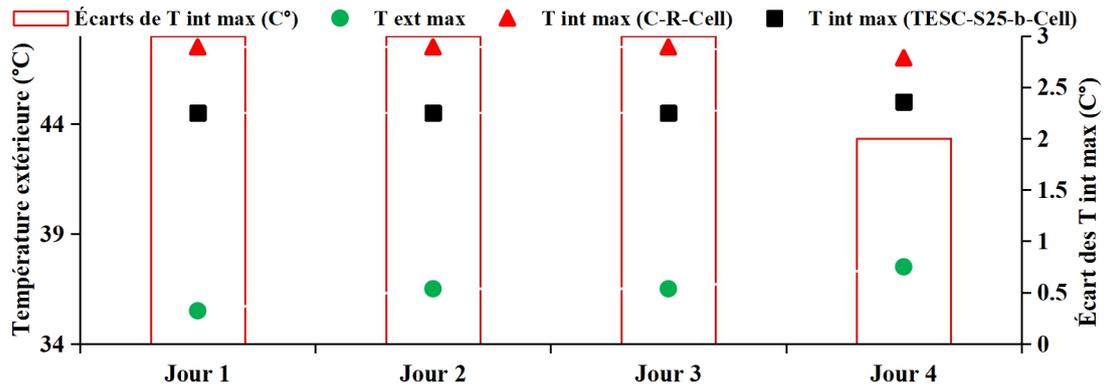


Figure 78. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules dans le scénario 3

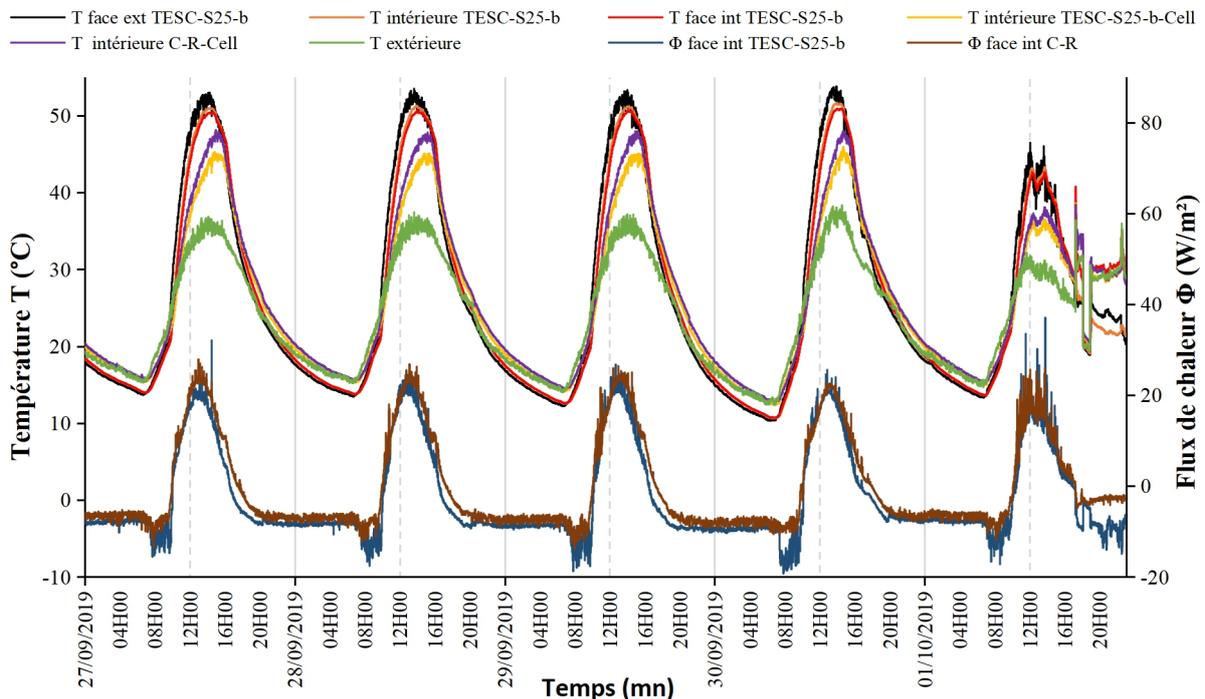


Figure 79. Variation des températures intérieures et extérieures des cellules-test et flux thermique traversant les parois supérieures (Sc3)

5.3.4 Scénario 04 : Fenêtres fermées le jour et ouvertes la nuit – isolation intérieure

Bien que les courbes de flux et de température suivent des allures semblables, les performances thermiques des deux cellules sont légèrement différentes. La nuit, les courbes de température interne se rejoignent et se confondent pour les deux cellules. En journée, l'écart entre les températures intérieures et extérieures est assez important dans les deux cellules. Il est inférieur de 2 °C en moyenne dans la TESC-S25-b-Cell.

Le déphasage thermique se situe dans l'intervalle 30-80 min avec une surchauffe (S) plus importante au fur et à mesure que la température extérieure augmente. Elle atteint un maximum d'environ 5°C pour la TESC-S25-b-Cell et 6.5°C pour la C-R-Cell. Les valeurs maximales de surchauffes enregistrées dans chaque cellules-test sont consignées dans le [Tableau 37](#) et la [Figure 81](#).

Globalement, les courbes des flux mesurés sur les deux cellules-test suivent la même allure avec des valeurs assez voisines. Il faut constater en période nocturne que sur le panneau du toit de la TESC-S25-b-Cell, le flux de chaleur échangé côté extérieur est plus important que celui qui est échangé avec l'intérieur de la cellule.

Excepté le deuxième jour marqué par des intempéries et une température qui évolue sous les 30 °C, les autres jours étaient sous un ciel parfaitement dégagé avec des températures élevées le jour et assez basses la nuit, oscillant entre 12 °C et 41 °C. Suivant la [Figure 82](#) les températures maximales relevées à l'intérieur des plaques de béton et sur leurs deux faces se situent entre 43 °C et 51 °C le jour et entre 8 °C et 12 °C la nuit ; un intervalle de température au final, de 8°C à 51°C, favorable aux changements de phase, fusion et solidification totales du MCP contenu dans le béton, selon l'analyse DSC menée sur l'huile de coprah, seule ou dans sa matrice de sépiolite. Le dispositif d'isolation thermique par l'intérieur n'a pas suffi à faire baisser la température intérieure des deux cellules-test au-dessous de la température extérieure, un écart de température intérieur/extérieur autour de 4°C est constaté en période diurne. En effet les températures relevées sur la toiture sont très élevées et sont à l'origine de l'échauffement des cellules lorsque les fenêtres sont fermées. Comme dans les expériences précédentes, les surchauffes dans la TESC-S25-b-Cell sont inférieures à celles de la C-R-Cell (voir [Tableau 37](#) et [Figure 81](#)).

Durant la période nocturne où les températures sont basses et inférieures à la plage de fusion du MCP, les températures des panneaux de béton sont largement inférieures à la température extérieure du fait du rayonnement nocturne, tandis que les températures à l'intérieur des deux cellules-test sont quasiment similaires à la température extérieure en raison des échanges par convection par les fenêtres laissées ouvertes. La position de la plaque isolante côté intérieur réduit le transfert vers la cellule de la chaleur stockée le jour par les panneaux.



Figure 80. Apparence intérieure des cellules-test dans le scénario 4

Les résultats obtenus lors de ces expériences –les écarts de température, entre les deux faces des panneaux de TESC-S25-b et entre la température de l'air extérieur et la température interne des cellules ainsi que la comparaison des performances thermiques de la TESC-S25-b-Cell et de la C-R-Cell- conduisent à des conclusions similaires à celles de la littérature. C'est-à-dire que les MCP utilisés dans le béton en tant que dopant thermique peuvent être à l'origine de gains de température entre 1 °C à 7 °C [163], [62].

Concernant les flux de chaleur mesurés grâce aux fluxmètres installés entre les panneaux de béton et les feuilles de polystyrène, ils atteignent des valeurs maximales moyennes d'environ 20 W.m⁻² durant la période diurne coïncidant avec la phase de stockage de chaleur par les panneaux de béton, et 4 W.m⁻² durant la période nocturne correspondant à la phase de restitution de cette chaleur. Lorsque nous regardons de plus près les courbes de flux, nous constatons une légère supériorité du flux enregistré dans la TESC-S25-b-Cell à la mi-journée et pendant la nuit.

Tableau 37. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules et valeur de la surchauffe dans le scénario 4

T (°C)		Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4	Jour 5	Jour 6	Jour 7
C-R-Cell	T _{ext} _{max}	36	--	29	35	36	36	37
	T _{int} _{max}	41	--	34	39	40	42.5	39
TESC-S25-b-Cell	T _{int} _{max}	39	--	33	37.5	37.5	41	37

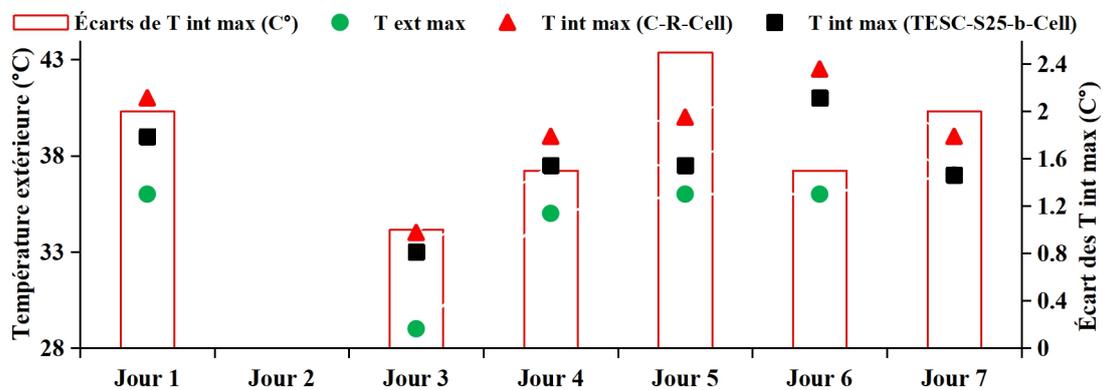


Figure 81. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules dans le scénario 4

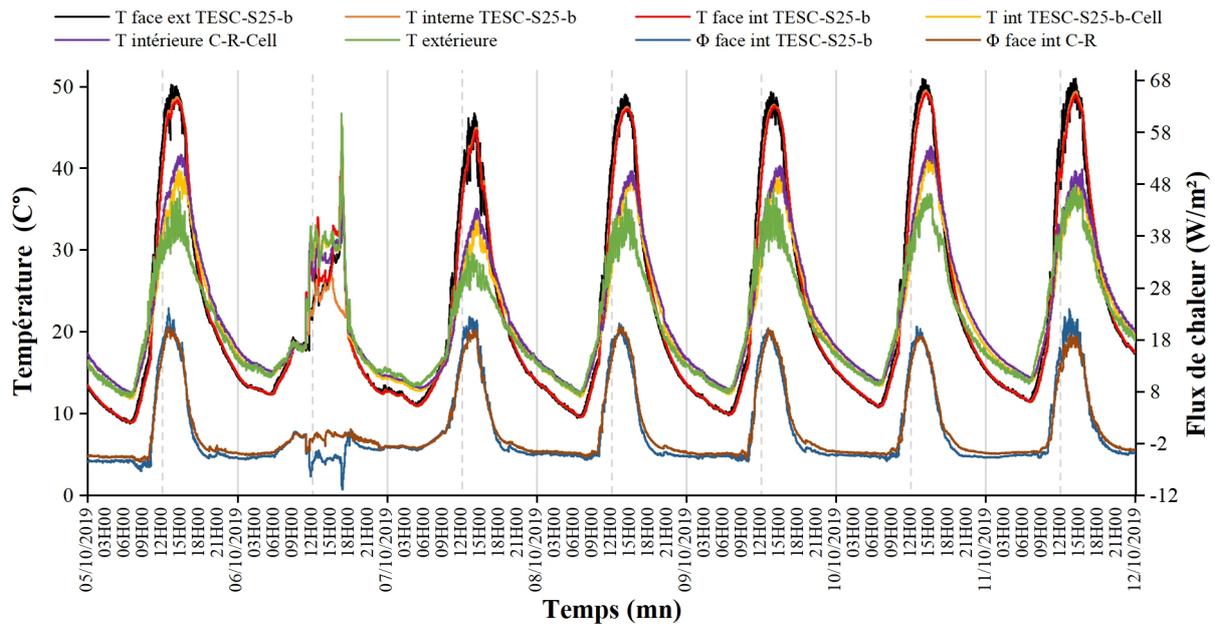


Figure 82. Variation des températures intérieures et extérieure des cellules-test et flux thermique traversant les parois supérieures (Sc4)

5.3.5 Scénario 05 : Fenêtres fermées le jour et ouvertes la nuit – isolation extérieure



Figure 83. Apparence extérieure des cellules-test dans le scénario 5

Ces expériences, menées du 13 octobre 0h au 15 octobre 24h, montrent certaines différences dans le comportement thermique des deux cellules-test. Une analyse affinée des courbes de températures permet de distinguer trois phases : une première période qui dure 2 à 3h et débute aux premières heures de l'aube ; les fenêtres sont à ce moment de la journée encore ouvertes, et la température ambiante à l'extérieur assez basse (environ 15°C). Dans cette phase, la température dans la TESC-S25-b-Cell est légèrement supérieure à celle de la CR-Cell.

Suit une deuxième phase pendant la période diurne de la journée, qui dure une dizaine d'heure ; les fenêtres sont en position fermée. Dans cette phase qui se termine en fin d'après-midi aux environs de 18h, les deux courbes se confondent presque, les deux températures étant assez voisines.

En soirée et après l'ouverture des fenêtres, commence la troisième phase caractérisée par une courbe de température de la TESC-S25-b-Cell qui passe peu à peu et légèrement au-dessous de celle de la CR-Cell, ceci jusqu'à atteindre une différence de température d'environ 1 °C.

Toujours à partir de ces deux courbes, on constate que le fait de mettre l'isolant du côté externe des panneaux a de l'effet sur le taux d'amortissement (A). Il devient plus important que dans le cas de l'isolation interne. En effet, grâce à cette disposition, les températures dans les deux cellules ont baissé, et sont même restées inférieures à la température ambiante durant la période la plus chaude de la journée. L'atténuation de température s'accroît au fur et à mesure que la température extérieure augmente et atteint un maximum d'environ 7°C. Le déphasage entre les deux courbes est en moyenne de 2,5 heures.

Concernant les conditions météorologiques, il y a lieu de préciser qu'à partir du deuxième jour, le climat s'est adouci avec des températures n'excédant pas 30°C et un ciel entièrement dégagé au premier jour puis partiellement voilé. La campagne de mesures s'est achevée à la fin du troisième jour sous la contrainte des fortes pluies survenues à la mi-journée du quatrième jour.

Comme signalé précédemment, la température limite de solidification du MCP utilisé dans les panneaux, l'huile de coprah, se situe aux alentours de 15 °C, température minimale à atteindre pour s'assurer que le MCP se solidifie entièrement, et restitue toute la chaleur emmagasinée pour fondre. Durant nos expériences, ces conditions n'ont pas toujours été atteintes, ce qui a réduit quelque peu l'impact de ce phénomène sur le confort thermique de la cellule-test, l'efficacité des panneaux étant conditionnée par le taux de fonte et solidification des MCP qu'ils contiennent.

Concernant les flux de chaleur échangés entre les faces internes des panneaux avec l'intérieur des cellules et l'étude comparative de leur évolution dans les deux cellules, on distingue trois zones comme pour les températures. Une première phase au petit matin dans laquelle le flux des panneaux de la TESC-S25-b-Cell sont plus importants, suivie d'une seconde où la tendance est inversée et qui dure jusqu'à la fin de l'après-midi. La troisième phase, nocturne, est marquée par des flux qui ont tendance à s'égaliser. Notons que le sens des flux est imposé par le signe des gradients de température entre l'intérieur des cellules, la paroi des panneaux et le milieu ambiant extérieur. Le flux maximal échangé et cédé par le milieu extérieur est de l'ordre de 30 W/m², il est atteint en milieu de journée. Les flux évoluent en cloche et diminuent sensiblement en fin de journée. Dans cet intervalle de temps, la température des parois devient supérieure à celles des cellules et du milieu extérieur et le flux est ainsi dirigé de la paroi vers l'intérieur. Sur les deux premiers jours, il

atteint en période nocturne une valeur maximale de -10 W.m^{-2} pour les panneaux de la TESC-S25-b-Cell, lesquels manifestent un potentiel de restitution de chaleur légèrement supérieur à celui des panneaux de la C-R-Cell. Ce qui s'explique par le fait que le MCP commence à se solidifier suite à la baisse des températures, le flux de chaleur latente venant s'ajouter au flux sensible. La valeur de ces flux est négative, indiquant que les flux ont changé de sens, la température des panneaux ayant dépassé celle des cellules. Lorsque le changement de phase solide-liquide est terminé, ce qui arrive lorsque les températures sont suffisamment élevées en milieu de journée, le flux échangé par les panneaux de CR-Cell devient plus important, dû à une conductivité thermique meilleure, les panneaux TESC-S25-b étant plus isolants.

Tableau 38. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules et valeur de la surchauffe dans le scénario 5

	T (°C)	Jour 1	Jour 2	Jour 3
	$T_{\text{ext}_{\text{max}}}$	38	28	30.5
C-R-Cell	$T_{\text{int}_{\text{max}}}$	31	25.5	25
TESC-S25-b-Cell	$T_{\text{int}_{\text{max}}}$	31	25.5	25

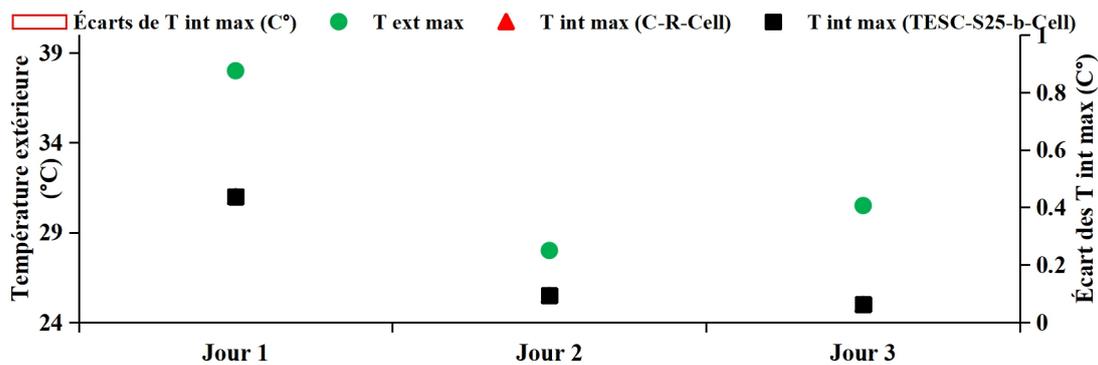


Figure 84. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules dans le scénario 5

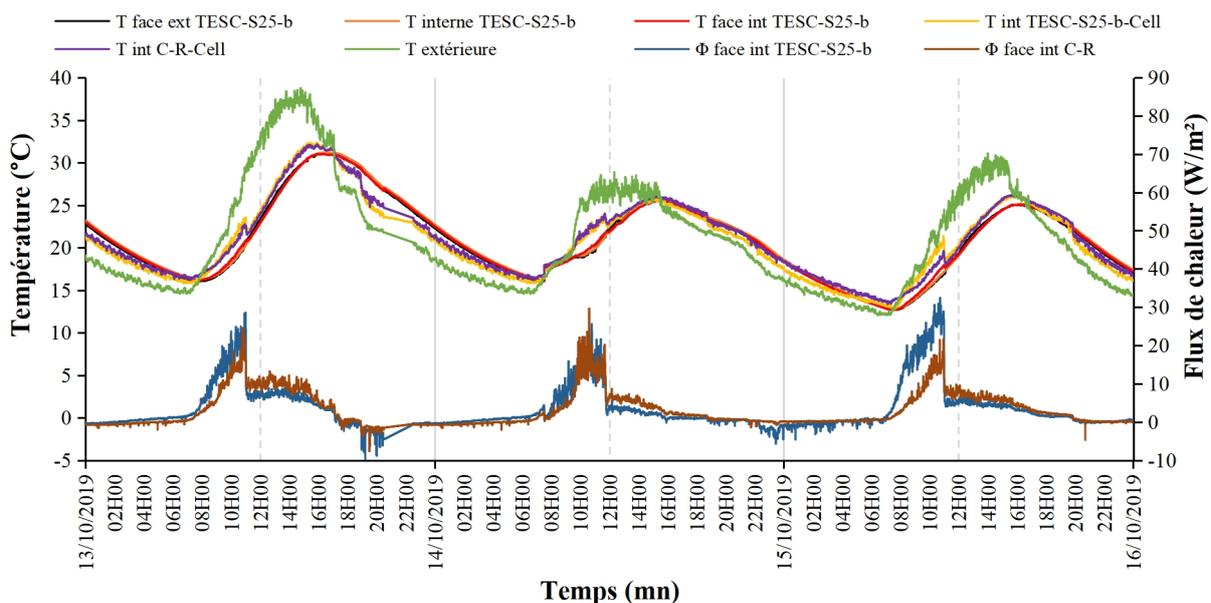


Figure 85. Variation des températures intérieures et extérieures des cellules-test et flux thermique traversant les parois supérieures (Sc5)

5.3.6 Synthèse

La [Figure 86](#) donne un aperçu général des écarts des températures enregistrées à l'intérieure des deux cellules. À noter que toutes ces valeurs sont à la faveur de la TESC-S25-b Cell ($T_{int\ max\ C-R\ Cell} \geq T_{int\ max\ TESC-S25-b\ Cell}$). On peut clairement y observer l'efficacité des scénarii 3 (sans dispositif d'isolation thermique et avec les fenêtres fermées le jour et ouvertes la nuit) et 4 (avec dispositif d'isolation thermique par l'intérieur et avec les fenêtres fermées le jour et ouvertes la nuit).

L'apport des MCP se fait le plus ressentir lorsqu'on n'utilise pas d'isolation thermique et en maintenant les fenêtres fermées le jour et ouvertes la nuit. Cette configuration permet une meilleure efficacité de MPC en garantissant les conditions optimales pour la production du processus de fusion/solidification. L'isolation appliquée de l'intérieur dans le scénario 4, ralenti certes la diffusion de la chaleur vers l'intérieur des cellules mais l'empêche dans l'autre sens ce qui crée une accumulation de chaleur à l'intérieur des cellules. Dans le scénario 5, l'écart de température était à chaque fois nul car l'application de l'isolation thermique de l'extérieur ne permet pas au MCP de réaliser pleinement son processus de fusion/solidification, ce qui le rend inerte et sans apport particulier mis à part la réduction du poids de parois de béton.

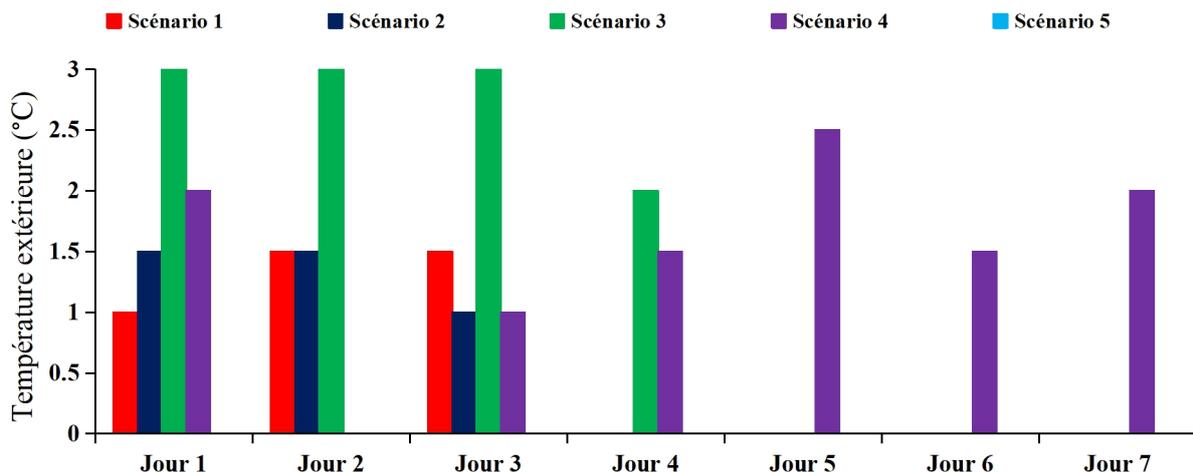


Figure 86. Écarts de température intérieure maximale entre les deux cellules ($T_{int\ max\ CR-Cell} \geq T_{int\ max\ TESC-S25-b\ Cell}$ dans les cinq scénarii)

Aussi, il est utile de faire une comparaison du comportement thermique de la cellule TESC-S25-b en envisageant les trois situations testées, à savoir : parois non isolées, parois isolées de l'intérieur et enfin isolation extérieure des parois. Les températures de la toiture, côté interne, et de l'intérieur de la cellule sont comparées à la température extérieure, ces températures étant relevées durant trois jours, le 29 septembre puis le 11 et 13 octobre ; des jours aux conditions météorologiques similaires avec une température maximale de 37 °C et minimale de 14 °C.

Les résultats sont, à l'évidence, assez différents d'une configuration à l'autre. La [Figure 87](#) et la [Figure 88](#) montrent un avantage à l'isolation par l'extérieur. Cette configuration est en effet la seule qui permette d'amortir effectivement les températures extérieures et de

réaliser un déphasage thermique suffisant. Mais, comme nous l'expliquions dans les paragraphes précédents, l'hypothèse selon laquelle les MCP n'y apportent aucune contribution est très plausible. La configuration la plus défavorable est celle des panneaux non isolés (scénario 3), avec une surchauffe très importante à l'intérieur de la cellule et sur la face intérieure du toit en dépit d'un certain déphasage thermique. À l'opposé des autres scénarii, l'isolation extérieure du scénario 5, permet la nuit, la restitution vers l'intérieur de la cellule de la chaleur stockée en journée, se traduisant par une élévation de sa température en période nocturne au-dessus de la température extérieure. Ce phénomène est très intéressant dans le cas du chauffage en saison hivernale.

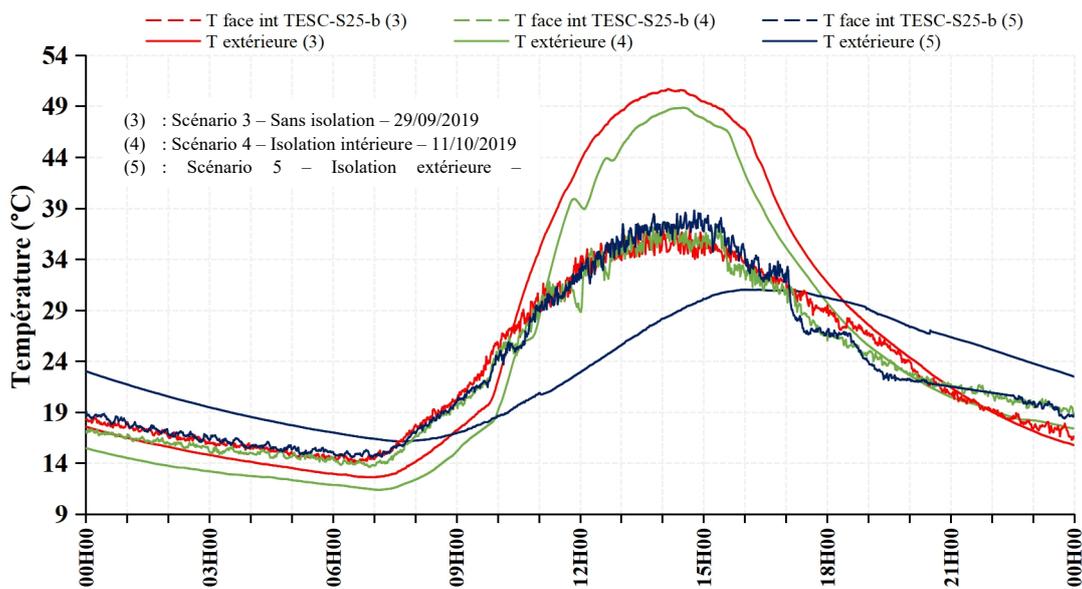


Figure 87. Comparaison des températures de la face intérieure du toit durant trois jours similaires pour les scénarii 3, 4 et 5

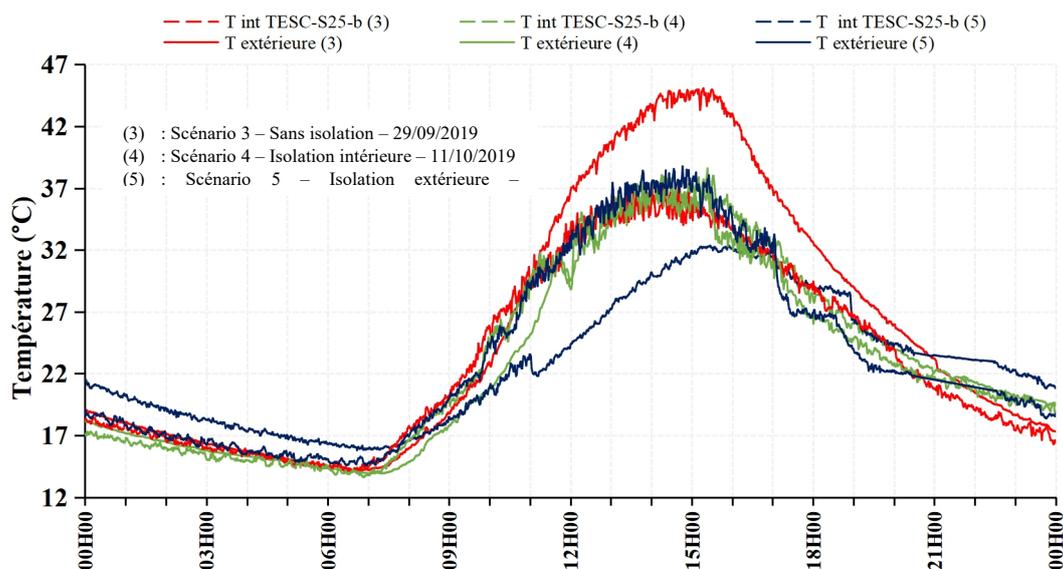


Figure 88. Comparaison des températures intérieures durant trois jours similaires pour les scénarii 3, 4 et 5

5.4 Vérification par essais en conditions contrôlées

La lecture des résultats de la campagne de mesure effectuée sur les deux cellules-test, fait ressortir des conclusions intéressantes. Cependant, des facteurs multiples, notamment météorologiques, rendent ces conclusions quelque peu incomplètes. Donc, pour caractériser davantage le comportement thermique des panneaux de TESC-S25-b et C-R, notamment ses performances en termes de déphasage et d'amortissement thermiques, des expériences sont menées au laboratoire dans des conditions contrôlées. L'objectif est d'observer comment réagissent les plaques de TESC-S25b et C-R face à l'influence du seul facteur de la température en soumettant l'une de leurs faces à un flux de chaleur contrôlé et unidirectionnel. L'autre face reste librement exposée aux conditions thermo-hygro-métriques du laboratoire, caractérisées par une température ambiante et un taux d'humidité constants. Le montage expérimental, illustré par la [Figure 89](#), comporte deux plaques d'échangeurs sur lesquelles sont posés les deux échantillons carrés de TESC-S25-b et C-R, de 20 cm de côté et de 3 cm d'épaisseur. Les échangeurs sont alimentés en permanence en eau chaude, provenant de deux bains thermostatés à circulation. Les contours des deux échantillons sont soigneusement isolés par des plaques de polystyrène suffisamment épaisses, les faces supérieures (notées face 2) étant laissées libres.

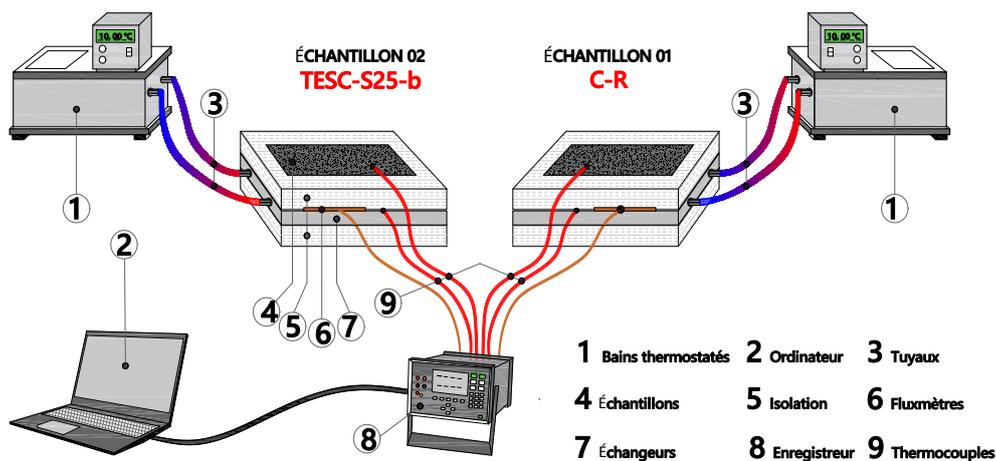


Figure 89. Schéma du montage expérimental prévu pour l'évaluation du déphasage et de l'amortissement thermiques du TESC-S25-b en conditions contrôlées

Avant toute expérience, nous avons procédé à une vérification sur la concordance des mesures de température effectuées sur les deux échangeurs. Nous les avons alimentés avec l'eau des bains en imposant deux cycles de réchauffement-refroidissement de 40 mn chacun de 10°C à 50°C. Les températures et les flux à la surface des échangeurs sont mesurés. Les valeurs sont très voisines pour les deux paramètres, ce qui permet de conclure positivement sur la fiabilité du montage (voir [Figure 90](#)).

Les échantillons étant placés sur les échangeurs, une expérience de trois cycles de 100 mn chacun est menée avec des températures variant de 10 °C à 50°C. Des thermocouples mesurent les températures au milieu et sur la surface des échantillons, côté échangeur,

tandis qu'un fluxmètre placé sur la face supérieure (face 2) des échantillons mesure les flux de chaleur qui les traversent. Ces huit capteurs sont raccordés à une centrale d'acquisition de données connectée à un micro-ordinateur.

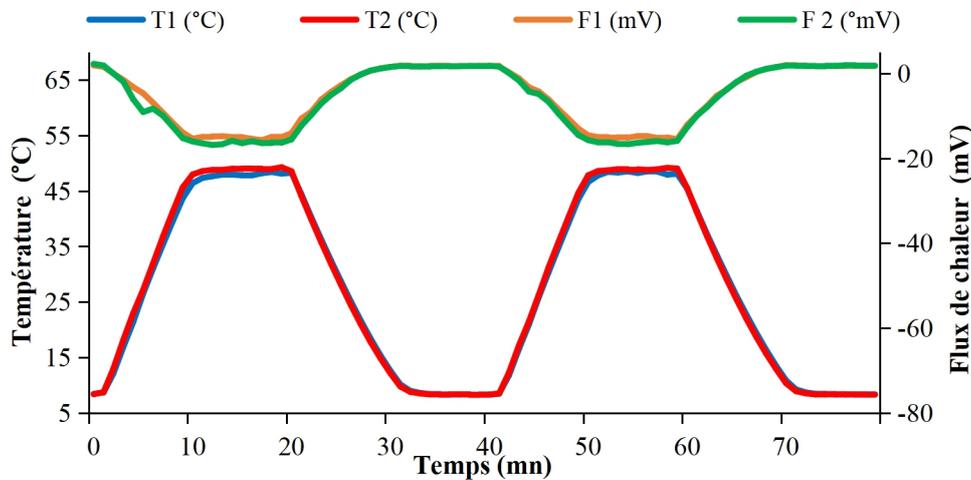


Figure 90. Vérification de la concordance des températures et des flux de chaleurs émis par les deux échangeurs

Pour ne pas surcharger le graphique et pour une plus grande lisibilité, seuls les flux de chaleur et températures de surface sont représentés dans la [Figure 91](#). Nous constatons à travers cette figure que tous les résultats de ces expériences, menées en laboratoire sur les deux plaques soumises à des conditions contrôlées, confirment entièrement et confortent les conclusions tirées à partir des performances des cellules-test placées dans les conditions climatiques extérieures. L'écart des températures maximales des faces (2) est en faveur de la plaque TESC-S25-b ($T \text{ face (2) max C-R Cell} \geq T \text{ face (2) max TESC-S25-b Cell}$). Aussi, la courbe de T face (2) de TESC-S25-b est plus aplatie que celle de la T face (2) de C-R. Ainsi elle montre que la température à l'interface de l'échangeur avec l'échantillon (T face 1) est plus élevée pour le TESC-S25-b atteignant un maximum de 48.3 °C contre 43.89 °C pour le C-R, avec des températures dans cet échantillon qui évoluent plus rapidement aussi bien dans la phase de montée en température qu'au refroidissement. Lors du refroidissement, nous constatons des températures plus basses sur le TESC-S25-b avec un minimum de 8.81 °C contre 10.38 °C sur le C-R. Cela tient de sa plus faible capacité calorifique $p.C_p$ en comparaison avec celle de l'échantillon de C-R, (TESC-S25-b : 2173 kJ/kgK < C-R : 2485 kJ/kgK).

Les flux thermiques sont plus importants pour la plaque C-R en phase de réchauffement dus à un écart de température plus large que pour la TESC-S25-b à la surface de contact échangeur-échantillon ; à l'inverse, et pour les mêmes raisons d'écarts de température plutôt favorables au TESC dans cette phase, les flux dans cet échantillon l'emportent.

Soumis aux mêmes conditions (température et durée de cycle...), les deux échantillons TESC-S25-b et C-R présentent des valeurs de déphasage et d'amortissement thermiques différentes. Le déphasage moyen enregistré est de 9 minutes pour le cas du TESC-S25-b et 6 minutes pour le C-R. En plus de la faible valeur de la conductivité du TESC-S25-b, ce

déphasage est à mettre en relation avec le changement de phase du MCP contenu dans le TESC-S25-b, un effet qui retarde l'évolution de la température dans ce milieu.

Un résultat intéressant à relever est l'écart de température moyen observé entre les deux faces des échantillons. Égal à environ 15 °C, il est deux fois plus important dans le TESC-S25-b que dans celui du C-R avec 7 °C. L'amortissement du signal thermique extérieur, caractéristique de la propriété isolante des matériaux constitutifs des panneaux, est donc plus performant pour le TESC-S25-b, résultat conforme avec les mesures de conductivité thermique effectuées, 0.72 W/m.K contre 1.26 W/m.K pour le C-R.

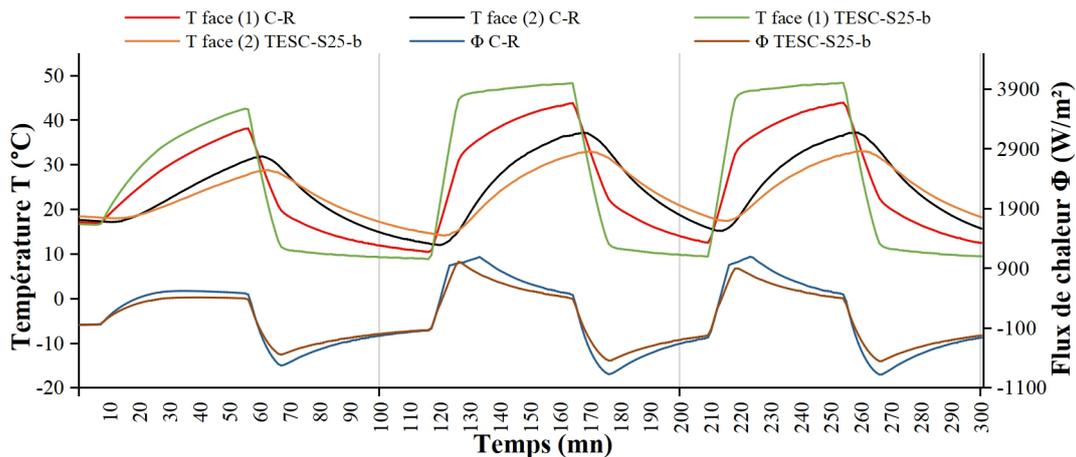


Figure 91. Essais thermiques sur les TESC-S25-b et C-R en conditions contrôlées ; variation des températures et des flux thermiques

5.5 Conclusions

Ce dernier chapitre a été une vérification à l'échelle du laboratoire des propriétés thermiques du TESC-S25-b et de l'impact de l'ajout de MCP dans les panneaux sur le confort thermique intérieur. Deux cellules réduites d'environ 1 m³, composée de quatre panneaux en TESC-S25-b pour la première et de quatre panneaux en béton ordinaire pour la cellule témoin ont été conçues et fait l'objet de mesures en situation réelle, des températures intérieures et de parois, ainsi que des flux de chaleur traversant les panneaux muraux.

Cinq scénarii ont été testés, et ont permis de faire une étude comparative de l'ambiance thermique à l'intérieur des deux cellules : sans isolation dans les deux premiers scénarii, fenêtres fermées puis ouvertes, un troisième scénario où les fenêtres sont fermées le jour et ouvertes la nuit et enfin deux derniers scénarii, avec isolation intérieure puis extérieure par des plaques de polystyrène, les fenêtres étant ouvertes la nuit et fermées le jour. En complément de ces campagnes en extérieur, des mesures en laboratoire sont effectuées sur des plaques de C-R et de TESC-S25-b pour évaluer le déphasage thermique et l'amortissement du signal thermique pour ces plaques.

L'efficacité énergétique de la cellule isolée de l'extérieur est apparue nettement ; cette configuration est celle qui réalise les meilleures conditions de confort thermique. Lorsque leurs panneaux muraux sont dépourvus d'isolation, il n'y a pratiquement pas de différence

notable du comportement des deux cellules, l'intérieur étant le siège d'une importante surchauffe. Lorsque l'isolant est appliqué de l'intérieur, un amortissement thermique plus important est constaté dans la TESC-S25-b-Cell.

Par ailleurs, les points suivants ont été relevés à la suite de ces expériences :

- L'importance de la ventilation nocturne en période estivale pour favoriser la réalisation du cycle de fusion/solidification. En effet la fermeture des fenêtres la nuit empêche les parois de refroidir en dessous du point de fusion du MCP. En demeurant à l'état liquide, le MCP ne peut contribuer au confort thermique le lendemain et reste sans aucun effet ;
- La ventilation totale ou nulle ne sont pas à recommander ;
- L'importance du choix du MCP en fonction de sa plage de fusion/solidification en concordance avec l'amplitude thermique de la période ciblée ;
- Le cas avec l'isolation extérieure est le plus performant et serait plus intéressant encore en hiver ;
- L'inertie thermique supplémentaire apportée par l'ajout des MCP permet de réaliser de meilleures performances thermiques qu'un béton ordinaire, en plus de l'avantage d'être un matériau composite plus léger et moins coûteux ;
- Il est utile de rappeler que le TESC présente la meilleure efficacité lorsque l'amplitude thermique (entre le jour et la nuit). Des situations que l'on rencontre fréquemment en période estivale en Algérie. Cela contribuerait à atténuer ces grands écarts sans recourir à une climatisation mécanique excessive.

6

**CONCLUSION GÉNÉRALE ET
PERSPECTIVES**

6 Conclusion générale et perspectives

6.1 Conclusion générale

Souvent, pour assurer le confort thermique dans les habitations, il est fait appel aux moyens mécaniques d'appoint, très pratiques d'utilisation, mais en négligence de nombreux paramètres tels que la consommation énergétique, le respect de l'environnement, l'esthétique ainsi que l'aspect économique. Les dispositifs « architecturaux » notamment ceux qui peuvent être intégrés à l'enveloppe du bâtiment ne le sont pas de manière systématique pour des raisons de surcoût à l'investissement et également parce que ces dispositions ne sont pas encore rendues obligatoires.

Ces travaux de thèse ont été entamés par une étude bibliographique orientée sur les techniques et modes d'insertion des MCP dans les enveloppes des bâtiments en particulier les murs en béton. Cette étape a permis d'explorer les caractéristiques thermiques et chimiques des principaux MCP et LWA généralement utilisés dans le bâtiment avec leurs avantages et inconvénients, ainsi que les méthodes d'encapsulation existantes. Suite aux résultats de nos premières investigations et mesures, notre choix s'est porté sur la Graisse végétale (Huile de coprah) comme MCP, en raison d'un bon ratio entre sa chaleur latente et son coût et également pour sa large disponibilité. Trois types de LWA Gel de silice, sépiolite et bentonite, sont testés comme matrice au MCP.

Des travaux expérimentaux sont réalisés à trois niveaux. Une échelle microscopique pour l'étude des caractéristiques thermiques, de la stabilité chimique, de la structure et la morphologie microscopiques du MCP, des LWA et cLWA à l'aide des méthodes de DSC, FTIR, MEB, etc. Le second niveau, mésoscopique, est consacré à l'évaluation des taux d'imprégnation des matrices par les MCP, des propriétés mécaniques des échantillons de béton à différents dosages en cLWA et enfin des performances thermiques et mécaniques du TESC-S25-b en utilisant la méthode des plaques chaudes gardées.

Enfin, le troisième et dernier niveau, macroscopique, est une étude comparative des performances thermiques de deux cellules-test soumises aux aléas du climat (climat de type méditerranéen), conçues avec des panneaux muraux à base du TESC-S25-b pour l'une et en béton brut pour l'autre.

Bien que le recours aux matériaux à changement de phase dans les bétons n'ait pas encore définitivement fait ses preuves et qu'il ne soit pas généralisé dans les constructions actuelles, il demeure une voie très prometteuse à explorer. Cette étude s'inscrit dans ce cadre précisément et se veut une contribution dans le domaine de la recherche des matériaux à changement de phase à l'échelle du bâtiment. Nous avons démontré à travers nos mesures en laboratoire et en extérieur que les MCP s'intègrent durablement au béton des parois murales, et que leur ajout permet d'améliorer les performances thermiques de l'habitat avec des parois de moindre épaisseur, donc une réduction substantielle du poids de ces parois. Lorsque le MCP - de l'huile de coprah qui est une graisse végétale-, absorbé dans une

matrice de sépiolite, est ajouté au béton, il donne un matériau de construction plus léger d'environ 10% en plus d'être moins coûteux, et surtout plus performant du point de vue énergétique donc au final plus respectueux de l'environnement. En effet, la masse volumique du béton ordinaire mesurée (C-R) est de 2195 kg/m³ contre 1898 kg/m³ pour le TESC-S25-b soit une différence de 297 kg/m³. Les mesures effectuées pour déterminer les propriétés thermiques des deux matériaux sont à l'avantage du TESC-S25-b avec une capacité de stockage à légèrement supérieure et une conductivité thermique plus faible (meilleure isolation).

Cet ensemble de résultats, consignés dans nos travaux et obtenus à chacun des niveaux de cette étude, se veut comme un apport de plus aux bases de données portant sur les caractéristiques physiques, chimiques, thermiques et mécaniques des cLWA et bétons incorporant des MCP. Il est intéressant en particulier parce que le MCP ajouté au béton est une graisse végétale, un cas assez peu étudié jusque-là.

6.2 Perspectives

Cette étude pourrait être poursuivie en apportant des améliorations aux résultats et en renforçant la démarche générale adoptée. Il serait donc intéressant de :

- Tester une plus grande variété de MCP biosourcés afin de chercher le produit qui possède la meilleure chaleur latente de fusion ;
- Développer une technique d'imprégnation permettant de réduire la taille des LWA afin d'augmenter la quantité de MCP sans nuire à la résistance mécanique des mélanges avec le béton ;
- Améliorer la formulation du béton (C-R) par ajustement des dosages de ses composants et ajout éventuel d'adjuvants ;
- Envisager une solution technique à grande échelle, pour doter les cLWA d'un revêtement protecteur empêchant tout relargage de MCP ;
- Tester d'autres configurations pour les panneaux muraux des cellules-test : avec isolant intégré, diverses épaisseurs, formes et surfaces, etc. ;
- Appliquer le matériau TESC-S25-b à des constructions de taille réelle ;
- Étendre les essais au moyen des plaques chaudes gardées à d'autres échantillons ;
- Chercher les moyens d'améliorer la conductivité thermique du MCP ;
- Explorer les propriétés des MCP par d'autres types de caractérisation microscopique (TG, Granulométrie laser, BET, etc.) ;
- Étendre l'étude du cyclage thermique des échantillons sur une période plus longue et évaluer son impact à la fois sur leurs propriétés mécaniques et leur comportement thermique ;
- Réaliser des simulations numériques pour étendre les investigations à un plus grand nombre de scénarii ;
- Réaliser une analyse économique comparative détaillée ;

7 Références

- [1] S. E. Ango, « Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment: développement d'un système actif à matériaux à changement de phase », p. 180.
- [2] J. Yan et X. Yang, « Thermal energy storage », *Appl. Energy*, vol. 240, p. A1-A6, avr. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.001.
- [3] S. Drissi, « Développement de nouveaux bétons ' "accumulateurs d'énergie" ' : investigations expérimentale, probabiliste et numérique du comportement thermique », p. 235.
- [4] F. Kuznik, D. David, K. Johannes, et J.-J. Roux, « A review on phase change materials integrated in building walls », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n° 1, p. 379-391, janv. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.08.019.
- [5] D. Zhou, C. Y. Zhao, et Y. Tian, « Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications », *Appl. Energy*, vol. 92, p. 593-605, avr. 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.08.025.
- [6] S. A. Memon, « Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, p. 870-906, mars 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.12.042.
- [7] J. Lizana, R. Chacartegui, A. Barrios-Padura, et J. M. Valverde, « Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: A critical review », *Appl. Energy*, vol. 203, p. 219-239, oct. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.008.
- [8] V. V. Tyagi et D. Buddhi, « PCM thermal storage in buildings: A state of art », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, n° 6, p. 1146-1166, août 2007, doi: 10.1016/j.rser.2005.10.002.
- [9] A. Pasupathy, R. Velraj, et R. V. Seeniraj, « Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, n° 1, p. 39-64, janv. 2008, doi: 10.1016/j.rser.2006.05.010.
- [10] N. Soares, J. J. Costa, A. R. Gaspar, et P. Santos, « Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency », *Energy Build.*, vol. 59, p. 82-103, avr. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.12.042.
- [11] V. V. Rao, R. Parameshwaran, et V. V. Ram, « PCM-mortar based construction materials for energy efficient buildings: A review on research trends », *Energy Build.*, vol. 158, p. 95-122, janv. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.09.098.
- [12] U. Berardi et A. A. Gallardo, « Properties of concretes enhanced with phase change materials for building applications », *Energy Build.*, vol. 199, p. 402-414, sept. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.07.014.
- [13] A. M. Borreguero, M. Luz Sánchez, J. L. Valverde, M. Carmona, et J. F. Rodríguez, « Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content », *Appl. Energy*, vol. 88, n° 3, p. 930-937, mars 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.08.014.
- [14] H. Zhang *et al.*, « Preparation and thermal performance of gypsum boards incorporated with microencapsulated phase change materials for thermal regulation », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 102, p. 93-102, juill. 2012, doi: 10.1016/j.solmat.2012.03.020.
- [15] C. Barreneche *et al.*, « Comparison of three different devices available in Spain to test thermal properties of building materials including phase change materials », *Appl. Energy*, vol. 109, p. 421-427, sept. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.02.061.
- [16] R. Shadnia, L. Zhang, et P. Li, « Experimental study of geopolymers mortar with incorporated PCM », *Constr. Build. Mater.*, vol. 84, p. 95-102, juin 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.066.
- [17] G. Diarce *et al.*, « Ventilated active façades with PCM », *Appl. Energy*, vol. 109, p. 530-537, sept. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.01.032.
- [18] F. Guarino, A. Athienitis, M. Cellura, et D. Bastien, « PCM thermal storage design in buildings: Experimental studies and applications to solarium in cold climates », *Appl. Energy*, vol. 185, p. 95-106, janv. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.046.
- [19] R. Vicente et T. Silva, « Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental approach », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 67, n° 1-2, p. 24-34, juin 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.069.
- [20] H. Cui, W. Tang, Q. Qin, F. Xing, W. Liao, et H. Wen, « Development of structural-functional integrated energy storage concrete with innovative macro-encapsulated PCM by hollow steel ball », *Appl. Energy*, vol. 185, p. 107-118, janv. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.072.
- [21] L. F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, et O. Zubillaga, « Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings », *Energy Build.*, vol. 39, n° 2, p. 113-119, févr. 2007, doi: 10.1016/j.enbuild.2006.03.030.

- [22] M. Hunger, A. G. Entrop, I. Mandilaras, H. J. H. Brouwers, et M. Founti, « The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials », *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, n° 10, p. 731-743, nov. 2009, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.08.002.
- [23] P. Meshgin, Y. Xi, et Y. Li, « Utilization of phase change materials and rubber particles to improve thermal and mechanical properties of mortar », *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, n° 1, p. 713-721, mars 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.039.
- [24] A. R. Sakulich et D. P. Bentz, « Incorporation of phase change materials in cementitious systems via fine lightweight aggregate », *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, p. 483-490, oct. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.042.
- [25] C. Barreneche, M. E. Navarro, A. I. Fernández, et L. F. Cabeza, « Improvement of the thermal inertia of building materials incorporating PCM. Evaluation in the macroscale », *Appl. Energy*, vol. 109, p. 428-432, sept. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.12.055.
- [26] R. Cheng, M. Pomianowski, X. Wang, P. Heiselberg, et Y. Zhang, « A new method to determine thermophysical properties of PCM-concrete brick », *Appl. Energy*, vol. 112, p. 988-998, déc. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.01.046.
- [27] B. Xu et Z. Li, « Paraffin/diatomite composite phase change material incorporated cement-based composite for thermal energy storage », *Appl. Energy*, vol. 105, p. 229-237, mai 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.01.005.
- [28] Z. Zhang, G. Shi, S. Wang, X. Fang, et X. Liu, « Thermal energy storage cement mortar containing n-octadecane/expanded graphite composite phase change material », *Renew. Energy*, vol. 50, p. 670-675, févr. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.08.024.
- [29] A. Eddahhak-Ouni, S. Drissi, J. Colin, J. Neji, et S. Care, « Experimental and multi-scale analysis of the thermal properties of Portland cement concretes embedded with microencapsulated Phase Change Materials (PCMs) », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 64, n° 1-2, p. 32-39, mars 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.11.050.
- [30] A. Joulin, L. Zalewski, S. Lassue, et H. Naji, « Experimental investigation of thermal characteristics of a mortar with or without a micro-encapsulated phase change material », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 66, n° 1-2, p. 171-180, mai 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.01.027.
- [31] E. Franquet, S. Gibout, P. Tittlein, L. Zalewski, et J.-P. Dumas, « Experimental and theoretical analysis of a cement mortar containing microencapsulated PCM », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 73, n° 1, p. 32-40, déc. 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.06.053.
- [32] Y. He, X. Zhang, et Y. Zhang, « Preparation technology of phase change perlite and performance research of phase change and temperature control mortar », *Energy Build.*, vol. 85, p. 506-514, déc. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.09.023.
- [33] M. Kheradmand, M. Azenha, J. L. B. de Aguiar, et K. J. Krakowiak, « Thermal behavior of cement based plastering mortar containing hybrid microencapsulated phase change materials », *Energy Build.*, vol. 84, p. 526-536, déc. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.08.010.
- [34] M. Pomianowski, P. Heiselberg, R. L. Jensen, R. Cheng, et Y. Zhang, « A new experimental method to determine specific heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated microencapsulated-PCM », *Cem. Concr. Res.*, vol. 55, p. 22-34, janv. 2014, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.09.012.
- [35] J. Vieira, L. Senff, H. Gonçalves, L. Silva, V. M. Ferreira, et J. A. Labrincha, « Functionalization of mortars for controlling the indoor ambient of buildings », *Energy Build.*, vol. 70, p. 224-236, févr. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.064.
- [36] S. Cunha, J. Aguiar, et F. Pacheco-Torgal, « Effect of temperature on mortars with incorporation of phase change materials », *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, p. 89-101, nov. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.077.
- [37] T. Lecompte, P. Le Bideau, P. Glouannec, D. Nortershauser, et S. Le Masson, « Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material », *Energy Build.*, vol. 94, p. 52-60, mai 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.02.044.
- [38] S. A. Memon, H. Z. Cui, H. Zhang, et F. Xing, « Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete », *Appl. Energy*, vol. 139, p. 43-55, févr. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.11.022.
- [39] A. Figueiredo, J. Lapa, R. Vicente, et C. Cardoso, « Mechanical and thermal characterization of concrete with incorporation of microencapsulated PCM for applications in thermally activated slabs », *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, p. 639-647, juin 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.225.

- [40] L. Haurie, S. Serrano, M. Bosch, A. I. Fernandez, et L. F. Cabeza, « Single layer mortars with microencapsulated PCM: Study of physical and thermal properties, and fire behaviour », *Energy Build.*, vol. 111, p. 393-400, janv. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.11.028.
- [41] D. Snoeck, B. Priem, P. Dubruel, et N. De Belie, « Encapsulated Phase-Change Materials as additives in cementitious materials to promote thermal comfort in concrete constructions », *Mater. Struct.*, vol. 49, n° 1-2, p. 225-239, janv. 2016, doi: 10.1617/s11527-014-0490-5.
- [42] H. Zhang *et al.*, « A novel phase-change cement composite for thermal energy storage: Fabrication, thermal and mechanical properties », *Appl. Energy*, vol. 170, p. 130-139, mai 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.02.091.
- [43] T. Li, Y. Yuan, et N. Zhang, « Thermal properties of phase change cement board with capric acid/expanded perlite form-stable phase change material », *Adv. Mech. Eng.*, vol. 9, n° 6, p. 168781401770170, juin 2017, doi: 10.1177/1687814017701706.
- [44] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, et A. I. Fernández, « Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n° 3, p. 1675-1695, avr. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.018.
- [45] S. E. Ango, « Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment: développement d'un système actif à matériaux à changement de phase », p. 180.
- [46] « Julien Borderon ».
- [47] J. P. A. Lopez, « Méthodologie de conception des matériaux architecturés pour le stockage latent dans le domaine du bâtiment », p. 165.
- [48] « Zhang, 2017.pdf ».
- [49] N. Stathopoulos, « Numerical and experimental optimization of peak power reduction control strategies », p. 251.
- [50] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, et D. Buddhi, « Review on thermal energy storage with phase change materials and applications », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n° 2, p. 318-345, févr. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [51] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, et H. Mehling, « Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, n° 3, p. 251-283, févr. 2003, doi: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8.
- [52] A. Abhat, « Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials », *Sol. Energy*, vol. 30, n° 4, p. 313-332, 1983, doi: 10.1016/0038-092X(83)90186-X.
- [53] P. Lv, C. Liu, et Z. Rao, « Review on clay mineral-based form-stable phase change materials: Preparation, characterization and applications », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, p. 707-726, févr. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.10.014.
- [54] P. K. S. Rathore et S. K. Shukla, « Potential of macroencapsulated PCM for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review », *Constr. Build. Mater.*, vol. 225, p. 723-744, nov. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.221.
- [55] S. Guichard, « Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changement de Phase: Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale », p. 245.
- [56] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée, et D. Quenard, « Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material », *Energy Build.*, vol. 38, n° 6, p. 673-681, juin 2006, doi: 10.1016/j.enbuild.2005.11.002.
- [57] A. D'Alessandro, A. L. Pisello, C. Fabiani, F. Ubertini, L. F. Cabeza, et F. Cotana, « Multifunctional smart concretes with novel phase change materials: Mechanical and thermo-energy investigation », *Appl. Energy*, vol. 212, p. 1448-1461, févr. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.01.014.
- [58] R. Vicente et T. Silva, « Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental approach », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 67, n° 1-2, p. 24-34, juin 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.069.
- [59] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, et L. F. Cabeza, « Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling », *Energy Build.*, vol. 42, n° 4, p. 534-540, avr. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.10.022.
- [60] E. Y. Tuncel et B. Y. Pekmezci, « A sustainable cold bonded lightweight PCM aggregate production: Its effects on concrete properties », *Constr. Build. Mater.*, vol. 181, p. 199-216, août 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.269.
- [61] L. Navarro, A. de Gracia, A. Castell, et L. F. Cabeza, « Experimental study of an active slab with PCM coupled to a solar air collector for heating purposes », *Energy Build.*, vol. 128, p. 12-21, sept. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.069.

- [62] L. F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, et O. Zubillaga, « Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings », *Energy Build.*, vol. 39, n° 2, p. 113-119, févr. 2007, doi: 10.1016/j.enbuild.2006.03.030.
- [63] M. Hunger, A. G. Entrop, I. Mandilaras, H. J. H. Brouwers, et M. Founti, « The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials », *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, n° 10, p. 731-743, nov. 2009, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.08.002.
- [64] C. Barreneche, M. E. Navarro, A. I. Fernández, et L. F. Cabeza, « Improvement of the thermal inertia of building materials incorporating PCM. Evaluation in the macroscale », *Appl. Energy*, vol. 109, p. 428-432, sept. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.12.055.
- [65] B. Han, K. Zhang, et X. Yu, « Enhance the Thermal Storage of Cement-Based Composites With Phase Change Materials and Carbon Nanotubes », *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 135, n° 2, p. 024505, janv. 2013, doi: 10.1115/1.4023181.
- [66] A. Eddhahak-Ouni, S. Drissi, J. Colin, J. Neji, et S. Care, « Experimental and multi-scale analysis of the thermal properties of Portland cement concretes embedded with microencapsulated Phase Change Materials (PCMs) », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 64, n° 1-2, p. 32-39, mars 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.11.050.
- [67] M. Pomianowski, P. Heiselberg, R. L. Jensen, R. Cheng, et Y. Zhang, « A new experimental method to determine specific heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated microencapsulated-PCM », *Cem. Concr. Res.*, vol. 55, p. 22-34, janv. 2014, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.09.012.
- [68] J. Vieira, L. Senff, H. Gonçalves, L. Silva, V. M. Ferreira, et J. A. Labrincha, « Functionalization of mortars for controlling the indoor ambient of buildings », *Energy Build.*, vol. 70, p. 224-236, févr. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.064.
- [69] L. Haurie, S. Serrano, M. Bosch, A. I. Fernandez, et L. F. Cabeza, « Single layer mortars with microencapsulated PCM: Study of physical and thermal properties, and fire behaviour », *Energy Build.*, vol. 111, p. 393-400, janv. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.11.028.
- [70] P. B. Salunkhe et P. S. Shembekar, « A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, n° 8, p. 5603-5616, oct. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.05.037.
- [71] T. Silva, R. Vicente, N. Soares, et V. Ferreira, « Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution », *Energy Build.*, vol. 49, p. 235-245, juin 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.02.010.
- [72] E. Meng, H. Yu, et B. Zhou, « Study of the thermal behavior of the composite phase change material (PCM) room in summer and winter », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 126, p. 212-225, nov. 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.110.
- [73] Z. Dong, H. Cui, W. Tang, D. Chen, et H. Wen, « Development of Hollow Steel Ball Macro-Encapsulated PCM for Thermal Energy Storage Concrete », *Materials*, vol. 9, n° 1, p. 59, janv. 2016, doi: 10.3390/ma9010059.
- [74] S. A. Memon, H. Z. Cui, H. Zhang, et F. Xing, « Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete », *Appl. Energy*, vol. 139, p. 43-55, févr. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.11.022.
- [75] A. Sarı et A. Biçer, « Thermal energy storage properties and thermal reliability of some fatty acid esters/building material composites as novel form-stable PCMs », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 101, p. 114-122, juin 2012, doi: 10.1016/j.solmat.2012.02.026.
- [76] A. Sarı, « Preparation and thermal energy storage properties of building material-based composites as novel form-stable PCMs », *Energy Build.*, p. 11, 2012.
- [77] J. H. Deng, W. B. Li, et D. H. Jiang, « Study on Binary Fatty Acids/ Sepiolite Composite Phase Change Material », *Adv. Mater. Res.*, vol. 374-377, p. 807-810, oct. 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.374-377.807.
- [78] C. Li, L. Fu, J. Ouyang, et H. Yang, « Enhanced performance and interfacial investigation of mineral-based composite phase change materials for thermal energy storage », *Sci. Rep.*, vol. 3, n° 1, p. 1908, déc. 2013, doi: 10.1038/srep01908.
- [79] D. Sun et L. Wang, « Utilization of paraffin/expanded perlite materials to improve mechanical and thermal properties of cement mortar », *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, p. 791-796, déc. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.123.

- [80] D. Shin et D. Banerjee, « Enhanced thermal properties of SiO₂ nanocomposite for solar thermal energy storage applications », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 84, p. 898-902, mai 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.100.
- [81] S. Song, L. Dong, S. Chen, H. Xie, et C. Xiong, « Stearic–capric acid eutectic/activated-attapulgiate composite as form-stable phase change material for thermal energy storage », *Energy Convers. Manag.*, vol. 81, p. 306-311, mai 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.02.045.
- [82] A. Sarı, A. Bicer, F. A. Al-Sulaiman, A. Karaipekli, et V. V. Tyagi, « Diatomite/CNTs/PEG composite PCMs with shape-stabilized and improved thermal conductivity: Preparation and thermal energy storage properties », *Energy Build.*, vol. 164, p. 166-175, avr. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.01.009.
- [83] S.-G. Jeong, J. Jeon, J.-H. Lee, et S. Kim, « Optimal preparation of PCM/diatomite composites for enhancing thermal properties », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 62, p. 711-717, juill. 2013, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.043.
- [84] K. Acurio, A. Chico-Proano, J. Martínez-Gómez, C. F. Ávila, Á. Ávila, et M. Orozco, « Thermal performance enhancement of organic phase change materials using spent diatomite from the palm oil bleaching process as support », *Constr. Build. Mater.*, vol. 192, p. 633-642, déc. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.148.
- [85] S. Benayache, S. Alleg, A. Mebrek, et J. J. Suñol, « Thermal and microstructural properties of paraffin/diatomite composite », *Vacuum*, vol. 157, p. 136-144, nov. 2018, doi: 10.1016/j.vacuum.2018.08.044.
- [86] D. Guo *et al.*, « Diatomite precoat filtration for wastewater treatment: Filtration performance and pollution mechanisms », *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 137, p. 403-411, sept. 2018, doi: 10.1016/j.cherd.2018.06.036.
- [87] S. Cunha, J. B. Aguiar, V. Ferreira, et A. Tadeu, « Influence of Adding Encapsulated Phase Change Materials in Aerial Lime Based Mortars », *Adv. Mater. Res.*, vol. 687, p. 255-261, avr. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.687.255.
- [88] J. A. C. Costa, A. E. Martinelli, R. M. do Nascimento, et A. M. Mendes, « Microstructural design and thermal characterization of composite diatomite-vermiculite paraffin-based form-stable PCM for cementitious mortars », *Constr. Build. Mater.*, vol. 232, p. 117167, janv. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117167.
- [89] B. Xu et Z. Li, « Paraffin/diatomite composite phase change material incorporated cement-based composite for thermal energy storage », *Appl. Energy*, vol. 105, p. 229-237, mai 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.01.005.
- [90] S. Xu, J. Wang, Q. Ma, X. Zhao, et T. Zhang, « Study on the lightweight hydraulic mortars designed by the use of diatomite as partial replacement of natural hydraulic lime and masonry waste as aggregate », *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, p. 33-40, déc. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.062.
- [91] B. Xu et Z. Li, « Paraffin/diatomite/multi-wall carbon nanotubes composite phase change material tailor-made for thermal energy storage cement-based composites », *Energy*, vol. 72, p. 371-380, août 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.05.049.
- [92] B. Xu, H. Ma, Z. Lu, et Z. Li, « Paraffin/expanded vermiculite composite phase change material as aggregate for developing lightweight thermal energy storage cement-based composites », *Appl. Energy*, vol. 160, p. 358-367, déc. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.09.069.
- [93] Z. Lu, B. Xu, J. Zhang, Y. Zhu, G. Sun, et Z. Li, « Preparation and characterization of expanded perlite/paraffin composite as form-stable phase change material », *Sol. Energy*, vol. 108, p. 460-466, oct. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.08.008.
- [94] T. Li, Y. Yuan, et N. Zhang, « Thermal properties of phase change cement board with capric acid/expanded perlite form-stable phase change material », *Adv. Mech. Eng.*, vol. 9, n° 6, p. 168781401770170, juin 2017, doi: 10.1177/1687814017701706.
- [95] Y. He, X. Zhang, et Y. Zhang, « Preparation technology of phase change perlite and performance research of phase change and temperature control mortar », *Energy Build.*, vol. 85, p. 506-514, déc. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.09.023.
- [96] M. Li, Z. Wu, et J. Tan, « Heat storage properties of the cement mortar incorporated with composite phase change material », *Appl. Energy*, vol. 103, p. 393-399, mars 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.09.057.
- [97] M. Li, Z. Wu, H. Kao, et J. Tan, « Experimental investigation of preparation and thermal performances of paraffin/bentonite composite phase change material », *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, n° 11, p. 3275-3281, oct. 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2011.05.015.

- [98] C. Chen, X. Liu, W. Liu, et M. Ma, « A comparative study of myristic acid/bentonite and myristic acid/Eudragit L100 form stable phase change materials for thermal energy storage », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 127, p. 14-20, août 2014, doi: 10.1016/j.solmat.2014.03.057.
- [99] A. Sari, « Thermal energy storage characteristics of bentonite-based composite PCMs with enhanced thermal conductivity as novel thermal storage building materials », *Energy Convers. Manag.*, vol. 117, p. 132-141, juin 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.078.
- [100] X. Huang, G. Alva, L. Liu, et G. Fang, « Preparation, characterization and thermal properties of fatty acid eutectics/bentonite/expanded graphite composites as novel form-stable thermal energy storage materials », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 166, p. 157-166, juill. 2017, doi: 10.1016/j.solmat.2017.03.026.
- [101] Q. Shen, J. Ouyang, Y. Zhang, et H. Yang, « Lauric acid/modified sepiolite composite as a form-stable phase change material for thermal energy storage », *Appl. Clay Sci.*, vol. 146, p. 14-22, sept. 2017, doi: 10.1016/j.clay.2017.05.035.
- [102] A. Sari, R. K. Sharma, G. Hekimoğlu, et V. V. Tyagi, « Preparation, characterization, thermal energy storage properties and temperature control performance of form-stabilized sepiolite based composite phase change materials », *Energy Build.*, vol. 188-189, p. 111-119, avr. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.02.008.
- [103] X. Zhou, Q. Yu, S. Zhang, C. Zhang, et J. Feng, « Porous silica matrices infiltrated with PCM for thermal protection purposes », *Ceram. Int.*, vol. 39, n° 5, p. 5247-5253, juill. 2013, doi: 10.1016/j.ceramint.2012.12.025.
- [104] Y. Zhang, S. Zheng, S. Zhu, J. Ma, Z. Sun, et M. Farid, « Evaluation of paraffin infiltrated in various porous silica matrices as shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage », *Energy Convers. Manag.*, vol. 171, p. 361-370, sept. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.06.002.
- [105] H. Cui, S. A. Memon, et R. Liu, « Development, mechanical properties and numerical simulation of macro encapsulated thermal energy storage concrete », *Energy Build.*, vol. 96, p. 162-174, juin 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.03.014.
- [106] G. Kastiukas, X. Zhou, et J. Castro-Gomes, « Development and optimisation of phase change material-impregnated lightweight aggregates for geopolymer composites made from aluminosilicate rich mud and milled glass powder », *Constr. Build. Mater.*, vol. 110, p. 201-210, mai 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.029.
- [107] R. Wang, M. Ren, X. Gao, et L. Qin, « Preparation and properties of fatty acids based thermal energy storage aggregate concrete », *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, p. 1-10, mars 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.034.
- [108] R. Velraj, R. V. Seeniraj, B. Hafner, C. Faber, et K. Schwarzer, « HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A LATENT HEAT STORAGE SYSTEM1Paper presented at the ISES Solar World Congress, Taejon, South Korea, 24–29 August 1997.1 », *Sol. Energy*, vol. 65, n° 3, p. 171-180, févr. 1999, doi: 10.1016/S0038-092X(98)00128-5.
- [109] A. Soupart-Caron, « Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase », p. 291.
- [110] E. Mohseni, W. Tang, et S. Wang, « Development of thermal energy storage lightweight structural cementitious composites by means of macro-encapsulated PCM », *Constr. Build. Mater.*, vol. 225, p. 182-195, nov. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.136.
- [111] Q. Ma et M. Bai, « Mechanical behavior, energy-storing properties and thermal reliability of phase-changing energy-storing concrete », *Constr. Build. Mater.*, vol. 176, p. 43-49, juill. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.226.
- [112] C. Mankel, A. Caggiano, et E. Koenders, « Thermal energy storage characterization of cementitious composites made with recycled brick aggregates containing PCM », *Energy Build.*, vol. 202, p. 109395, nov. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109395.
- [113] A. Mourid, M. El Alami, et F. Kuznik, « Experimental investigation on thermal behavior and reduction of energy consumption in a real scale building by using phase change materials on its envelope », *Sustain. Cities Soc.*, vol. 41, p. 35-43, août 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.04.031.
- [114] A. Pasupathy, L. Athanasius, R. Velraj, et R. V. Seeniraj, « Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 28, n° 5-6, p. 556-565, avr. 2008, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.04.016.
- [115] H. J. Alqallaf et E. M. Alawadhi, « Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain », *Energy Build.*, vol. 61, p. 73-80, juin 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.01.041.

- [116] M. Koschenz et B. Lehmann, « Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings », *Energy Build.*, vol. 36, n° 6, p. 567-578, juin 2004, doi: 10.1016/j.enbuild.2004.01.029.
- [117] J. Mazo, M. Delgado, J. M. Marin, et B. Zalba, « Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump », *Energy Build.*, vol. 47, p. 458-466, avr. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.12.022.
- [118] P. Arce, C. Castellón, A. Castell, et L. F. Cabeza, « Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings », *Energy Build.*, vol. 44, p. 88-93, janv. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.10.028.
- [119] M. Bahrar, Z. I. Djamai, M. EL Mankibi, A. Si Larbi, et M. Salvia, « Numerical and experimental study on the use of microencapsulated phase change materials (PCMs) in textile reinforced concrete panels for energy storage », *Sustain. Cities Soc.*, vol. 41, p. 455-468, août 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.06.014.
- [120] L. F. Cabeza *et al.*, « Behaviour of a concrete wall containing micro-encapsulated PCM after a decade of its construction », *Sol. Energy*, déc. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.12.003.
- [121] A. Bontemps, M. Ahmad, K. Johannès, et H. Sallée, « Experimental and modelling study of twin cells with latent heat storage walls », *Energy Build.*, vol. 43, n° 9, p. 2456-2461, sept. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.05.030.
- [122] K. Cellat *et al.*, « 2 years of monitoring results from passive solar energy storage in test cabins with phase change materials », *Sol. Energy*, vol. 200, p. 29-36, avr. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2019.01.045.
- [123] F. Kuznik, J. Virgone, et J.-J. Roux, « Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation », *Energy Build.*, vol. 40, n° 2, p. 148-156, janv. 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.01.022.
- [124] K. Menoufi, A. Castell, M. M. Farid, D. Boer, et L. F. Cabeza, « Life Cycle Assessment of experimental cubicles including PCM manufactured from natural resources (esters): A theoretical study », *Renew. Energy*, vol. 51, p. 398-403, mars 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.10.010.
- [125] T. A. Vik, H. B. Madessa, P. Aslaksrud, E. Folkedal, et O. S. Øvrevik, « Thermal Performance of an Office Cubicle Integrated with a Bio-based PCM: Experimental Analyses », *Energy Procedia*, vol. 111, p. 609-618, mars 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.223.
- [126] S. Grynning, F. Goia, E. Rognvik, et B. Time, « Possibilities for characterization of a PCM window system using large scale measurements », *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 2, n° 1, p. 56-64, juin 2013, doi: 10.1016/j.ijsbe.2013.09.003.
- [127] K. Zhong, S. Li, G. Sun, S. Li, et X. Zhang, « Simulation study on dynamic heat transfer performance of PCM-filled glass window with different thermophysical parameters of phase change material », *Energy Build.*, vol. 106, p. 87-95, nov. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.05.014.
- [128] K. A. R. Ismail et J. R. Henríquez, « Thermally effective windows with moving phase change material curtains », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 21, n° 18, p. 1909-1923, déc. 2001, doi: 10.1016/S1359-4311(01)00058-8.
- [129] U. Berardi et S. Soudian, « Experimental investigation of latent heat thermal energy storage using PCMs with different melting temperatures for building retrofit », *Energy Build.*, vol. 185, p. 180-195, févr. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.12.016.
- [130] G. Dreux et J. Festa, *Nouveau guide du béton et de ses constituants*. Paris: Eyrolles, 1998.
- [131] N. Essid, A. Loulizi, et J. Neji, « Compressive strength and hygric properties of concretes incorporating microencapsulated phase change material », *Constr. Build. Mater.*, vol. 222, p. 254-262, oct. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.156.
- [132] M. Belouadah, Z. E. Abidine Rahmouni, et N. Tebbal, « Experimental characterization of ordinary concretes obtained by adding construction waste (glass, marble) », *Procedia Comput. Sci.*, vol. 158, p. 153-162, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.09.038.
- [133] L. Berredjem, N. Arabi, et L. Molez, « Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete », *Constr. Build. Mater.*, vol. 246, p. 118421, juin 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118421.
- [134] O. Elalaoui, E. Ghorbel, V. Mignot, et M. Ben Ouezdou, « Mechanical and physical properties of epoxy polymer concrete after exposure to temperatures up to 250°C », *Constr. Build. Mater.*, vol. 27, n° 1, p. 415-424, févr. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.027.
- [135] T. Y. Lo et H. Z. Cui, « Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete », *Mater. Lett.*, vol. 58, n° 6, p. 916-919, févr. 2004, doi: 10.1016/j.matlet.2003.07.036.

- [136] Z. Zhang, G. Shi, S. Wang, X. Fang, et X. Liu, « Thermal energy storage cement mortar containing n-octadecane/expanded graphite composite phase change material », *Renew. Energy*, vol. 50, p. 670-675, févr. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.08.024.
- [137] H. Cui, S. A. Memon, et R. Liu, « Development, mechanical properties and numerical simulation of macro encapsulated thermal energy storage concrete », *Energy Build.*, vol. 96, p. 162-174, juin 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.03.014.
- [138] A. L. Pisello *et al.*, « Multifunctional Analysis of Innovative PCM-filled Concretes », *Energy Procedia*, vol. 111, p. 81-90, mars 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.010.
- [139] D. Niall, O. Kinnane, R. P. West, et S. McCormack, « Mechanical and thermal evaluation of different types of PCM–concrete composite panels », *J. Struct. Integr. Maint.*, vol. 2, n° 2, p. 100-108, avr. 2017, doi: 10.1080/24705314.2017.1318039.
- [140] P. Sukontasukkul *et al.*, « Thermal properties of lightweight concrete incorporating high contents of phase change materials », *Constr. Build. Mater.*, vol. 207, p. 431-439, mai 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.152.
- [141] « <http://ireef:8080/reef4/actions/documents/print.jsp?code4x=AGD> », p. 26.
- [142] « DTR BE 2.3 Panneaux Prefabrique.pdf ».
- [143] « DTR BE 2.1Règles d'exécutions des travaux de constructions d'ouvrages en béton armé.pdf ».
- [144] « EN NF 206-1.pdf ».
- [145] « NF EN 13369.pdf ».
- [146] « DTR BC 2.41 -- C.B.A 93 - Regles de conception et de calcul des structures en béton armé.pdf ».
- [147] « DTR -B.C-2.45 -- Regles de conception et de calcul des maçonneries.pdf ».
- [148] C. Chen, X. Liu, W. Liu, et M. Ma, « A comparative study of myristic acid/bentonite and myristic acid/Eudragit L100 form stable phase change materials for thermal energy storage », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 127, p. 14-20, août 2014, doi: 10.1016/j.solmat.2014.03.057.
- [149] A. Sar&&, C. Alkan, A. Biçer, et C. Bilgin, « Latent heat energy storage characteristics of building composites of bentonite clay and pumice sand with different organic PCMs: LHTES characteristics of BCPCMS », *Int. J. Energy Res.*, vol. 38, n° 11, p. 1478-1491, sept. 2014, doi: 10.1002/er.3185.
- [150] Y. Lin, C. Zhu, et G. Fang, « Synthesis and properties of microencapsulated stearic acid/silica composites with graphene oxide for improving thermal conductivity as novel solar thermal storage materials », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 189, p. 197-205, janv. 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2018.10.005.
- [151] O. Chung, S.-G. Jeong, S. Yu, et S. Kim, « Thermal performance of organic PCMs/micronized silica composite for latent heat thermal energy storage », *Energy Build.*, vol. 70, p. 180-185, févr. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.055.
- [152] Y. Konuklu et O. Ersoy, « Preparation and characterization of sepiolite-based phase change material nanocomposites for thermal energy storage », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 107, p. 575-582, août 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.07.012.
- [153] M. Li, Z. Wu, H. Kao, et J. Tan, « Experimental Investigation of Preparation and Thermal Performances of Paraffin/Bentonite Composite Phase Change Material », *Energy Convers. Manag. - ENERG CONV MANAGE*, vol. 52, p. 3275-3281, oct. 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2011.05.015.
- [154] V. D. Cao *et al.*, « Microencapsulated phase change materials for enhancing the thermal performance of Portland cement concrete and geopolymers concrete for passive building applications », *Energy Convers. Manag.*, vol. 133, p. 56-66, févr. 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2016.11.061.
- [155] P. Tittlein *et al.*, « Simulation of the thermal and energy behaviour of a composite material containing encapsulated-PCM: Influence of the thermodynamical modelling », *Appl. Energy*, vol. 140, p. 269-274, févr. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.11.055.
- [156] « Ahmad, 2006 (a).pdf ».
- [157] E. Meng, H. Yu, et B. Zhou, « Study of the thermal behavior of the composite phase change material (PCM) room in summer and winter », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 126, p. 212-225, nov. 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.110.
- [158] F. Jousellin, X. Faure, K. Johannes, et P. Pierson, « Enveloppe hybride pour bâtiment économe », p. 8.
- [159] J. Čurpek et M. Čekon, « Climate response of a BiPV façade system enhanced with latent PCM-based thermal energy storage », *Renew. Energy*, vol. 152, p. 368-384, juin 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.070.
- [160] W. He *et al.*, « Experimental study on the performance of a novel RC-PCM-wall », *Energy Build.*, vol. 199, p. 297-310, sept. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.07.001.

- [161] A. L. Pisello, V. L. Castaldo, C. Piselli, C. Fabiani, et F. Cotana, « Thermal performance of coupled cool roof and cool façade: Experimental monitoring and analytical optimization procedure », *Energy Build.*, vol. 157, p. 35-52, déc. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.054.
- [162] C. Barreneche, L. Navarro, A. de Gracia, A. I. Fernández, et L. F. Cabeza, « In situ thermal and acoustic performance and environmental impact of the introduction of a shape-stabilized PCM layer for building applications », *Renew. Energy*, vol. 85, p. 281-286, janv. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.06.054.
- [163] « Guichard, 2013.pdf ».

8 Liste des figures

Figure 1. Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau.....	18
Figure 2. La relation de la température et de l'énergie thermique.....	19
Figure 3. Principe schématique du changement de phase des matériaux.....	20
Figure 4. Classification des matériaux à changement de phase [50].....	21
Figure 5. Classes de matériaux pouvant être utilisés comme MCP en fonction de leur plage de température et d'enthalpie de fusion.....	21
Figure 6. Image montrant des microcapsules de MCP.....	26
Figure 7. Différentes géométries de macroencapsulation de MCP : sphérique, tubulaire, cylindrique et rectangulaire.....	26
Figure 8. (a) Remplissage de la macrocapsule en MCP ; (b) Échantillon de mur.....	27
Figure 9. Configuration des échantillon de murs ; Briques munies de microcapsules de MCP.....	27
Figure 10. Aspect intérieur des deux cellules.....	28
Figure 11. (a) Macrocapsules métalliques scellées ; (b) section d'une macrocapsule	28
Figure 12. Vue intérieure de la maison du présent	33
Figure 13. Plaque du Smartboard.....	34
Figure 14. Panneau Energain®	34
Figure 15. Panneaux Energain® appliqués sur un mur.....	35
Figure 16. Vue sur la Living LabNcube.....	37
Figure 17. Déperditions totales, apports totaux et besoin de chauffage de la Ncube.....	38
Figure 18. Consommations de chauffage, d'ECS et domestique et production photovoltaïque.....	38
Figure 19. La Eco house intégrant le Knauf Comfortboard.....	40
Figure 20. Vue sur la maison du présent.....	41
Figure 22. Augmentation de la conductivité thermique ; Morphologie de MCP biosourcé ; MCP biosourcé amélioré thermiquement....	47
Figure 23. Paraffine–LWA revêtus d'un mélange d'époxy et de poudre de graphite ; Paraffine–LWA revêtus d'un mélange d'époxy et de poudre de graphite de fumée de silice ; Image MEB du matériaux composite.....	48
Figure 24. Agrégat expansé léger utilisé ; Image MEB de la zone de transition interrassiale du matériau composite.....	48
Figure 25. Montage expérimental pour l'imprégnation directe sous pression atmosphérique.....	57
Figure 26. Montage expérimental pour l'imprégnation sous vide.....	57
Figure 27. Microscope électronique à balayage (MEB) à l'IPREM de Pau.....	59
Figure 28. Micrographies des matrices (GS), (S), (B) et des CLWA (GS + VF 23-26), (S + VF 23-26), (B + VF 23-26).....	60
Figure 29. Spectre FTIR du CLWA-SG.....	62
Figure 30. Spectre FTIR du CLWA-S.....	62
Figure 31. Spectre FTIR de CLWA-B.....	62
Figure 32. Appareil FTIR (Perkin Elmer) et presse à échantillons.....	63
Figure 33. Appareil DSC (Perkin Elmer), cellules en aluminium et balance de précision 10 ⁻⁹ g	63
Figure 34. Courbes DSC de la GV 23-26.....	64
Figure 35. Courbes DSC de la GV 23-26-GS.....	64
Figure 36. Courbes DSC de la GV 23-26-S.....	65
Figure 37. Courbes DSC de la GV 23-26-B.....	65
Figure 38. Taux d'imprégnation directe en fonction du temps et de la température.....	67
Figure 39. Taux d'imprégnation sous vide en fonction du temps et du diamètre des grains.....	68
Figure 40. Essais en compression sur échantillons cubiques.....	78
Figure 41 : Échantillons témoins (C-R) pour les essais de compression et de flexion.....	78
Figure 42. Essais en compression sur échantillon cubique.....	78
Figure 43. Essais en flexion sur échantillon parallélépipédique.....	78
Figure 44. Essais en flexion sur échantillons cubiques.....	78
Figure 45. Échantillons TESC pour des essais de flexion et de compression (de gauche à droite).....	79
Figure 46. Composition des différents échantillons cubiques, a : C-R (béton témoin sans ajout de CLWA), b : Incorporation de CLWA par substitution de granulats, c : Incorporation CLWA par substitution de sable, d : Ajout ordinaire CLWA sans substitution	80
Figure 47. Mise en œuvre des bétons composites TESC-B.....	82
Figure 48. Mise en œuvre des bétons composites TESC-SG.....	82
Figure 49. Mise en œuvre des bétons composites TESC-S.....	82

Figure 50 : TESC-SG50 à faible homogénéité.....	83
Figure 51. Résistance à la compression et à la flexion des TESC.....	87
Figure 52. Observations au MEB des interfaces CLWA-Béton.....	88
Figure 53. Essais de vieillissement à la compression des TESC-S25-b après traitements thermique.....	89
Figure 54. Échantillons du TESC-S25-b exposés aux conditions climatiques naturelles et placés en enceinte climatique....	90
Figure 55. Montage expérimental des plaques chaudes gardées réalisé.....	91
Figure 56. Échantillon testé.....	91
Figure 58. Évolution des flux thermique et des températures du TESC-S25-b dans la plage de température 30–35 °C.....	93
Figure 59. Flux thermique total et évolution des températures du TESC-S25-b dans la plage de température 10–35 °C.....	94
Figure 60. Évolution des flux thermique et des températures du TESC-S25-b dans la plage de température 10-15 °C.....	94
Figure 61. Flux thermique total et évolution des températures du C-S25-dans la plage de température 10–35 °C.....	95
Figure 62. Flux thermique total et évolution des températures du C-R-dans la plage de température 30–35 °C	95
Figure 63. Évolution des flux thermique et des températures - détermination de la conductivité thermique solide du TESC-S25-b.....	97
Figure 64. Évolution des flux thermique et des températures - détermination de la conductivité thermique liquide du TESC-S25-b.....	97
Figure 65. Évolution des flux thermique et des températures - détermination de la conductivité thermique du C-R (30-35 °C).....	98
Figure 66. Évolution des flux thermique et des températures - détermination de la conductivité thermique du C-S25-b (25-35 °C).....	98
Figure 67. Comparaison des capacités thermiques Figure 68. Comparaison des conductivités thermiques.....	99
Figure 69. Performance du MCP en fonction des périodes de l'année et du climat.....	103
Figure 70. Étapes de la conception et de la construction des cellules.....	105
Figure 71. Plaques de béton équipées de thermocouples et fluxmètres.....	106
Figure 72. Schéma du dispositif expérimental des cellules-test.....	107
Figure 73. Composition des parois des cellules-test dans les 5 scénarii.....	108
Figure 74. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules et valeur de la surchauffe dans le scénario 1.....	109
Figure 75. Variation des températures intérieures et extérieure des cellules-test et flux thermique traversant les parois supérieures (Sc1).....	110
Figure 76. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules dans le scénario 2.....	111
Figure 77. Variation des températures intérieures et extérieure des cellules-test et flux thermique traversant les parois supérieures (Sc2).....	111
Figure 78. Apparence extérieure des deux cellules-test dans les scénarios 1, 2 et 3.....	112
Figure 79. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules dans le scénario 3.....	114
Figure 80. Variation des températures intérieures et extérieure des cellules-test et flux thermique traversant les parois supérieures (Sc3).....	114
Figure 81. Apparence intérieure des cellules-test dans le scénario 4.....	115
Figure 82. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules dans le scénario 4.....	116
Figure 83. Variation des températures intérieures et extérieure des cellules-test et flux thermique traversant les parois supérieures (Sc4).....	117
Figure 84. Apparence extérieure des cellules-test dans le scénario 5.....	117
Figure 85. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules dans le scénario 5.....	119
Figure 86. Variation des températures intérieures et extérieure des cellules-test et flux thermique traversant les parois supérieures (Sc5).....	119
Figure 87. Écart de température intérieure maximale entre les deux cellules ($T_{int\ max\ CR-Cell} \geq T_{int\ max\ TESC-S25-b\ Cell}$ dans les cinq scénarii).....	120
Figure 88. Comparaison des températures de la face intérieure du toit durant trois jours similaires pour les scénarii 3, 4 et 5.....	121
Figure 89. Comparaison des températures intérieures durant trois jours similaires pour les scénarii 3, 4 et 5.	121
Figure 90. Schéma du montage expérimental prévu pour l'évaluation du déphasage et de l'amortissement thermiques du TESC-S25-b en conditions contrôlées.....	122
Figure 91. Vérification de la concordance des températures et des flux de chaleurs émis par les deux échangeurs.....	123
Figure 92. Essais thermiques sur les TESC-S25-b et C-R en conditions contrôlées ; variation des températures et des flux thermiques.	124
Figure 93. Dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône)....	145
Figure 94. Courbes granulométriques.....	147

9 Nomenclature

Caractères latins

A	affaissement au cône d'Abrams, cm
C	capacité calorifique spécifique, $\text{JK}^{-1} \text{kg}^{-1}$
C	dosage en ciment, kg m^{-3}
D	diamètre, m
D	déphasage, h
E	dosage en eau, kg m^{-3}
e	épaisseur, m
H	hauteur, m
K	terme correcteur, –
G	coefficient granulaire, –
L	longueur, m
L	chaleur latente, J kg^{-1}
m	masse, kg
Q	chaleur, J
R	résistance, MPa
T	température, K ou °C
t	temps, s ou min
V	volume, m^3 ou L
Y	fraction massique, –

Caractères grecs

α	taux d'imprégnation, %m
ρ	masse volumique, kg/m^3
λ	conductivité thermique, W/mK
σ	classe du ciment, –
γ	coefficient de compacité, –
ϕ	flux de chaleur, J.s^{-1} ou W
ϕ	densité de flux de chaleur, W.m^{-2}

Exposants et indices

'	résistance moyenne visée
28	28 jours d'âge
f	fusion
f	finesse (module de finesse)
ini	initial
fin	final
max	maximum

min	minimum
v	volume
c	ciment
g	gravier
ms	masse solide
s	solide
l	liquide
t	total
0	valeur initiale

Acronymes et abréviations

MCP	matériaux à changement de phase
TESC	thermal energy storage concrete
cLWA	composite thermal energy storage concrete (thermal energy storage aggregate)
LWA	lightweight aggregate
S	sepiolite
GS	gel de silice
B	bentonite
DSC	differential scanning calorimetry
FTIR	Fourier transform infra-red
MEB	microscope électronique à balayage
GV (ou VF)	graisse végétale (ou vegetable fat)
ATG	analyse thermogravimétrique
Attach	attachement
Mic	microscopique
Mac	macroscopique
C-R	concrete-reference (béton-référence)
C	concrete (béton)
Moy	moyenne
A	amortissement
SC	surchauffe

10 Liste des tableaux

Tableau 1. Nomenclature des expériences réalisées et les matériaux/types d'échantillons utilisés.....	14
Tableau 2. Avantages et inconvénients des MCP paraffinés.....	22
Tableau 3. Avantages et inconvénients des MCP non paraffinés (Acides gras et Alcools de sucre).....	22
Tableau 4. Avantages et inconvénients des MCP inorganiques (Sels, hydrates de sels et métaux).....	23
Tableau 5. Avantages et inconvénients des MCP eutectiques.....	24
Tableau 6. Critères de choix d'un MCP selon ses propriétés.....	25
Tableau 7. Travaux de recherche intégrant des produits MCP dans les murs suivant différentes méthodes.....	30
Tableau 8. Caractéristiques thermiques du SmarBoard de la BASF.....	33
Tableau 9. Données techniques du Panneau à inertie thermique DuPont™ Energain®	35
Tableau 10. Comparaison de produits commerciaux selon les données des fabricants	36
Tableau 11. Quelques MCP eutectiques et leurs caractéristiques.....	44
Tableau 12. Caractéristiques des LWA.....	55
Tableau 13. Propriétés des MCP.....	55
Tableau 14. Propriétés des agrégats.....	56
Tableau 15. Récapitulatif des caractérisations effectuées sur les échantillons.....	72
Tableau 16. Résistance caractéristique minimale du béton en compression à 28 jours selon le dosage en ciment et la forme de l'échantillon selon le DTU 21 (NF P18-201).....	73
Tableau 17. Résistance caractéristique du béton en fonction du dosage de ciment et de la catégorie de l'ouvrage selon le DTR BE 2.1.....	74
Tableau 18. Résistance caractéristique du béton en fonction du dosage en ciment en cas de justification spéciale.....	74
Tableau 19: Formulation volumique et en massique du béton témoin.....	76
Tableau 20 : Préparation des échantillons témoins pour les essais de compression.....	76
Tableau 21 : Préparation des échantillons témoins pour les essais de flexion.....	76
Tableau 22 : Résistance à la compression des échantillons témoins sans MCP (R-C).....	77
Tableau 23 : Résistance à la flexion des échantillons témoins sans MCP (R-C).....	77
Tableau 24 : Désignation des acronymes en fonction du dosage en MCP-composite.....	80
Tableau 25. Préparation des échantillons pour les essais de compression – Incorporation par ajout à un béton.....	81
Tableau 26. Préparation des échantillons pour les essais de flexion – Incorporation par ajout à un béton.....	81
Tableau 27. Préparation des échantillons pour les essais de compression – Incorporation par substitution de sable.....	84
Tableau 28. Préparation des échantillons pour les essais de flexion – Incorporation par substitution de sable..	84
Tableau 29. Préparation des échantillons pour les essais de compression – Incorporation par substitution de granulats..	85
Tableau 30. Préparation des échantillons pour les essais de flexion – Incorporation par substitution de granulats.....	85
Tableau 31. Synthèse des essais mécaniques des TESC.....	87
Tableau 32. Résumé des propriétés thermiques des échantillons testés (TESC-S25-b, C-S25-b et C-R).....	98
Tableau 33. Coefficient de réduction de dimension réalité/cellule-test.....	104
Tableau 34. Caractéristiques thermo physiques des composants des cellules-test.....	108
Tableau 34. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules et valeur de la surchauffe dans le scénario 1.....	109
Tableau 35. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules dans le scénario 2.....	110
Tableau 36. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules et valeur de la surchauffe dans le scénario 3.....	113
Tableau 37. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules et valeur de la surchauffe dans le scénario 4.....	116
Tableau 38. Température à l'extérieur et à l'intérieur des cellules et valeur de la surchauffe dans le scénario 5.....	119
Tableau 40. Consistance souhaitée du béton.....	143
Tableau 41 : Valeur approximative du coefficient granulaire G	144
Tableau 42. Valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats, et permettant de calculer Y ordonnée du point de brisure de la courbe de référence	149
Tableau 43. Valeurs du coefficient de compacité.....	150
Tableau 44: Proportions de chaque constituant pour le béton vibré.....	150

11 Annexe

11.1 Méthode de Dreux-Gorisse

11.1.1 Données de base

11.1.1.1 Nature de l'ouvrage

La connaissance de la nature de l'ouvrage est nécessaire : ouvrage massif ou au contraire élancé et de faible épaisseur, faiblement ou très ferrailé. Il sera nécessaire de connaître l'épaisseur minimale des éléments et les dispositions des armatures dans les zones les plus ferrillées : distance minimale entre elles et couverture par rapport au coffrage... [130]. Dans notre cas, il s'agira de préfabriquer des panneaux muraux légers, de faible épaisseur et faiblement ferrillés.

11.1.1.2 Résistance souhaitée

R_{28} étant la résistance en compression à 28 jours demandée en général et compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique s , la résistance moyenne R'_{28} à 28 jours qu'il faudrait viser devrait être supérieure à R_{28} car : $R_{28} \approx R'_{28} - 0.8 s$

Si l'on admet un coefficient de variation moyen de l'ordre de 20 %, la règle approximative pour la résistance moyenne à viser est :

$$R'_{28} \approx R_{28} + 15 \%$$

Dans le cas où la classe de béton est C20/25, la résistance moyenne visée pour le béton témoin à 28 jours est $R'_{28} = 1.15 \times 25 \approx 28.75$ MPa. [130]

11.1.1.3 Consistance souhaitée

Elle est fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massif ou plus ou moins ferrailé), de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc. Elle peut se définir en général par la plasticité désirée, mesurée par l'affaissement au cône comme indiqué dans le [Tableau 40](#). [130]

Tableau 40. Consistance souhaitée du béton

Plasticité	Serrage	A Affaissement en cm	N nombre de chocs test C.E.S
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	> 60
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	30 à 50
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	15 à 25
Béton mou	Piquage	10 à 13	10 à 15
Béton fluide	Léger piquage	≥ 14	< 10

11.1.1.4 Dosage en ciment et en eau

Le rapport des masses de ciment et d'eau C/E est déterminé à partir de la formule suivante [130] :

$$R'_{28} = G \sigma'_c (C/E - 0.5) \quad (1)$$

D'où :

$$C/E = \frac{R'_{28}}{G \times \sigma'_c} + 0.5 \quad (2)$$

Avec

- R'_{28} : résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa ;
- σ'_c : classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa ;
- C : dosage en ciment (en kg/m³) ;
- E : dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour 1 m³) ;
- G : coefficient granulaire ([Tableau 41](#)).

La valeur approximative du coefficient granulaire G qui intervient dans cette formule dépend de la qualité des granulés (propreté, origine...) et de la taille des grains.

Tableau 41 : Valeur approximative du coefficient granulaire G [130, p. 240]

Qualité des granulats	Diamètre maximal D des granulats		
	D ≤ 16mm	25mm ≤ D ≤ 40mm	D ≤ 63mm
Excellente	0.55	0.6	0.65
Bonne, courante	0.45	0.5	0.55
Passable	0.35	0.4	0.45

Les granulats utilisés dans nos essais, de diamètre compris dans l'intervalle 3-16mm, ont été soigneusement lavés puis séchés à l'étuve, ce qui permet de les classer dans la catégorie des granulats de bonne qualité, d'où un coefficient granulaire G=0.45.

Le ciment retenu est un *ciment Portland au calcaire NA442 CEM II/B-L 42.5 N* certifié, conforme à la norme algérienne (NA442 – 2013) et européenne (EN 197 – 1). La fiche technique du produit suggère une classe vraie du ciment ≥ 42.5 MPa ce qui signifie que : $\sigma'_c = 42.5$ MPa.

Ainsi le rapport $C/E = \frac{28.75}{0.45 \times 42.5} + 0.5 = 2$

Bien que l'évaluation du rapport C/E et le choix du dosage en ciment C suffisent pour déterminer la valeur E du bon dosage en eau (par simple calcul arithmétique), il faudra cependant tenir compte également de l'ouvrabilité du béton. Ainsi dans l'exemple d'un béton faiblement dosé en ciment, la quantité d'eau prévue par la formulation théorique du mélange est faible et donne un béton beaucoup trop sec donc difficile à mettre en œuvre (ou trop liquide dans le cas d'un dosage élevé). La règle est de modifier la quantité d'eau E pour assurer une ouvrabilité satisfaisante au béton puis d'ajuster le dosage en ciment en fonction de la valeur du rapport C/E. L'abaque de la [figure 92](#) permet d'évaluer

approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée du problème.

11.1.1.5 Calcul du dosage en ciment et en eau pour 1 m³ de béton

Connaissant le rapport C/E et en prenant une valeur de l'affaissement au cône d'Abrams A égale à 8 cm, on en déduit à partir de l'abaque de la [Figure 92](#), les valeurs du dosage massique en ciment C puis la masse d'eau du béton.

Pour $C/E = 2$ et $A = 8$ cm, l'abaque donne la valeur du dosage en ciment $C = 400$ kg et une masse d'eau $E = 200$ kg. S'il est nécessaire, il conviendra d'ajuster ultérieurement le dosage en eau par quelques essais de plasticité et d'ouvrabilité (suivant ce qui est expliqué en [\[130\]](#) p 241-244).

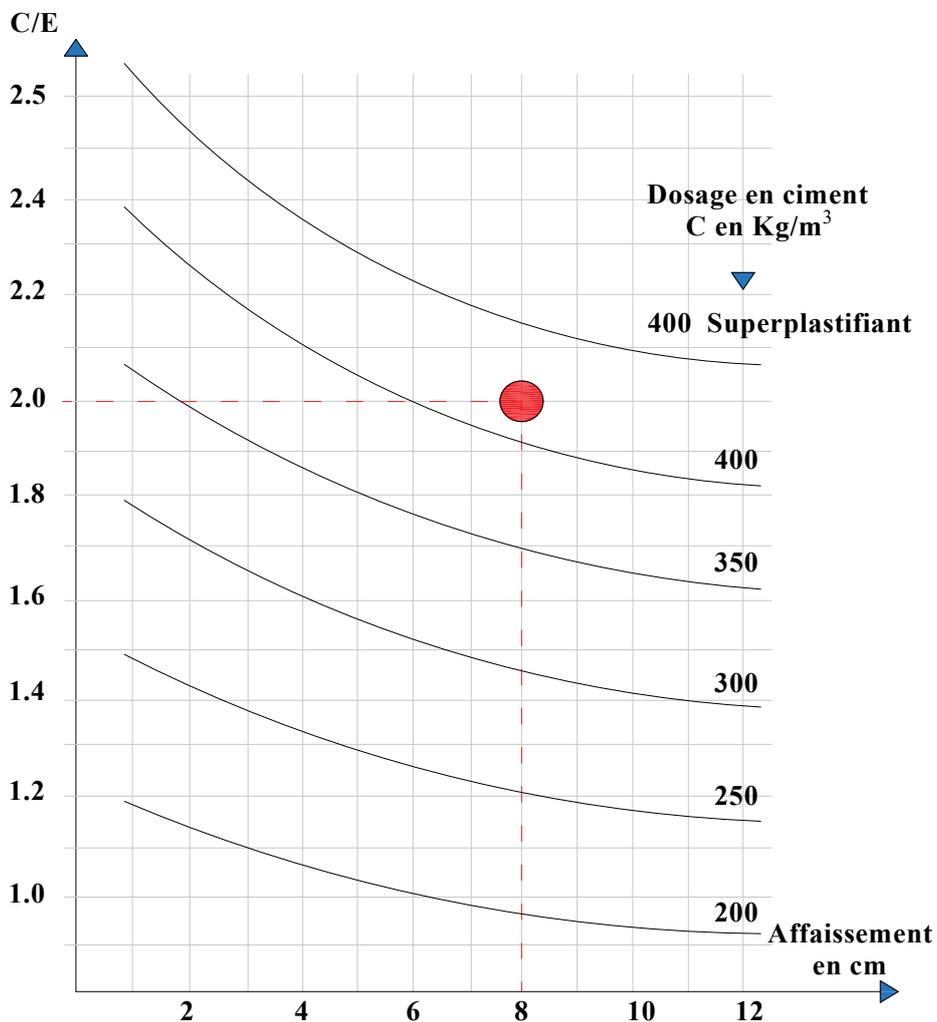


Figure 92: Dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône) [\[130\]](#), p. 241].

11.1.2 Détermination des dosages des différents composants

La détermination des volumes d'agrégats, sable et graviers, à incorporer dans le béton commence par l'opération de tamisage qui permet de les répartir en fonction de la taille des grains : pour le sable elle doit être inférieure à 3 mm, tandis qu'elle est comprise entre 3-8 mm et 8-16 mm pour les deux types de gravier. Par la suite, les courbes des pourcentages granulométriques cumulés des tamisats sont portées sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR.

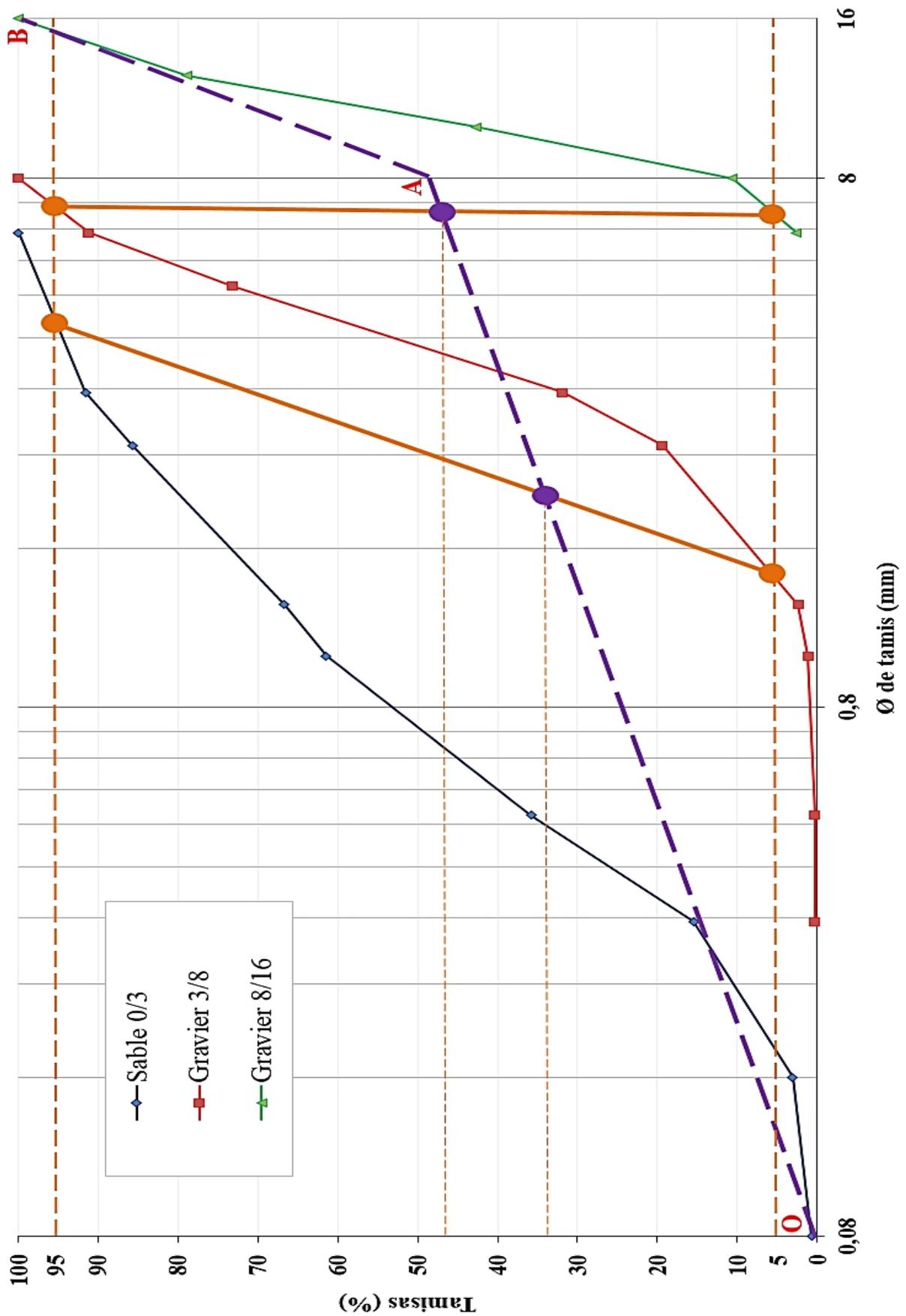


Figure 93. Courbes granulométriques

11.1.2.1 Tracé de la courbe granulaire de référence

La *Figure 93* représente les courbes granulométriques obtenues lors de nos essais. L'étape suivante consiste à tracer la courbe de référence, une ligne brisée constituée de deux segments de droite OA et AB. Le point O de coordonnées (0.08, 0.0) correspondant à l'origine de la courbe granulométrique du sable ; le point B est l'extrémité de la courbe granulométrique du plus gros des graviers tandis que le point de brisure A dont les coordonnées X_A et Y_A sont dépendantes du diamètre maximal D des grains :

$$X_A = \begin{cases} \frac{D}{2} \text{ si } D \leq 20\text{mm} \\ \frac{D+5}{2} \text{ si } D > 20\text{mm} \end{cases} \quad Y_A = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p \quad (3)$$

Avec :

- K (Terme correcteur principal) : coefficient dépendant du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats roulés ou concassés. Dans cette étude, le dosage en ciment vaut 400 kg/m^3 , la vibration est faible et les granulats sont roulés, d'où un coefficient $K=0$ (*Tableau 42*) ;
- K_s (Correction supplémentaire) : si le module de finesse du sable est fort (sable grossier), une correction supplémentaire est nécessaire de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6 M_f - 15$ (M_f étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3). Le module de finesse du sable utilisé vaut 2.93, la valeur de K_s est calculée par la formule suivante [130] p 249 :

$$K_s = 6 M_f - 15 = 2.58 \quad (4)$$

- K_p (Correction supplémentaire) : si la qualité du béton est précisée « pompable », il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité « courante ». On pourra pour cela majorer le terme correcteur K d'un terme $K_p = +5$ à $+10$ environ, selon le degré de plasticité désiré. Dans notre cas, le béton étudié n'est pas de qualité pompable, d'où $K_p = 0$ [130].

Donc : $Y = 50 - \sqrt{16} + 0 + 2.58 + 0 = 48.58\%$

Ainsi, les coordonnées du point de brisure A sont : [8 ; 48.58].

Tableau 42. Valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats, et permettant de calculer Y ordonnée du point de brisure de la courbe de référence ([130]p 249)

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	Forme des granulats (du sable en particulier)						
	400+Superplastifiant	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

11.1.2.2 Tracé des lignes de partage

Nous commençons par le tracé de deux droites parallèles à 5 et 95%. La première ligne de partage est celle qui joint les deux points d'intersection avec les courbes granulométriques du sable à l'ordonnée 95% et du gravier 0.3 à l'ordonnée 5%. La seconde ligne de partage est celle qui joint les points d'intersection des parallèles avec les courbes granulométriques du gravier 0.3 à l'ordonnée 95% (tamisât) et du gravier 8-16 à l'ordonnée 5%. Les 2 points d'intersection C et D des lignes de partage successives avec la courbe de référence permettent de calculer le pourcentage des volumes absolus de chacun des composants du béton comme suit :

- Pourcentage de sable (0/3) : $Y(C) - Y(O) = 33.8 \%$
- Pourcentage de gravier (3/8) : $Y(D) - Y(C) = 12.4 \%$
- Pourcentage de gravier (8/16) : $100 - Y(D) = 53.8 \%$

11.1.2.3 Coefficient de compacité

Il est égal au volume absolu de matières solides, exprimé en litres, par mètre cube de béton, volume de référence :

$$\gamma = \frac{V_{ms}}{1000} \text{ Où } V_{ms} = V_g + V_c$$

D'après le tableau consignait les valeurs de ce coefficient de compacité, (visible en page 250 de [130]), pour un granulats de diamètre maximal 16mm (D=20 mm disponible dans le tableau), la compacité est de 0.820, ce qui donne un volume de matières solides de 820 L.

Tableau 43. Valeurs du coefficient de compacité (Dreux et Festa p250)

Consistance	Serrage	γ coefficient de compacité						
		D = 5	D = 10	D = 12.5	D = 20	D = 31.5	D = 50	D = 80
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	Vibration normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	Piquage	0.730	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	Vibration normale	0.770	0.800	0.815	0.825	0.823	0.835	0.840
	Vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	Vibration faible	0.755	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	Vibration normale	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
	Vibration puissante	0.780	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855

11.1.2.4 Dosage des granulats

En admettant une masse spécifique de 3.1 pour les grains de ciment, valeur moyenne habituellement admise ([130] p 251), le dosage volumique de chacune des matières solides pour 1000 litres de béton sera déterminé à partir des proportions massiques comme suit :

- Volume absolu du ciment $V_c = \frac{M_c}{\rho_c} = \frac{400}{3.1} = 129.03$ L
- Volume absolu de l'ensemble des granulats : $V_g = 1000 \cdot \gamma - V_c = 820 - 129.03 = 691$ L.
- Volume absolu de sable et graviers 3/8 et 8/16

Pour déterminer le volume absolu de sable et celui des graviers 3/8 et 8/16, nous utilisons les proportions volumiques précédemment déterminées de chacun de ces constituants dans le béton :

$$V_s = \frac{V_g \times 33.8}{100} = \frac{691 \times 33.8}{100} = 233.55 \text{ L ;}$$

$$V_{g\ 3/8} = \frac{V_g \times 12.4}{100} = \frac{691 \times 12.4}{100} = 85.68 \text{ L ;}$$

$$V_{g\ 8/16} = \frac{V_g \times 53.8}{100} = \frac{691 \times 53.8}{100} = 371.75 \text{ L.}$$

La masse de ces éléments secs sont déduites à partir de leur masse volumique respective :

- Masse de sable : $M_s = V_s \times \rho_s = 233.55 \text{ L} \times 10^{-3} \times 2667 \text{ kg/m}^3 = 623 \text{ kg}$
- Masse de gravier 3/8 : $M_{g\ 3/8} = V_{g\ 3/8} \times \rho_{g\ 3/8} = 85.68 \text{ L} \times 10^{-3} \times 2667 \text{ kg/m}^3 = 228 \text{ kg}$
- Masse de gravier 8/16 : $M_{g\ 8/16} = V_{g\ 8/16} \times \rho_{g\ 8/16} = 371.75 \text{ L} \times 10^{-3} \times 2667 \text{ kg/m}^3 = 991 \text{ kg}$

Tableau 44: Proportions de chaque constituant pour le béton vibré

	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/16	Eau	Ciment
Volume (L/ m ³ de béton)	233.55	85.68	371.75	200	129.03
masse (kg/m ³ de béton)	623	228	991	200	400

Nb : Les méthodes de formulations de béton actuelles tendent à équilibrer les quantités de graviers et de sable (G/S = 1).

CONTACT

mhand.dehmous@univ-pau.fr