

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

**Mémoire de fin d'études  
de MASTER PROFESSIONNALISANT**

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : Froid, Chauffage et climatisation

**Intitulé :**

**Etude numérique et expérimentale des transferts thermiques dans  
une plaque de béton ensemencée d'un matériau à changement de  
phase**

*Etudié et réalisé par :*  
**GUETTAS SAMIR**

*Promoteur : Pr.LAMROUS Nacer*  
*Co promoteurs : Dr Khedache Souad*

**Année universitaire : 2024/2025**

## **Remerciements**

Je tiens avant tout à exprimer toute ma gratitude à mes parents, ainsi qu'à mes frères Jugurta et Hakim, pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et leur confiance tout au long de mon parcours.

J'adresse mes sincères remerciements à mon promoteur, Monsieur Lamrouse, qui m'a beaucoup appris et guidé avec patience et bienveillance durant la réalisation de ce travail. J'exprime également ma reconnaissance à ma co-promotrice, Madame Khedache, pour ses conseils précieux et son accompagnement constant.

Je n'oublie pas de remercier Monsieur Kecili, qui m'a énormément aidé et soutenu, ainsi que tout le personnel du laboratoire et toutes les personnes qui m'ont assisté dans la réalisation de mes expériences. Je tiens particulièrement à citer le technicien Boualam, qui nous a réparé tant de choses avec une grande disponibilité et efficacité.

Je remercie également tous les professeurs qui m'ont encadré et encouragé durant ma carrière universitaire.

Enfin, je remercie chaleureusement mes camarades de classe, avec qui j'ai partagé de précieux souvenirs et de beaux moments d'étude et de camaraderie.

## **Résumé**

Ce mémoire traite l'étude numérique et expérimentale de l'intégration de matériaux à changement de phase (MCP) dans des blocs de béton en vue d'améliorer leur performance thermique. Le MCP choisi est l'huile de coprah, imprégnée dans un granulats léger poreux (sépiolite) pour former un agrégat composite (CLWA). Plusieurs formulations de bétons composites (TESC) ont été élaborées et comparées à un béton de référence (CR).

Les résultats expérimentaux ont montré que l'ajout de MCP améliore l'inertie thermique du béton, provoque un déphasage des signaux de température et réduit les fluctuations thermiques internes. Les mesures de conductivité thermique, complétées par une simulation numérique avec Fluent, confirment l'efficacité de l'intégration des MCP. Ce travail ouvre des perspectives pour le développement de matériaux de construction innovants, durables et adaptés au climat méditerranéen.

## **Abstract**

This thesis focuses on the numerical and experimental study of phase change material (PCM) integration into concrete blocks to enhance their thermal performance. The selected PCM is copra oil, impregnated into porous lightweight aggregate (sepiolite) to form a composite aggregate (CLWA). Several formulations of composite concretes (TESC) were developed and compared to a reference concrete (CR).

Experimental results showed that the addition of PCM improves the thermal inertia of concrete, induces a phase shift in temperature signals, and reduces internal thermal fluctuations. Thermal conductivity measurements, supported by numerical simulation using Fluent, confirmed the effectiveness of PCM integration. This work highlights the potential of innovative and sustainable construction materials adapted to the Mediterranean climate.

## الملخص

يتناول هذا البحث دراسة عددية وتجريبية لإدماج المواد متغيرة الطور (MCP) في كتل خرسانية بهدف تحسين أدائها الحراري. تم اختيار زيت جوز الهند كمادة متغيرة الطور وتشريبه في الركام الخفيف المسامي (السيبيولايت) لتشكيل ركام مركب. ومقارنتها بالخرسانة المرجعية (TESC) تم إعداد عدة تراكيب من الخرسانة المركبة أظهرت النتائج التجريبية أن إضافة المواد متغيرة الطور يحسن من القصور الذاتي الحراري للخرسانة، ويؤدي إلى إزاحة زمنية في إشارات الحرارة، كما يقلل من التقلبات الحرارية الداخلية. وقد أكدت قياسات التوصيل الحراري، المدعومة بالمحاكاة العددية باستخدام برنامج ، فعالية دمج المواد متغيرة الطور.

يفتح هذا العمل آفاقاً جديدة لتطوير مواد بناء مبتكرة، مستدامة، وملائمة للمناخ المتوسطي.

# Table des matières

Remerciements

Résumé

Abstract

الملخص

Liste des tableaux

Table des figures

Nomenclature

Introduction générale.....	1
Chapitre 1. Etude bibliographique.....	4
1.1 Introduction.....	4
1.2 Notions sur les matériaux à changement de phase.....	4
1.2.1 Rappel des modes de stockage de l'énergie thermique.....	5
1.2.1.1 Chaleur sensible.....	5
1.2.1.2 Chaleur latente.....	6
1.2.2 Phénomène de changement de phase.....	6
1.3 L'efficacité énergétique dans les bâtiments.....	8
1.4 Modes d'intégration des MCP dans les matériaux de construction.....	10
1.4.1 La microencapsulation.....	10
1.4.2 La macroencapsulation.....	11
1.5 L'imprégnation (CLWA = LWA+MCP).....	13
Chapitre 2 : Préparation des composants du TESC et mesure de leur masse volumique.....	14
2.1 Introduction.....	14
2.2 Préparation des matériaux.....	14
2.3 Préparation des matériaux.....	15
2.4 Détermination de la masse volumique.....	15
2.5 Techniques d'imprégnation.....	19
Chapitre 3 ÉLABORATION DES BÉTONS.....	22
3.1 Introduction.....	22
3.2 Formulation du béton ordinaire CR.....	22
3.3 Formulation des bétons composites TESC.....	23
3.4 Elaborations des blocs et des plaques.....	23
3.5 Composition massique des blocs de CR et de TESC.....	25
3.6 Teneur en MCP des blocs TESC.....	25

3.7 Détermination du pourcentage massique de MCP dans les blocs composites	26
3.8 Désignations et acronymes	27
<b>Chapitre 4 Évolution comparative des températures dans les blocs de béton</b>	<b>29</b>
4.1 Introduction	29
4.2 Préparation du banc d'essai	29
4.3 Installation des thermocouples	30
4.4 Analyse comparative des courbes de température dans les blocs de béton	32
<b>Scénario 01 : Température de la plaque chaude 50 °C</b>	<b>33</b>
<i>Blocs TESC 03 et CR</i>	33
<i>Blocs TESC 06 et CR</i>	34
<i>Bloc TESC 08 et CR</i>	35
<i>Bloc TESC 10 et CR</i>	36
<b>Scénario 02 : Température de la plaque chaude 60 °C</b>	<b>37</b>
<i>Bloc TESC 03 et CR</i>	37
<i>Bloc TESC 06 et CR</i>	38
<i>Bloc TESC 08 et CR</i>	39
<i>Bloc TESC 10 et CR</i>	40
<b>Scénario 03 : Température de la plaque chaude 80 °C</b>	<b>41</b>
<i>Bloc TESC 03 et CR</i>	41
<i>Bloc TESC 06 et CR</i>	42
<i>Bloc TESC 08 et CR</i>	43
<i>Bloc TESC 10 et CR</i>	44
4.4.1 Bloc TESC 10 et CR à 60 °C	45
4.5 Tableau récapitulatif des paramètres caractéristiques issus de l'analyse comparative des courbes de température	45
4.6 Analyse comparative du comportement thermique des blocs TESC et témoin CR en fonction de la teneur en MCP et de la température de chauffage	47
<b>Chapitre 5 Conductivité thermique</b>	<b>50</b>
5.1 Introduction	50
5.2 Méthodologie de mesure de la conductivité thermique	50
5.2.1 Principe de la méthode utilisée	50
5.2.2 Dispositif expérimental	50
5.2.3 Adaptation du dispositif : ajout d'un fluxmètre	51
5.2.4 Conditions de mesure	54
5.3 Résultats de mesure	55
5.3.1 Modèle de détermination théorique de la conductivité thermique de matériaux composites	57

<b>Chapitre 6 Simulation numérique</b> .....	60
<b>6.1 Introduction</b> .....	60
<b>6.2 Préparation du modèle géométrique</b> .....	60
<b>6.2.1 Simplification et hypothèses géométriques adoptées</b> .....	60
<b>6.2.2 Choix de la géométrie étudiées</b> .....	61
<b>6.3 Préparation du maillage (Gambit)</b> .....	61
<b>6.3.1 Création de la géométrie</b> .....	61
<b>6.3.2 Type de maillage utilisé</b> .....	61
<b>6.4 Mise en place du modèle numérique dans Fluent</b> .....	62
<b>6.4.1 Modèles physiques activés</b> .....	62
<b>6.4.2 Propriétés des matériaux</b> .....	62
<b>6.4.3 Conditions aux limites</b> .....	62
<b>6.4.4 Paramètres de calcul</b> .....	62
<b>6.5 Résultats numériques</b> .....	62
<b>6.6 Comparaison entre les courbes de simulation et les courbes expérimentales</b> ....	63
<b>6.7 Conclusion partielle</b> .....	64
<b>Conclusion générale</b> .....	66
<b>Références bibliographiques</b> .....	68

## Liste des tableaux

Tableau 1 Propriétés des agrégats .....	17
Tableau 2 : Caractéristiques du LWA.....	18
Tableau 3 : Propriétés du MCP.....	19
<i>Tableau 4</i> : Composition massique (Kg) des blocs CR et TESC.....	25
<i>Tableau 5</i> : Teneur en MCP des blocs TESC .....	25
<i>Tableau 6</i> : Désignations et acronymes.....	28
Tableau 7 Tableau récapitulatif des paramètres caractéristiques issus de l'analyse comparative des courbes de température .....	46
Tableau 8 Réétalonnage expérimental de la sensibilité du fluxmètre .....	56
Tableau 9 Résultats expérimentaux de la mesure de la conductivité .....	56
Tableau 10 Conductivités thermiques théoriques des TESC avec MCP a l'état liquide et solide.....	59

## Table des figures

Figure 1 Schéma comparatif des inerties thermique en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau d'après [45] .....	5
Figure 2 la relation de la température et de l'énergie thermique .....	6
Figure 3 principes schématique du changement de phase des matériaux (INERTEK).....	8
Figure 4 Image montrant des microcapsules de MCP (BASF) .....	11
Figure 5 Différentes géométries de macroencapsulation de MCP : sphérique, tubulaire, cylindrique et rectangulaire (de gauche à droite)d'après.....	12
Figure 6 (a) Macrocapsules métalliques scellées ; (b) section d'une macrocapsule .....	12
Figure 7 Illustration du volume d'eau mesuré (1 L) dans un bêcher gradué .....	16
Figure 8 Opération de pesée du gravier .....	16
Figure 9 Mesure du volume d'un échantillon de gravier par immersion dans l'eau .....	17
Figure 10 Mise en poudre de la sépiolite et mesure de sa masse volumique à l'aide d'un bêcher et d'une balance de précision.....	18
Figure 11 Mesure de la masse volumique de l'huile de coprah dans un bêcher gradué .....	19
Figure 12 Mise à l'étuve à 60 °C des deux bacs, pour les opérations de fonte de la graisse végétale et séchage de la sépiolite. ....	21
Figure 13 Imbibition de la sépiolite par plongée dans le MCP et égouttage du CLWA .....	21
Figure 14 Échantillons TESC et CR prêts pour les tests thermiques .....	24
Figure 15 Bloc à 80 % de CLWA, exclu en raison de sa faible résistance mécanique .....	24
Figure 16 Banc D'essai.....	30
Figure 17 Mise en place des thermocouples sur l'échantillon.....	31
Figure 18 Évolution de la température des blocs TESC 03 et CR en fonction du temps a x=12 cm .....	33
Figure 19 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 03 et CR.....	33
Figure 20 Évolution de la température des blocs TESC 06 et CR en fonction du temps a x=12 cm .....	34
Figure 21 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 06 et CR.....	34
Figure 22 Évolution de la température des blocs TESC 08 et CR en fonction du temps a x=12 cm .....	35
Figure 23 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 08 et CR.....	35
Figure 24 Évolution de la température des blocs TESC 10 et CR en fonction du temps a x=12 cm .....	36
Figure 25 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 10 et CR.....	36
Figure 26 Évolution de la température des blocs TESC 03 et CR en fonction du temps a x=12 cm .....	37
Figure 27 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 03 et CR.....	37
Figure 28 Évolution de la température des blocs TESC 06 et CR en fonction du temps a x=12 cm .....	38
Figure 29 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 06 et CR.....	38

Figure 30 Évolution de la température des blocs TESC 08 et CR en fonction du temps a x=12 cm .....	39
Figure 31 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 08 et CR.....	39
Figure 32 Évolution de la température des blocs TESC 10 et CR en fonction du temps a x=12 cm .....	40
Figure 33 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 10 et CR.....	40
Figure 34 Évolution de la température des blocs TESC 03 et CR en fonction du temps a x=12 cm .....	41
Figure 35 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 03 et CR.....	41
Figure 36 Évolution de la température des blocs TESC 06 et CR en fonction du temps a x=12 cm .....	42
Figure 37 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 06 et CR.....	42
Figure 38 Évolution de la température des blocs TESC 08 et CR en fonction du temps a x=12 cm .....	43
Figure 39 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 08 et CR.....	43
Figure 40 Évolution de la température des blocs TESC 10 et CR en fonction du temps a x=12 cm .....	44
Figure 41 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 10 et CR.....	44
Figure 42 Évolution de la température des blocs TESC 10 et CR en fonction du temps .....	45
Figure 43 Dispositif expérimental .....	51
Figure 44 Association du CT-mètre et du fluxmètre dans l'installation expérimentale .....	53
Figure 45 Mise en place de la plaque en caoutchouc et raccordement des thermocouples au CT-mètre.....	53
Figure 46 Mise en place d'une plaque pour la mesure de la conductivité avec le CT-mètre Hilton 112 et acquisition des données avec le PicoLog. ....	54
Figure 47 Évolution de la tension issue du fluxmètre (mV) en fonction du temps (s) — vérification du régime stationnaire (béton, e = 51,94 mm). ....	57
Figure 48 Résistances en série	Figure 49 Résistances en parallèle 58
Figure 50 Maillage de la géométrie 2D du bloc (30 mm × 150 mm) sous Gambit 2.4.6. ....	61
Figure 51 Comparaison de la distribution de température entre le béton CR et le béton TESC 10 (simulation numérique).....	63
Figure 52 Comparaison des évolutions expérimentales et simulées de la température dans les blocs de référence CR et TESC 10. ....	64

# Nomenclature

## Abréviations

- **CLWA** : Composite Light Weight Aggregate (Agrégat léger composite imprégné de MCP)
- **CR** : Concrete Reference (Béton de référence, témoin)
- **CT-mètre** : Conductivity Test Meter (Appareil de mesure de conductivité thermique)
- **GV** : Graisse Végétale (huile de coprah utilisée comme MCP)
- **IDE** : Integrated Development Environment (environnement de développement intégré, ici Arduino IDE)
- **LWA** : Light Weight Aggregate (Agrégat léger)
- **MCP** : Matériau à Changement de Phase
- **TESC** : Thermal Energy Storage Concrete (Béton à stockage d'énergie thermique)

## Grandeurs physiques

- **a** : Diffusivité thermique ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
- **cp** : Capacité calorifique massique ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
- **$\Delta T$**  : Différence de température ( $^{\circ}\text{C}$ )
- **e** : Épaisseur des blocs / échantillons (mm, m)
- **$\varepsilon$**  : Effusivité thermique ( $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$ )
- **L** : Chaleur latente de fusion ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
- **m** : Masse (kg)
- **q** : Flux thermique ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )
- **$\rho$**  : Masse volumique ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
- **T** : Température ( $^{\circ}\text{C}$ , K)
- **t** : Temps (s, min)
- **V** : Tension mesurée par le fluxmètre ( $\mu\text{V}$ )
- **Vol** : Volume ( $\text{m}^3$ , L)
- **x** : Profondeur ou distance (mm, cm, m)

## Symboles utilisés dans les équations

- **E/C** : Rapport Eau/Ciment
- **$f_v$**  : Fraction volumique de CLWA dans le TESC
- **m<sub>bloc</sub>** : Masse totale du bloc (kg)
- **m<sub>CLWA</sub>** : Masse totale de l'agrégat léger imprégné (kg)
- **m<sub>MCP</sub>** : Masse de MCP imprégnée (kg)
- **m<sub>sep</sub>** : Masse de sépiolite (kg)
- **%MCP** : Pourcentage massique de MCP dans le bloc (%)
- **$\rho_{CLWA}$**  : Masse volumique apparente de l'agrégat imprégné ( $\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
- **$\rho_{sep}$**  : Masse volumique réelle de la sépiolite ( $\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
- **S** : Sensibilité nominale du fluxmètre ( $\mu\text{V}\cdot(\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2)$ )
- **S'** : Sensibilité corrigée (réétalonnée) du fluxmètre ( $\mu\text{V}\cdot(\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2)$ )
- **$\lambda$**  : Conductivité thermique ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )

## Introduction générale

Le secteur du bâtiment est reconnu comme l'un des plus grands consommateurs d'énergie à l'échelle mondiale. En Algérie, ce secteur représente environ 35 % de la consommation énergétique globale, principalement pour le chauffage et la climatisation[1]. Cette forte demande est due d'une part au climat méditerranéen marqué par des étés très chauds et des hivers froids dans plusieurs régions, et d'autre part à la mauvaise qualité thermique de nombreuses constructions. Le recours massif à la climatisation pour maintenir un niveau de confort acceptable entraîne des dépenses importantes et contribue à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre.

Dans ce contexte, la question du confort thermique et de la maîtrise des consommations énergétiques dans le bâtiment devient cruciale. Les solutions traditionnelles, telles que l'amélioration de l'isolation ou l'augmentation de l'inertie par des parois massives, montrent rapidement leurs limites[2]. Il est donc nécessaire d'explorer de nouvelles approches alliant efficacité énergétique et durabilité à coût réduit.

Les matériaux à changement de phase (MCP) constituent une alternative prometteuse. Grâce à leur capacité de stockage et de restitution de chaleur sous forme de chaleur latente, ils permettent de réduire les fluctuations de température à l'intérieur des bâtiments[3]. Concrètement, un MCP peut absorber une grande quantité d'énergie lors de sa fusion (en période chaude) et la restituer lors de sa solidification (en période plus fraîche), assurant ainsi une autorégulation passive de la température intérieure.

L'intégration des MCP dans les parois de bâtiments a fait l'objet de nombreuses études. Plusieurs techniques sont possibles : incorporation directe, micro-encapsulation, imprégnation d'agrégats poreux, ou encore ajout dans des mortiers et bétons. Parmi ces méthodes, l'imprégnation dans des granulats légers ou l'utilisation de composites cimentaires enrichis en MCP se distingue par sa faisabilité, son coût réduit et sa compatibilité avec les techniques de construction existantes [4][5].

En Algérie, l'enjeu est double : répondre aux besoins croissants en logements tout en assurant un confort thermique avec un minimum de recours aux systèmes actifs (climatisation et chauffage). L'utilisation de MCP d'origine naturelle ou à faible coût, incorporés dans le béton, permet non seulement d'améliorer les performances

thermiques des bâtiments, mais aussi de favoriser une approche écologique en limitant l'usage de matériaux synthétiques et en réduisant l'empreinte carbone [6].

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons particulièrement à l'étude expérimentale du comportement thermique d'un béton composite intégrant un MCP.

Le travail mené vise à :

- Élaborer un béton composite par imprégnation et substitution partielle d'agrégats ;
- Réaliser des essais expérimentaux pour caractériser ses propriétés thermiques (conductivité, effusivité, diffusivité) ;
- Comparer les performances thermiques du béton de référence et du béton composite contenant le MCP ;

Ce travail s'inscrit dans une démarche globale de recherche de solutions passives, durables et peu coûteuses pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments en Algérie. Il contribue à démontrer l'intérêt de l'intégration des MCP dans des matériaux de construction largement utilisés, tels que le béton, et ouvre des perspectives pour le développement d'enveloppes intelligentes adaptées au contexte méditerranéen.

*Pour mener à terme ce travail, nous avons adopté la division suivante :*

- Chapitre 1 : Il est consacré aux généralités sur les matériaux à changement de phase, le mode d'intégration dans les matériaux de construction et leur contribution à l'amélioration du confort thermique dans le bâtiment.

- Chapitre 2 : Il détaille les travaux de préparation des agrégats rentrant dans l'élaboration du béton classique et il décrit la technique d'imprégnation de la sépiolite par le MCP, l'agrégat qui sera ajouté au béton ordinaire. C'est également dans ce chapitre que sont faites les évaluations de la masse volumique des différents composants du béton imprégné.

- Chapitre 3 : C'est le chapitre dans lequel nous décrivons la technique d'élaboration des bétons : le béton ordinaire, appelé béton CR pour *concret reference*, en rappelant les proportions d'agrégats préconisées dans la méthode de *Dreux-Gorisse*, puis la conduite que nous avons suivie pour la formulation du béton imprégné de MCP, appelé TESC pour *Thermal energy storage concret*.

- Chapitre 4 : Il est réservé aux mesures des températures dans les différents bétons composites et la comparaison avec l'évolution de la température dans le bloc de béton de référence. C'est la partie essentielle de nos travaux dans laquelle nous montrons l'intérêt de l'ajout d'un matériau à changement de phase et l'apport de ces matériaux en termes d'amortissement du signal de température et de déphasage dans le transfert de chaleur de la face exposée à la chaleur de la plaque de béton vers l'autre face. Ce problème est intéressant car il constitue une simulation du comportement thermique à échelle réduite d'une paroi exposée à un climat extérieur estivale.

- Chapitre 5 : C'est la seconde partie expérimentale de nos travaux consacrée à la mesure par le CT-mètre de la conductivité thermique des bétons CR et TESC, paramètre important d'analyse du comportement thermique des blocs. L'appareil étant conçu plutôt pour la caractérisation de matériaux isolants, nous avons dû apporter quelques modifications pour l'utiliser dans le cas de blocs de béton dont la conductivité thermique est plus importante.

- Chapitre 6 : C'est dans ce chapitre que nous rapportons la partie numérique de ces travaux. Le logiciel Fluent est utilisé pour simuler un des cas traités expérimentalement. Nous avons choisi le cas du bloc contenant le maximum d'huile de coprah dont la masse représente 10% de la masse totale du bloc, soit un béton où 60% du volume de gravier est remplacé par le même volume de sépiolite saturée en huile. C'est donc le cas le plus favorable de nos expériences, celui qui doit mettre en évidence au mieux l'intérêt de l'incorporation des MCP dans les bétons.

Ce travail est complété par une conclusion générale où les principaux résultats sont rappelés et les perspectives de développement sont proposées.

# **Chapitre 1. Etude bibliographique**

## **1.1 Introduction**

Dans le contexte actuel marqué par une demande énergétique croissante et par la nécessité de réduire les consommations liées au secteur du bâtiment, l'intégration de nouvelles solutions pour améliorer l'efficacité énergétique et le confort thermique représente un enjeu majeur. Parmi ces solutions, l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) suscite un intérêt considérable.

En effet, les MCP possèdent la capacité d'absorber, de stocker et de restituer de grandes quantités d'énergie thermique lors de leurs transitions de phase, principalement solide-liquide, sans variation notable de température. Cette propriété en fait des candidats prometteurs pour l'optimisation de la régulation thermique dans les bâtiments.

L'intégration des MCP dans les éléments constitutifs de l'enveloppe, tels que les murs, les cloisons ou encore les dalles, permet d'augmenter l'inertie thermique et de réduire les fluctuations de température intérieure. Mélangés au béton, ils offrent une double fonctionnalité : d'une part, conserver de manière acceptable les propriétés mécaniques du matériau de base, et surtout, améliorer ses performances thermiques en favorisant le stockage d'énergie solaire ou interne. Ainsi, ces matériaux contribuent à la réduction des besoins en chauffage et en climatisation, en améliorant naturellement et de manière significative le confort thermique des occupants.

Ce chapitre bibliographique présente donc les recherches menées autour de l'utilisation des MCP dans le bâtiment, en mettant en évidence leur rôle dans la performance énergétique et le confort thermique, ainsi que les différentes approches d'intégration, notamment leur incorporation dans le béton destiné aux murs.

## **1.2 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 2 cm d'épaisseur contenant 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 [2].

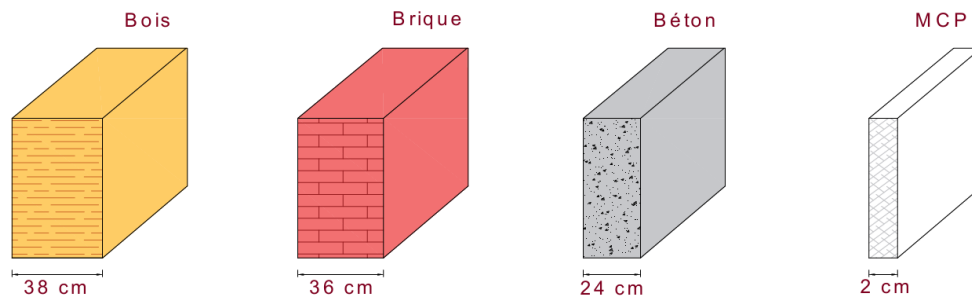


Figure 1 Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau d'après [45]

### 1.2.1 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 après le coucher du soleil l'énergie solaire diurne. Il existe deux modes de stockage d'énergie : le mode sensible et le mode latent.

#### 1.2.1.1 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 [4, p. 165]. La quantité d'énergie stockée par chaleur sensible dépend de la masse de matériau, de sa capacité thermique massique et du différentiel de température [5].

### 1.2.1.2 Chaleur latente

Tout matériau à changement de phase 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 [5].

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 [4] 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 [5] permet de stocker en chaleur latente jusqu'à 15 fois plus d'énergie qu'en chaleur sensible.

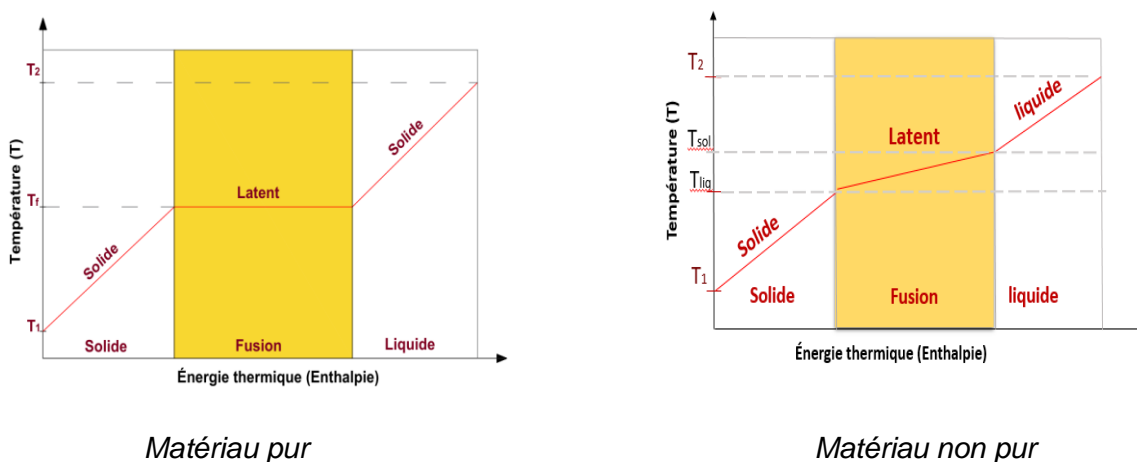


Figure 2 la relation de la température et de l'énergie thermique

### 1.2.2 Phénomène de changement de phase

Afin de réduire les consommations énergétiques et les émissions de CO<sub>2</sub>, de nombreux pays ont adopté des politiques d'efficacité énergétique dans l'ensemble

des secteurs d'activité et se sont tournées 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 ou de refroidissement en été. 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, parmi les plus pertinentes, on peut citer [6], [7], [8], 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 faiblement 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 de 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[9].

## PRINCIPE DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE

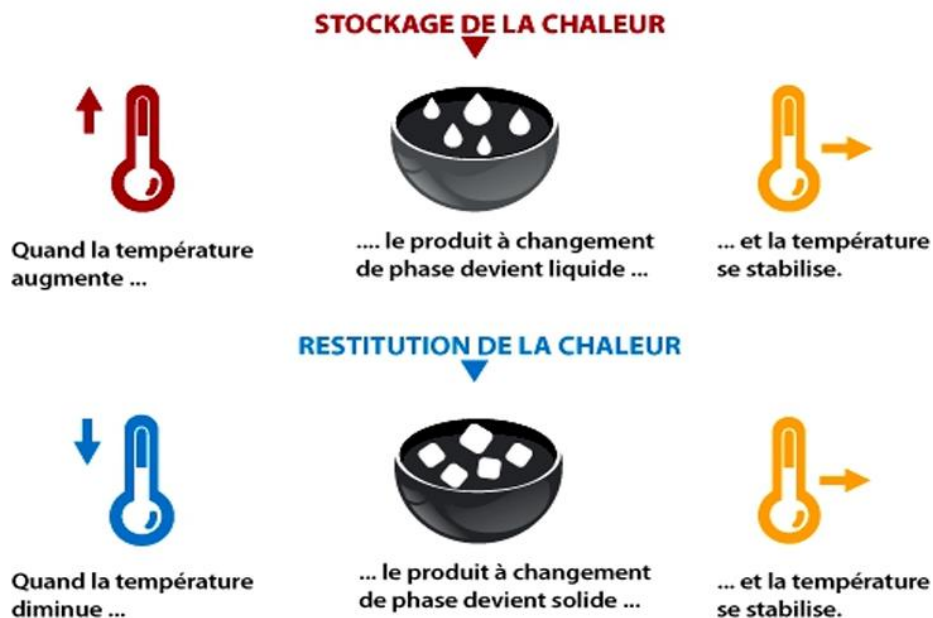


Figure 3 principes schématique du changement de phase des matériaux (INERTEK)

### 1.3 L'efficacité énergétique dans les bâtiments

D'ici 2050, la demande mondiale de l'énergie devrait doubler. Dans un même temps et afin de conserver l'environnement et lutter contre le réchauffement de la planète, il faut réduire de moitié les émissions de GES. Ainsi, l'efficacité énergétique est un critère clé dans la démarche globale de développement durable pour mieux maîtriser et rationaliser les besoins en matière d'énergie et pour satisfaire aux objectifs fixés. L'objectif de tout concept d'efficacité énergétique est la mise en place de solutions d'efficacité énergétique permettant de consommer moins et mieux tout en garantissant un bon niveau de confort thermique.

C'est pourquoi, il est nécessaire de sensibiliser les utilisateurs à leur consommation énergétique et de les impliquer activement dans la démarche de concrétisation de l'efficacité énergétique, en les incitant à revoir leurs pratiques et habitudes et à s'investir sans crainte dans l'utilisation des énergies renouvelables et des produits performants.

L'efficacité énergétique globale des bâtiments peut se faire à deux niveaux : « active » et « passive ». En effet, l'efficacité énergétique dite « active » touche à la régulation, la gestion et la supervision de l'énergie et la gestion technique du bâtiment. A contrario, l'efficacité énergétique dite « passive » vise à diminuer les besoins énergétiques à travers l'amélioration de l'isolation de l'enveloppe du bâtiment, de sa ventilation et le choix des équipements de chauffage et climatisation.

La gestion de l'énergie « active » dans un bâtiment est indispensable pour réduire la consommation énergétique à travers l'utilisation d'équipements ayant un meilleur rendement énergétique, l'intégration des énergies renouvelables qui permettent d'apporter les besoins d'un bâtiment en énergie, le suivi et l'affichage de la consommation énergétique au sein du bâtiment dans le temps.

Il existe plusieurs techniques de gestion énergétique « passive » dans le bâtiment telles que la protection solaire et thermique des bâtiments, la technique de régulation thermique, la technique de dissipation de chaleur et la technique de récupération de chaleur. L'enveloppe d'un bâtiment stocke généralement une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur. Sa capacité de stockage dépend des propriétés des matériaux constituant de cette enveloppe. Un bon choix de matériaux de construction permettra d'améliorer l'inertie thermique d'une paroi.

Par ailleurs, l'un des facteurs permettant de réduire la consommation énergétique dans un bâtiment est l'utilisation de la lumière naturelle. En effet, l'orientation optimale des façades améliore le confort thermique des occupants par l'éclairage naturel. En effet, plus l'apport solaire est important, plus les besoins thermiques pour le chauffage sont réduits. Par contre le risque d'un échauffement excessif l'été est plus élevé ; il faut donc veiller à limiter ces apports solaires durant l'été par des moyens naturels comme des stores, des feuillages caducs, etc.

Ces défauts peuvent aussi être compensés par l'isolation thermique hivernale et estivale, qui permet de réduire les déperditions thermiques et par conséquent améliorer le confort thermique dans la pièce. Cela est assuré par le recours à une forme bien compacte des bâtiments, la construction à plusieurs niveaux et l'utilisation d'isolants thermiques ayant une faible conductivité thermique tels que la mousse rigide de polystyrène, le chanvre, la laine de mouton, la laine de verre, la fibre de bois, le polystyrène expansé, etc.

Par ailleurs, l'isolation thermique estivale permet d'éviter l'échauffement excessif des locaux. La température des locaux dépend essentiellement de

l'orientation des façades, des dimensions des surfaces vitrées, du type de vitrage et de la protection solaire. Une conception et un choix judicieux de ces paramètres contribuent à la réduction de l'énergie consommée afin de maintenir un niveau de température acceptable dans les locaux.

En effet, le recours à des vitrages à isolation renforcée, dont la surface vitrée ne dépasse pas 30 % de la surface de la façade, permet d'améliorer significativement l'isolation estivale. L'utilisation des isolants dans une construction est primordiale afin de maintenir un bon niveau de confort thermique des occupants quelle que soit la saison. Cependant, leur utilisation abusive provoque parfois la sensation d'inconfort thermique. Les défauts des isolations ainsi que l'inertie thermique du bâtiment peuvent être corrigés par l'utilisation de nouveaux matériaux tels que les matériaux à changement de phase assurant un bon niveau de confort thermique l'hiver comme l'été [8] [10].

#### **1.4 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[9].

##### **1.4.1 La microencapsulation**

La microencapsulation désigne l'action d'enfermer des microparticules de MCP dans des microcapsules de taille ne dépassant pas 1000 µm. 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.



*Figure 4 Image montrant des microcapsules de MCP (BASF)*

#### **1.4.2 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.

Ces conteneurs peuvent être utilisés directement comme échangeurs de chaleur ou être incorporés dans des produits de construction.

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[11].

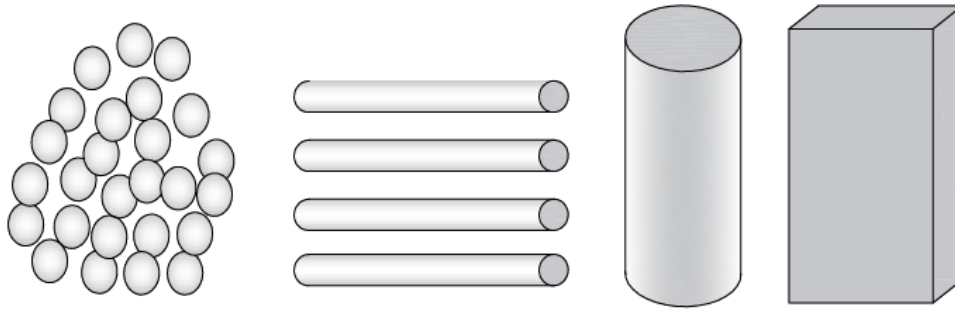


Figure 5 Différentes géométries de macroencapsulation de MCP : sphérique, tubulaire, cylindrique et rectangulaire (de gauche à droite)d'après

Dong 2016 et al[7] ont développé un MCP macroencapsulé à base de boules creuses en acier chargées de MCP (Octadécane) comme le montre la Figure 06. 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



(a)



(b)

Figure 6 (a) Macrocapsules métalliques scellées ; (b) section d'une macrocapsule

## 1.5 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. Les matériaux minéraux argileux couramment utilisés sont le kaolin, la diatomite, la sépiolite, la bentonite, la perlite, l'attapulgite, la vermiculite, 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[6].

## Chapitre 2 : Préparation des composants du TESC et mesure de leur masse volumique.

### 2.1 Introduction

Une des techniques d'incorporation des MCP dans le béton, avec pour objectif essentiel d'améliorer l'inertie thermique des matériaux de construction, consiste à imprégner une matrice poreuse de matériaux à changement de phase (MCP), qu'il faut ensuite mélanger au béton.

Nous avons retenu d'utiliser dans nos expériences de l'huile de coprah, un MCP d'origine végétale, car il présente des propriétés favorables : grande disponibilité, coût faible et propriétés thermo physiques relativement intéressantes telles qu'une capacité thermique élevée, une stabilité chimique adaptée aux cycles thermiques successifs, une température de changement de phase adaptée à son usage dans le bâtiment et une chaleur latente qui représente un bon rapport qualité/prix.

Cette huile de coprah sera intégrée dans de la sépiolite, un granulat léger pour former un agrégat que l'on désignera sous l'appellation de CLWA, pour Composite Light Weight Agregat, ce qui signifie agrégat composite de faible poids.

### 2.2 Préparation des matériaux

L'élaboration des bétons repose sur le choix de composants spécifiques et une préparation garantissant une compatibilité optimale avec le MCP.

- **Le ciment algérien** : Un ciment Portland de type CEM I 42.5 est utilisé pour assurer une matrice robuste et homogène. Ses propriétés mécaniques et sa porosité influencent directement le comportement thermique du matériau final.

- **Les granulats utilisés** : Un gravier de granulométrie 3/8 mm et un sable de carrière 0/3 mm ont été sélectionnés pour la formulation.

- **La sépiolite (LWA - Granulat Léger)** : Ce minéral argileux, caractérisé par sa structure microporeuse, est employé comme support du MCP. Sa capacité d'absorption et sa stabilité thermique favorisent une imprégnation efficace et durable.

- **La graisse végétale (GV) - Huile de coprah** : Ce MCP d'origine naturelle est choisi pour son point de fusion modéré et sa capacité de stockage thermique élevée relativement à son coût. Son interaction avec les granulats légers joue un rôle clé dans la régulation thermique du matériau composite.

### 2.3 Préparation des matériaux

Avant l'imprégnation du MCP, une préparation rigoureuse des matériaux est nécessaire afin d'optimiser l'efficacité du processus.

- **Séchage de la sépiolite** : La sépiolite est placée dans une étuve à 105°C pendant 24 heures afin d'éliminer toute humidité contenue dans les pores, garantissant ainsi une meilleure absorption d'huile.

- **Lavage et séchage des granulats** : Les granulats ont été préalablement lavés à l'eau afin d'éliminer les impuretés fines et les poussières susceptibles d'affecter l'adhérence et la compacité du mélange.

Après lavage, ils sont séchés à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures pour minimiser la teneur en eau avant mélange. Ce traitement permet un contrôle précis des dosages hydriques et contribue à l'obtention de propriétés mécaniques et thermiques homogènes et reproductibles du matériau final.

### 2.4 Détermination de la masse volumique

**Pour les granulats**, la masse volumique est déterminée par la méthode du déplacement d'eau. Chaque échantillon, préalablement séché, est pesé puis immergé dans une éprouvette graduée contenant un volume d'eau initialement mesuré. La différence de volume, mesurée immédiatement avant et après immersion correspond au volume d'eau déplacé par l'échantillon. La masse volumique est ensuite calculée en rapportant la masse sèche du matériau au volume d'eau déplacé. Ces mesures sont répétées à trois reprises afin d'obtenir une valeur moyenne fiable.



*Figure 7 Illustration du volume d'eau mesuré (1 L) dans un b cher gradué*



*Figure 8 Opération de pesée du gravier*



Figure 9 Mesure du volume d'un échantillon de gravier par immersion dans l'eau

Tableau 1 Propriétés des agrégats

Agrégats	D (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Origine
Sable	$0 \leq D \leq 3$	2590	Carrière locale
Gravier moyen	$3 \leq D \leq 8$	2590	

**Pour la sépiolite**, la masse volumique est mesurée après réduction en poudre hyperfine pour réduire l'effet de porosité inter grains. Après pesée, elle est déposée dans un bécher gradué puis tassée par vibration pour en déterminer son volume. Ce qui permet d'obtenir la densité apparente de la sépiolite.

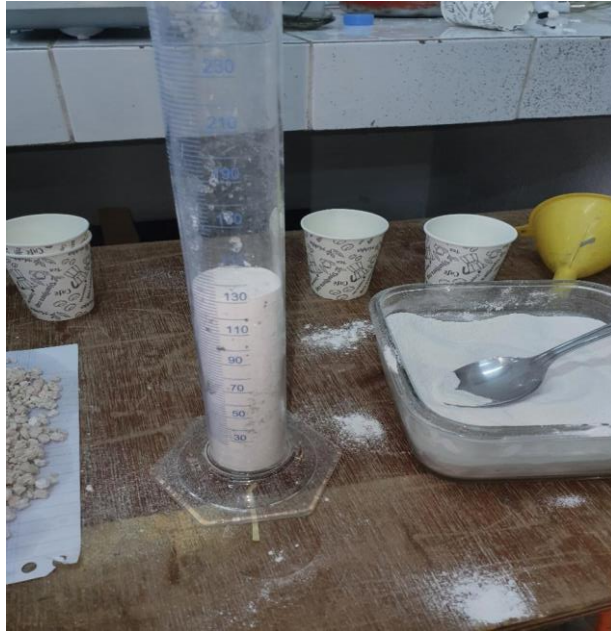


Figure 10 Mise en poudre de la sépiolite et mesure de sa masse volumique à l'aide d'un bécher et d'une balance de précision

Tableau 2 : Caractéristiques du LWA

LWA	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	D (mm)	Prix (DA/kg)	Origine
Sépiolite (S)	778,5	$0 \leq D \leq 7$	140	Turquie

○ **Pour le matériau à changement de phase (MCP)**, la masse volumique est mesurée sans tenir compte de son état liquide ou solide. Pour en déterminer sa valeur moyenne, un morceau de MCP à l'état solide est prélevé de manière aléatoire puis pesé à l'aide d'une balance de précision. Il est ensuite placé dans une étuve à 60°C jusqu'à sa fusion totale, puis versé délicatement dans une éprouvette graduée. Le volume occupé par le MCP fondu est relevé, et la masse volumique est calculée en divisant la masse mesurée par le volume occupé dans l'éprouvette.

Cette méthode permet d'obtenir la densité à l'état liquide du matériau.

Tableau 3 : Propriétés du MCP

Plage de fusion (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	L (j/g)	Prix (DA/kg)	Origine
≈ 23-26	920	77 ± 13	150	Malaisie



Figure 11 Mesure de la masse volumique de l'huile de coprah dans un b cher gradué

## 2.5 Techniques d'imprégnation

Dans le processus de conception du matériau composite, l'imprégnation du MCP dans le support poreux constitue une étape cruciale pour sa performance thermique. Cette opération permet de stabiliser le matériau actif, ici l'huile de coprah à l'intérieur d'une matrice solide, en limitant les pertes durant les transitions de phase et en assurant une bonne compatibilité avec le système hôte, en l'occurrence une paroi à échelle réduite.

Dans cette étude, la **sépiolite**, un minéral argileux fibreux à haute porositt , est choisie comme support poreux pour sa capacité à absorber des substances liquides par capillaritt  et interaction physique. Le MCP est de l'huile de coprah,

présentant un bon comportement thermique dans la gamme de températures recherchée.

La méthode d'imprégnation adoptée repose sur une approche thermique simple mais efficace, visant à faciliter l'introduction du MCP liquide dans les pores de la sépiolite.

Elle se déroule selon les étapes suivantes :

- **Séchage préalable de la sépiolite** à l'étuve pendant 24 heures afin d'éliminer toute trace d'humidité susceptible d'affecter l'imprégnation.

- **Fusion du MCP** à 60 °C dans une étuve jusqu'à obtention d'un liquide homogène.

- **Immersion de la sépiolite sèche dans le MCP fondu** et maintien à température constante (60 °C) pendant 30 minutes pour permettre l'imbibition complète par capillarité.

- **Après imprégnation**, la sépiolite imbibée d'huile, désormais dénommée CLWA (composit light weight agregat) est étalée sur un papier absorbant à l'air libre pour la laisser s'égoutter pendant 24 heures, puis remise à l'étuve pendant 30 minutes à 60 °C puis de nouveau étalée sur le papier absorbant pour être certain d'éliminer toute trace d'huile superficielle résiduelle.

Cette technique, bien que simple, permet une pénétration en profondeur du MCP dans les pores de la sépiolite, renforçant ainsi la rétention de l'huile dans la matrice de la sépiolite et par conséquent la stabilité du composite dans les conditions d'utilisation visées.

Nous avons respecté les consignes données par Dehmous pour fixer les paramètres de température et de durée, définis pour optimiser l'absorption de l'huile de coprah par la sépiolite sans altérer la structure du matériau support ni celle du MCP.



*Figure 12 Mise à l'étuve à 60 °C des deux bacs, pour les opérations de fonte de la graisse végétale et séchage de la sépiolite.*



*Figure 13 Imbibition de la sépiolite par plongée dans le MCP et égouttage du CLWA*

## Chapitre 3 ÉLABORATION DES BÉTONS

### 3.1 Introduction

Dans le cadre de cette étude, plusieurs types de bétons ont été élaborés : un béton témoin nommé CR (Concret reference) puis des bétons ensemencés de CLWA à différentes concentrations dans le but d'évaluer l'impact de l'incorporation de matériaux à changement de phase (MCP) sur les performances thermiques dans un mur.

Les formulations reposent sur l'utilisation d'agréats locaux, et de sépiolite imprégnée d'huile de coprah.

Ainsi deux familles de bétons ont été préparées :

- Le **béton témoin CR**, formulé à base de ciment, de sable et de granulats standards sans sépiolite ni MCP. Il constitue la base de référence pour l'analyse comparative.

- Les **bétons test MCP**, intégrant de la **sépiolite imprégnée d'huile de coprah**. Ces formulations constituent des **agréats composites légers (CLWA)** capables de stocker de l'énergie thermique latente. Cinq taux d'incorporation massiques de CLWA ont été considérés : **20 %, 40 %, 50 %, 60 % et 80 %**.

L'ensemble des formulations a été conçu en suivant la méthode de dosage **de Dreux-Gorisse**, qui permet de déterminer les proportions optimales des constituants du béton en assurant les propriétés recherchées telles que la maniabilité, la compacité, la résistance mécanique ou encore la densité du matériau.

### 3.2 Formulation du béton ordinaire CR

Le **béton CR**, utilisé comme témoin, a été formulé avec les dosages suivants :

- **Ciment** : 12,9 % du poids total.
- **Eau** : 18 % du poids total.
- **Sable 0/3** : 23,35 % du poids total.
- **Gravier 3/8** : 45,75 % du poids total.

Ces proportions ont été calculées pour obtenir une consistance adéquate, tout en garantissant la résistance et la durabilité du béton. Le **rapport E/C** (eau/ciment) a été ajusté pour assurer une bonne fluidité tout en maintenant une résistance mécanique suffisante.

### 3.3 Formulation des bétons composites TESC

Cinq blocs sont confectionnés à partir d'un béton imprégné de sépiolite imbibée par remplacement partiel du gravier par le même volume de CLWA et ceci à différents pourcentages 20, 40, 50, 60 et 80 % , les autres composants du béton, ciment, sable et eau étant dosés de manière standard, sans changement par rapport à la formule du béton de référence.

### 3.4 Elaborations des blocs et des plaques

Des blocs de 15x20x20 Cm<sup>3</sup> et des plaques de 2x30x30 Cm<sup>3</sup> sont fabriqués, les premiers pour l'étude du comportement thermique des bétons imprégnés et les secondes pour la mesure de leur conductivité thermique. Ce processus se fait comme suit :

1. **Moulage des blocs et plaques** : Les mélanges de béton sont coulés dans des moules en bois, préalablement fabriqués aux dimensions requises, ces derniers étant soigneusement huilés pour faciliter le démoulage ultérieur. Ils sont d'abord posés sur la table de vibration pendant 2 minutes pour assurer au béton une compaction optimale puis laissés durcir et sécher à l'air libre.

2. **Démoulage des blocs et plaques** : Il est effectué 2 à 3 jours après leur conception.

3. **Immersion dans l'eau pendant 7 jours** : Les blocs sont plongés dans des bacs d'eau afin de subir une hydratation complète.

4. **Séchage** : Les échantillons sont mis à sécher à l'air libre pendant une semaine avant placement dans une étuve à **60°C** pendant 7 jours pour complément de séchage.



*Figure 14 Échantillons TESC et CR prêts pour les tests thermiques*

**Remarque :**

Le bloc contenant 80 % de CLWA n'est finalement pas en état de subir les essais thermiques, du fait de sa faible résistance mécanique et de sa dégradation lors des manipulations, comme illustré sur la figure n°12.



*Figure 15 Bloc à 80 % de CLWA, exclu en raison de sa faible résistance mécanique*

### 3.5 Composition massique des blocs de CR et de TESC

Dans le tableau ci-dessous nous avons consigné la composition du bloc témoin (CR) et des blocs à stockage d'énergie thermique (TESC) en précisant pour chacun de ces échantillons la masse de ciment, sable, gravier, eau, et d'agrégat composite CLWA pour l'ensemble des cas.

Tableau 4 : Composition massique (Kg) des blocs CR et TESC

Échantillon	CLWA (en pourcentage du volume de gravier)	Gravier (kg)	CLWA (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Eau (kg)	Masse totale du bloc (kg)
témoin	0	7,08	0	3,626	2,40	1,20	14,30
01	20%	5,65	0,84	3,626	2,40	1,20	13,71
02	40%	4,242	1,68	3,626	2,40	1,20	13,14
03	50%	3,53	2,10	3,626	2,40	1,20	12,85
04	60%	2,82	2,52	3,626	2,40	1,20	12,56
05	80%	1,414	3,36	3,626	2,40	1,20	11,99

### 3.6 Teneur en MCP des blocs TESC

Le pourcentage de MCP présent dans chaque bloc est présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5 : Teneur en MCP des blocs TESC

Échantillon	Pourcentage de MCP (%)	MCP (kg)
TEMOIN	0	0
01	3	0,42
02	6	0,83
03	8	1,05
04	10	1,26

### 3.7 Détermination du pourcentage massique de MCP dans les blocs composites

Le pourcentage massique du matériau à changement de phase (MCP) présent dans les blocs est évalué à partir des propriétés physiques de l'agrégat léger imprégné (CLWA) et de la sépiolite utilisée comme support.

L'objectif est de quantifier la masse de MCP effectivement contenue dans le bloc.

Les données nécessaires au calcul sont :

- $m_{CLWA}$  : masse totale de l'agrégat léger imprégné [kg]
- $\rho_{CLWA}$  : masse volumique apparente de l'agrégat imprégné [kg/L]
- $\rho_{sep}$  : masse volumique réelle de la sépiolite [kg/L]
- $V_{sep}$  : volume de la sépiolite dans l'échantillon [L]
- $m_{sep}$  : masse de sépiolite [kg]
- $m_{MCP}$  : masse de MCP imprégnée [kg]
- $m_{bloc}$  : masse totale du bloc [kg]
- $\%MCP$  : pourcentage massique de MCP dans le bloc [%]

Les équations utilisées sont :

#### 1. Volume spécifique de la sépiolite imprégnée :

$$V_{sep} = \frac{m_{CLWA}}{\rho_{CLWA}}$$

#### 2. Masse sèche de sépiolite :

$$m_{sep} = V_{sep} \times \rho_{sep}$$

#### 3. Masse de MCP :

$$m_{MCP} = m_{CLWA} - m_{sep}$$

#### 4. Pourcentage massique de MCP dans le bloc :

$$\%MCP = \left( \frac{m_{MCP}}{m_{bloc}} \right) \times 100$$

#### Exemple d'application

Considérons les valeurs expérimentales suivantes :

- $m_{CLWA}=0,84$  kg
- $\rho_{CLWA}=1,54$  kg/L
- $\rho_{sep}=0,7784$  kg/L

- mbloc=13,71 kg

### Étapes de calcul :

#### 1. Volume de sépiolite :

$$V_{\text{sep}} = \frac{0,84}{1,54} = 0,5455 \text{ L}$$

#### 2. Masse de sépiolite :

$$m_{\text{sep}} = 0,5455 \times 0,7784 = 0,4248 \text{ kg}$$

#### 3. Masse de MCP :

$$m_{\text{MCP}} = 0,84 - 0,4248 = 0,4152 \text{ kg}$$

#### 4. Pourcentage massique de MCP :

$$\%_{\text{MCP}} = \left( \frac{0,4152}{13,71} \right) \times 100 = 3,03\%$$

Le pourcentage massique de MCP introduit dans ce bloc est d'environ **3,03 %**, ce qui montre une imprégnation significative du support par le matériau à changement de phase, favorable au stockage d'énergie thermique dans des applications passives.

### 3.8 Désignations et acronymes

Étant donné le nombre important d'échantillons à caractériser, une nomenclature appropriée s'impose. Comme indiqué dans le **tableau n°6** (Figure correspondante), les acronymes attribués aux échantillons sont définis de la manière suivante :

- **TESC** (Thermal Energy Storage Concrete) suivi d'un chiffre correspondant au pourcentage de MCP (matériau à changement de phase) incorporé dans l'échantillon.
- **CR** (Concrete Reference), qui désigne l'échantillon témoin de béton sans ajout de MCP.

Cette nomenclature, illustrée dans le tableau n°5, permet de distinguer facilement les différentes formulations étudiées tout en conservant une logique simple et systématique.

Tableau 6 : Désignations et acronymes

Désignation		Le pourcentage de MCP présent dans chaque bloc				
		0%	3%	6%	8%	10%
CR	Bloc témoin	CR	/	/	/	/
TESC	Bloc avec MCP	/	TESC 03	TESC 06	TESC 08	TESC 10

## **Chapitre 4 Évolution comparative des températures dans les blocs de béton**

### **4.1 Introduction**

Les blocs de béton sont placés sur des plaques d'acier maintenues à une température constante, représentant une condition de température saisonnière chaude, l'objectif étant d'étudier l'évolution de la température dans le bloc ensemencé de MCP en comparaison avec celle du béton ordinaire.

Les surfaces latérales des blocs étant suffisamment isolées par de large épaisseurs de polystyrène, l'hypothèse d'un transfert de chaleur unidirectionnel sera admise. La face opposée est libre et donc soumise aux conditions de température du laboratoire, une température qui évolue d'ailleurs très peu dans l'intervalle de temps que durent les expériences.

Des thermocouples sont insérés à l'intérieur des blocs à travers des trous de faible diamètre et suffisamment profonds dans le bloc pour éviter ou pour le moins réduire au minimum toute interférence avec le milieu extérieur.

Ainsi disposés, ils mesurent l'évolution au cours du temps de la température interne en différents points du bloc séparés par des intervalles judicieusement choisis pour tenir compte du taux de variation des températures plus important au voisinage de la plaque chauffante.

### **4.2 Préparation du banc d'essai**

Le banc d'essai est constitué de deux plaques en acier servant d'échangeurs de chaleur. Ces plaques sont alimentées en eau chaude à l'aide d'une pompe hydraulique, qui puise l'eau depuis un bain-marie réglé à une température choisie entre 50 °C et 80 °C.

Ce système forme un circuit fermé permettant de maintenir les plaques en acier à une température constante tout au long de l'expérience.

Afin de limiter les pertes thermiques par la base inférieure des plaques en acier et ainsi maintenir une température stable sur sa surface chauffante, ce côté de la plaque sera isolé à l'aide de panneaux de polystyrène expansé de 5 cm d'épaisseur.



*Figure 16 Banc D'essai*

### **4.3 Installation des thermocouples**

Les capteurs utilisés pour la mesure de la température sont des **thermocouples de type K**. Un thermocouple de type K est composé de deux métaux différents (généralement du chromel et de l'alumel) soudés à une extrémité. Lorsqu'il existe une différence de température entre cette jonction chaude et l'extrémité de référence, une tension est générée.

Cette tension est proportionnelle à la différence de température, ce qui permet de mesurer la température au point de soudure.

Chaque thermocouple est connecté à un module de conversion **MAX6675**, qui convertit le signal analogique en une donnée numérique. Ces modules sont reliés à une **planche d'essai perforée (breadboard round hole)**, puis à une carte **Arduino**.

La température ambiante du laboratoire est également mesurée à l'aide d'un module capteur dédié, lui aussi relié à la même planche d'essai.

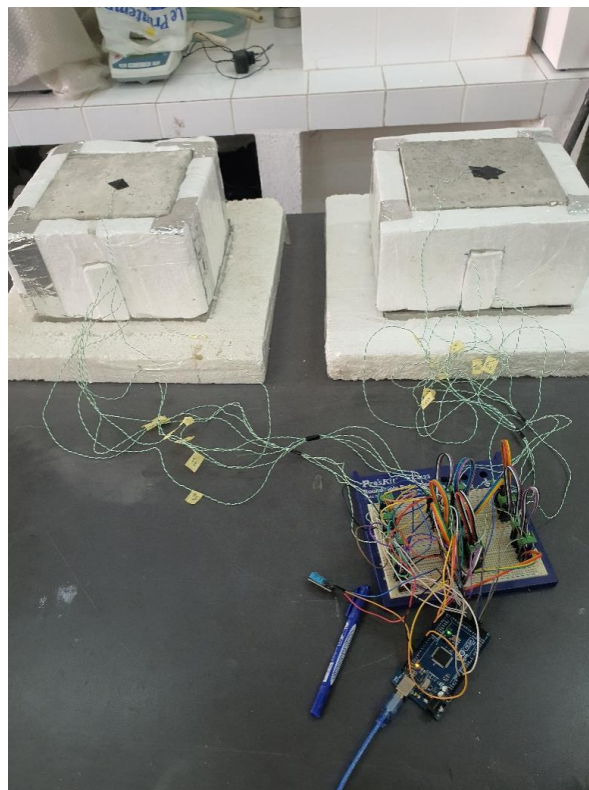
Cela permet de suivre en temps réel l'influence des conditions ambiantes sur le comportement thermique des blocs.

L'ensemble du système est piloté via le logiciel **Arduino IDE**, dans lequel un programme permet la lecture des températures mesurées par les **16 thermocouples**, ainsi que celle du capteur de température ambiante.

Les données collectées sont transmises en temps réel vers le logiciel **Tera Term**, qui enregistre automatiquement les résultats sous forme de **fichiers texte (.txt)**.

Ces fichiers sont ensuite exportés vers le logiciel **Microsoft Excel**, où ils sont exploités pour tracer les courbes d'évolution de la température à travers les blocs de béton.

Les mesures et les expériences durent tant que la température sur la face extérieure, donc dans tout le bloc, n'atteint pas 30 °C, une valeur pour laquelle on peut considérer que le MCP a totalement fondu et que le processus de changement de phase n'intervient plus dans les transferts thermiques.



*Figure 17 Mise en place des thermocouples sur l'échantillon*

#### **4.4 Analyse comparative des courbes de température dans les blocs de béton.**

L'étude vise à analyser l'évolution thermique au sein des blocs de béton lorsque ceux-ci sont soumis à des conditions de température imposée par une plaque faisant office d'échangeur thermique. Trois scénarios ont été définis, correspondant à des températures de plaque fixées à 50, 60 et 80 °C, ceci pour simuler des conditions thermiques réalistes d'une paroi murale exposée au rayonnement solaire.

Pour chaque scénario, quatre configurations expérimentales ont été réalisées en comparant le béton témoin (CR) avec des blocs de béton TESC aux différents pourcentages 20 %, 40 %, 50 % et 60 %. Ces expériences permettent d'évaluer l'impact de la température imposée sur la face exposée à la chaleur et surtout l'influence de la quantité de MCP ajoutée au béton sur l'évolution de la température dans le bloc en comparaison avec celle du bloc de béton ordinaire.

Ces expériences ont pour objectif principal de démontrer l'efficacité des matériaux à changement de phase et leur impact sur les performances thermiques des parois de l'enveloppe des bâtiments, en termes d'augmentation de leur inertie thermique et d'amélioration de leur caractère isolant.

Les résultats sont présentés sous forme de courbes de température relevées au sein des blocs, offrant une visualisation claire de l'évolution thermique dans le temps pour chacun des scénarii.

L'analyse de ces mesures expérimentales permet d'appréhender l'importance du rôle joué par le matériau à changement de phase incorporé dans le béton et leur apport dans l'amélioration des performances thermiques des parois en fonction des conditions extérieurs et des quantités de MCP ajoutées.

## Scénario 01 : Température de la plaque chaude 50 °C

### Blocs TESC 03 et CR

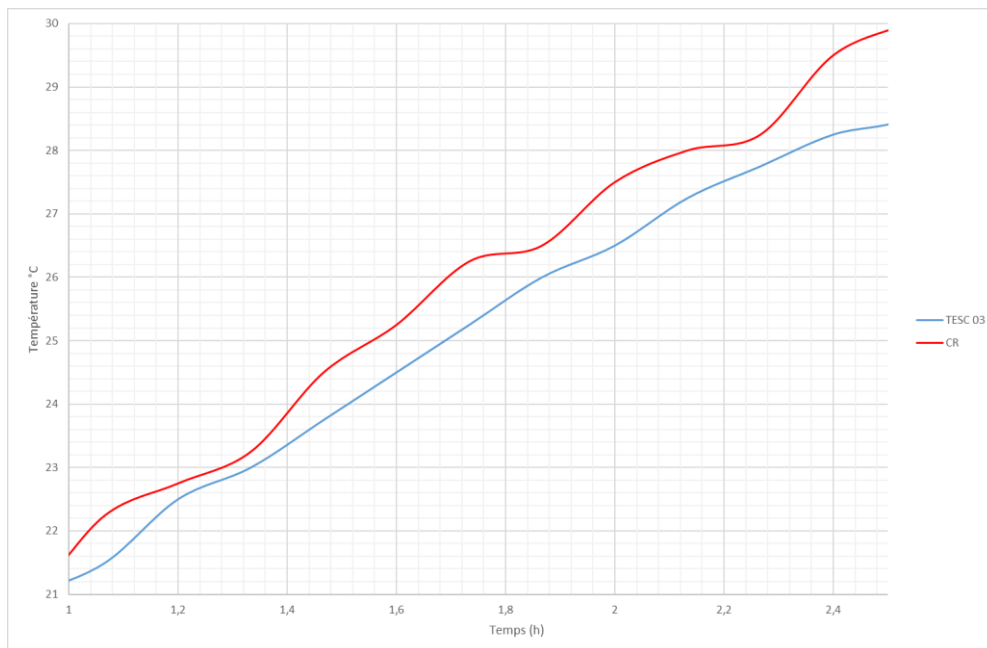


Figure 18 Évolution de la température des blocs TESC 03 et CR en fonction du temps a  $x=12$  cm

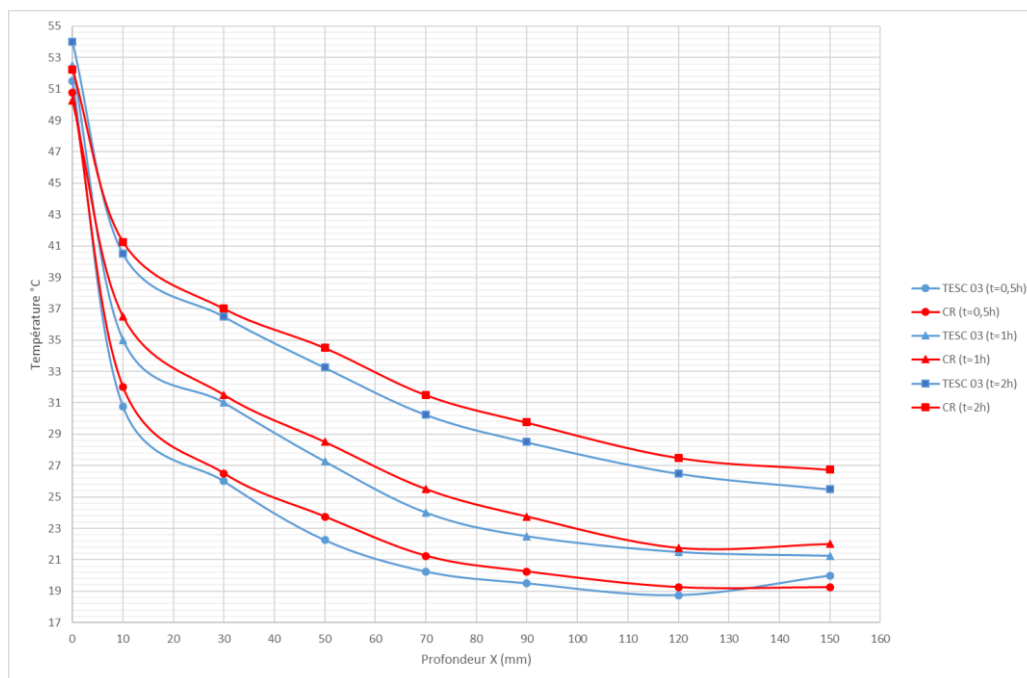


Figure 19 Évolution des températures en fonction de la profondeur  $X$  dans les blocs TESC 03 et CR

**Blocs TESC 06 et CR**

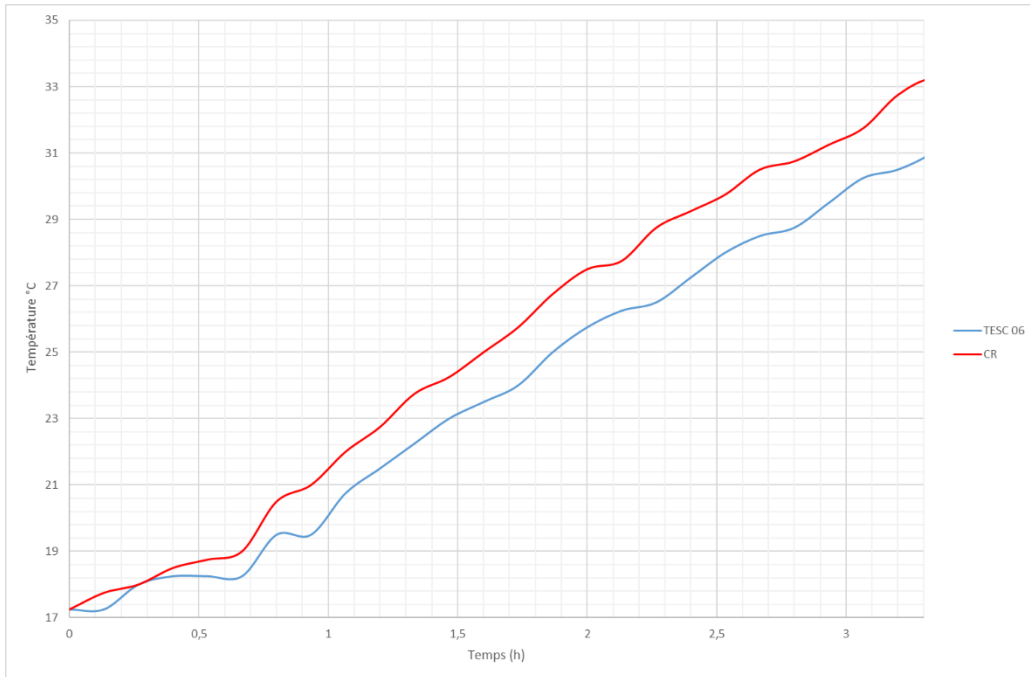


Figure 20 Évolution de la température des blocs TESC 06 et CR en fonction du temps a  $x=12\text{ cm}$

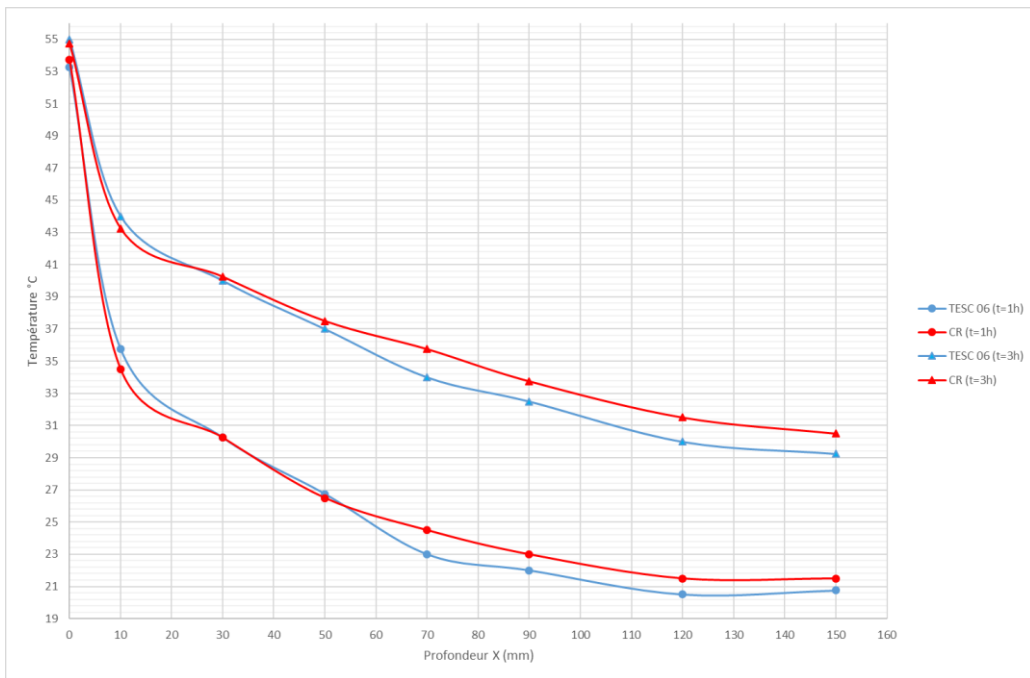


Figure 21 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 06 et CR

**Bloc TESC 08 et CR**

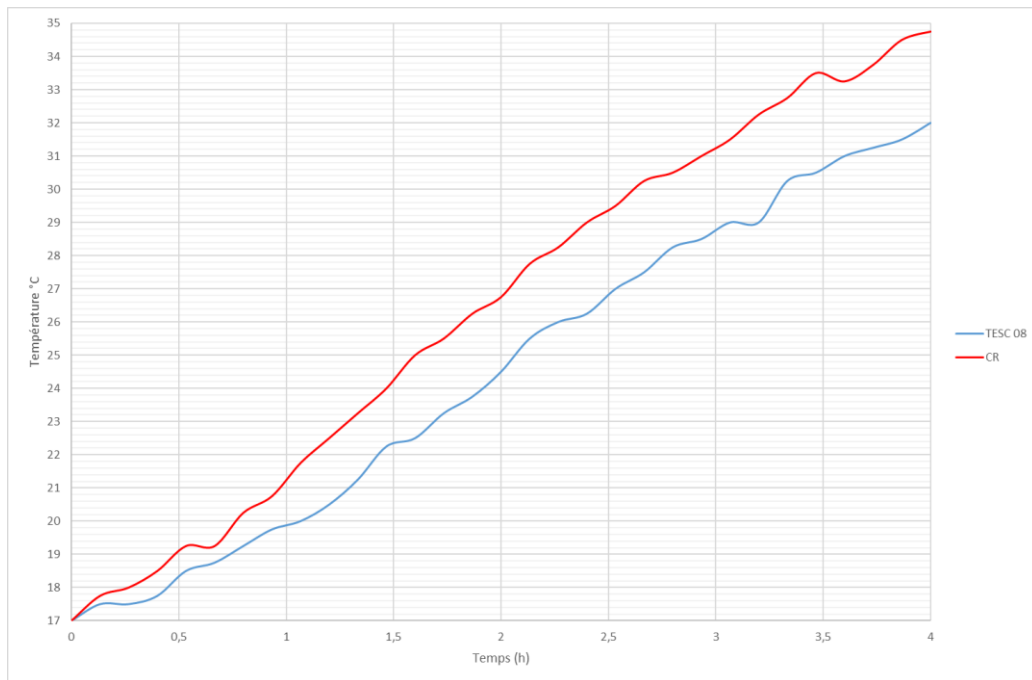


Figure 22 Évolution de la température des blocs TESC 08 et CR en fonction du temps a  $x=12$  cm

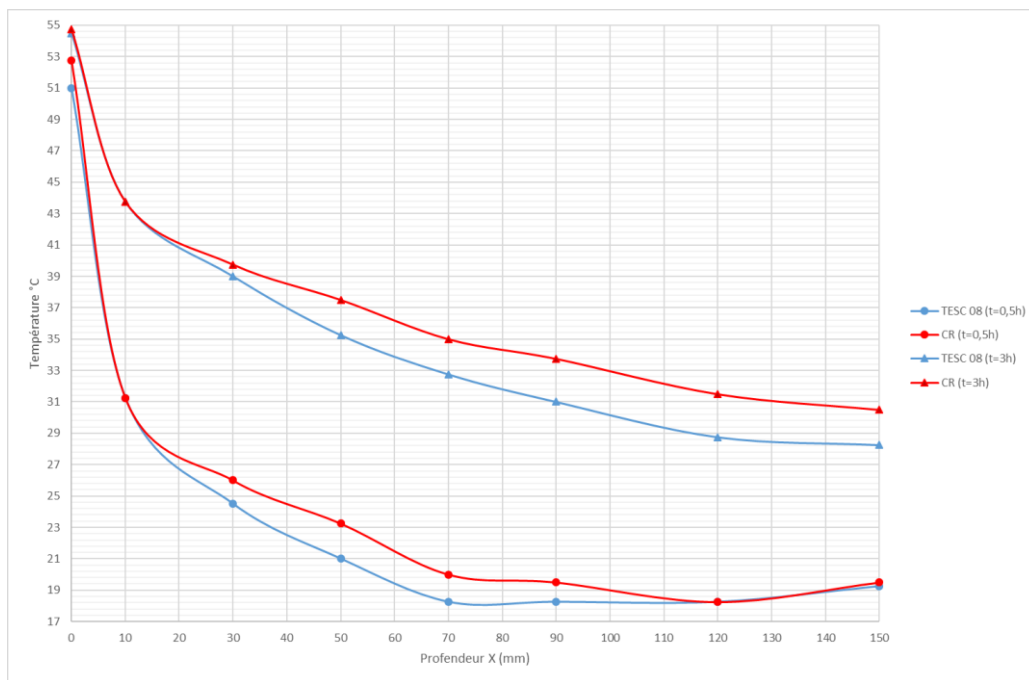


Figure 23 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 08 et CR

## Bloc TESC 10 et CR

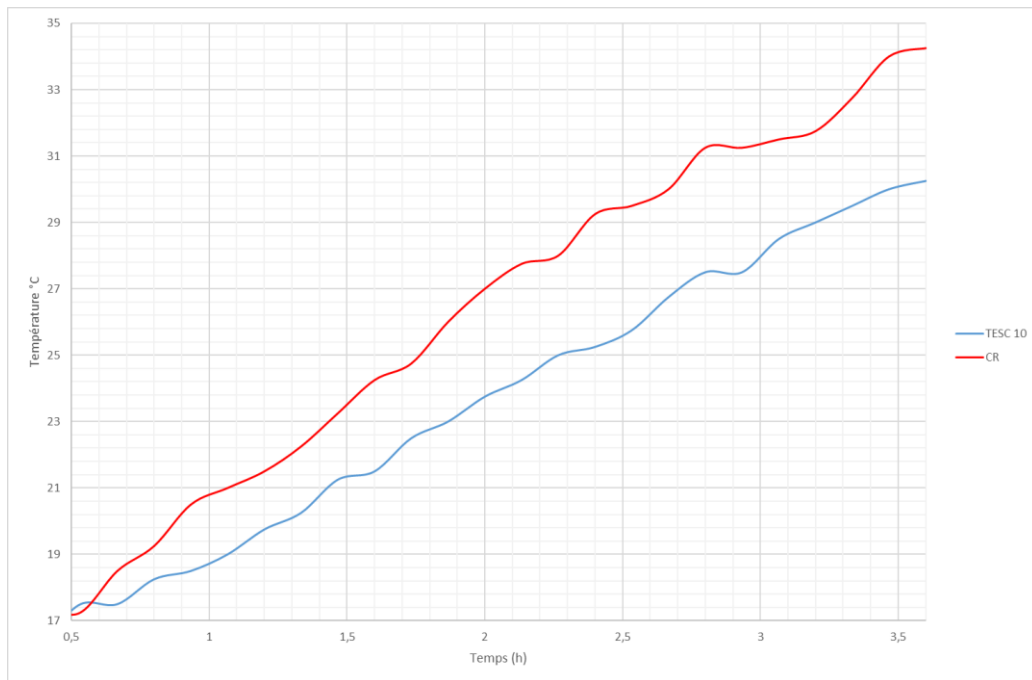


Figure 24 Évolution de la température des blocs TESC 10 et CR en fonction du temps a  $x=12$  cm

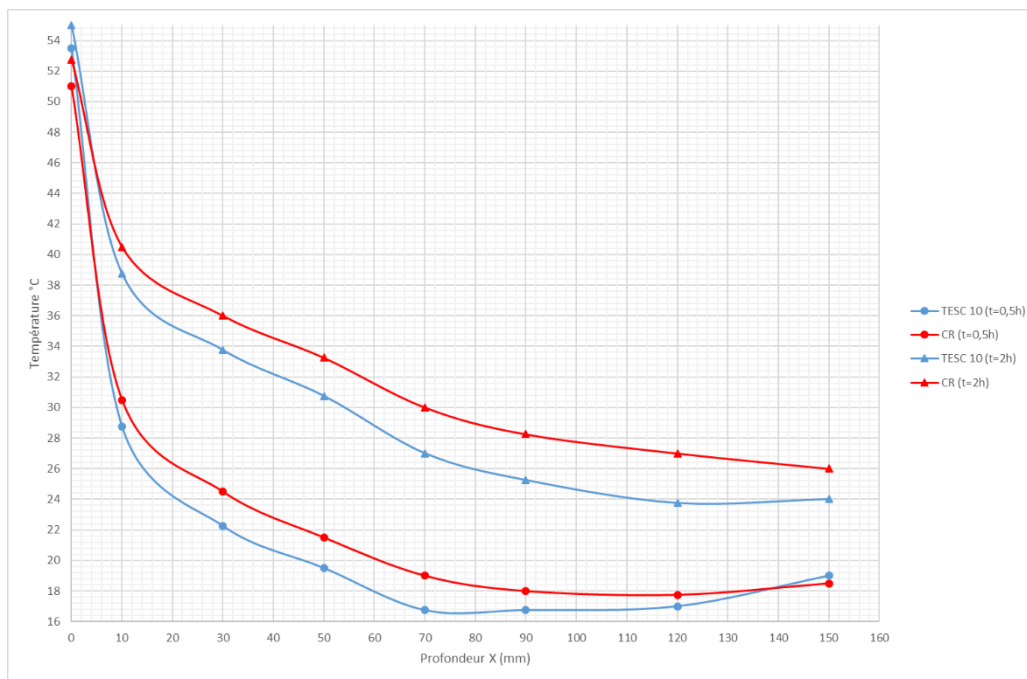


Figure 25 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 10 et CR

## Scénario 02 : Température de la plaque chaude 60 °C

### Bloc TESC 03 et CR

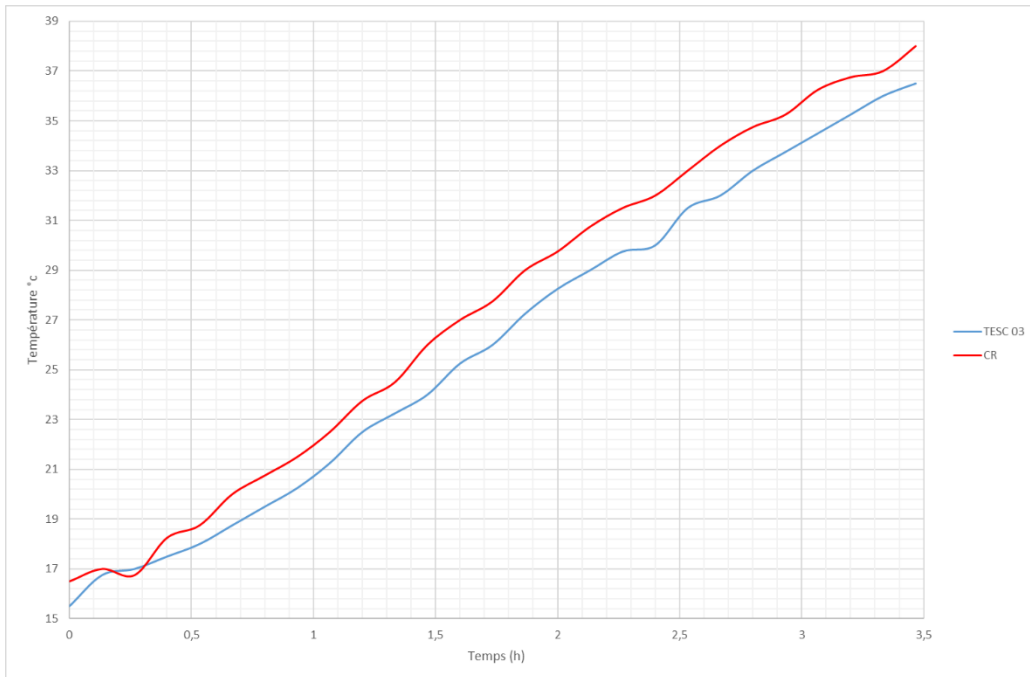


Figure 26 Évolution de la température des blocs TESC 03 et CR en fonction du temps a  $x=12$  cm

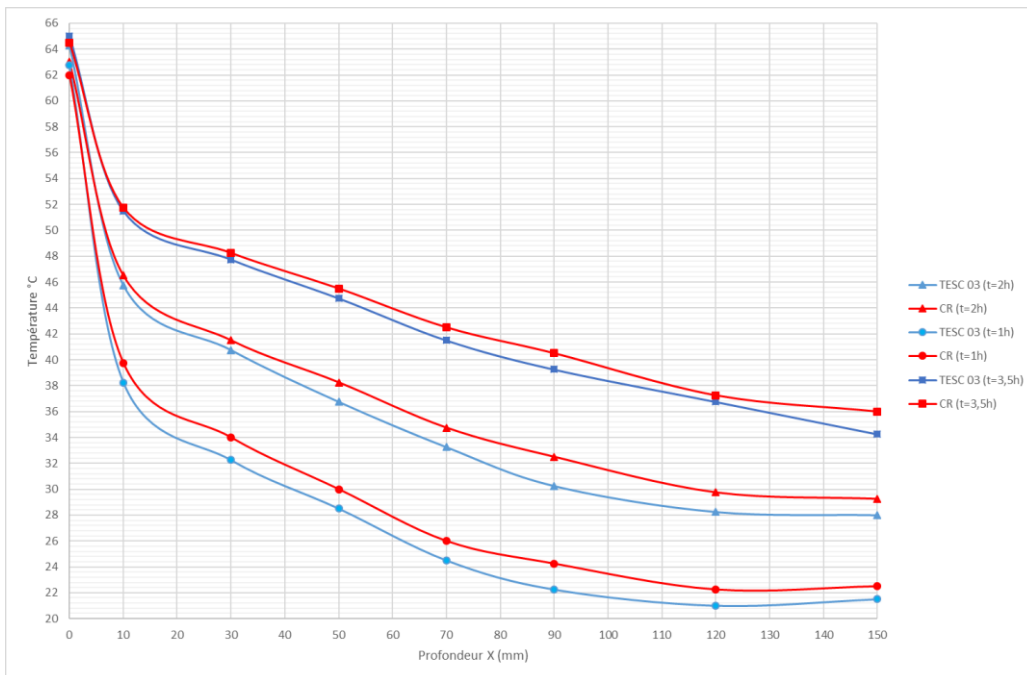


Figure 27 Évolution des températures en fonction de la profondeur  $X$  dans les blocs TESC 03 et CR

**Bloc TESC 06 et CR**

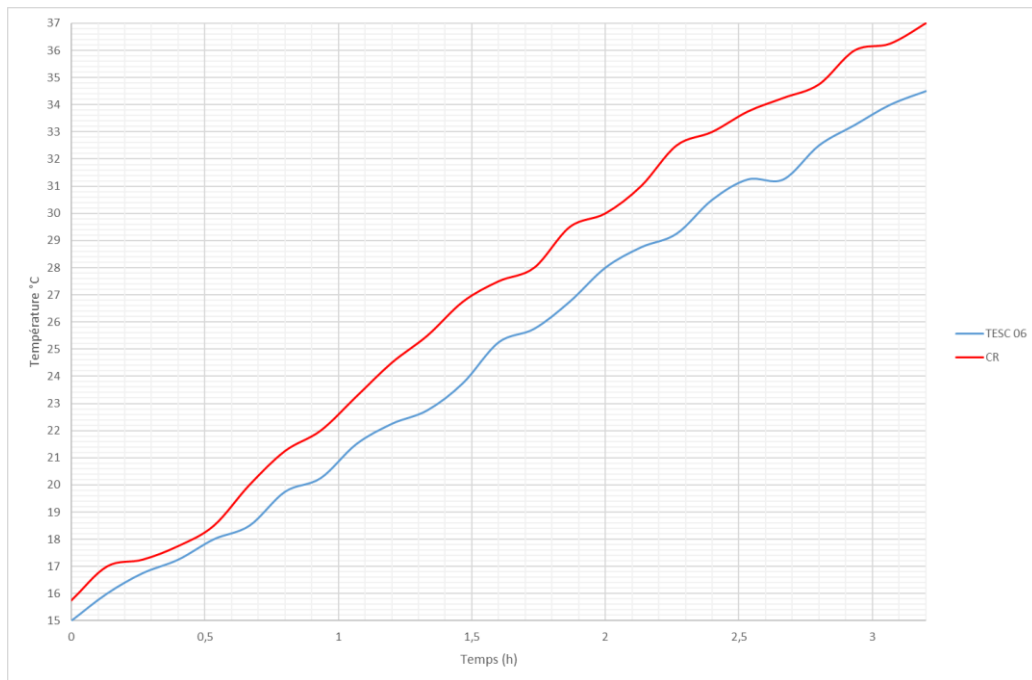


Figure 28 Évolution de la température des blocs TESC 06 et CR en fonction du temps a  $x=12\text{ cm}$

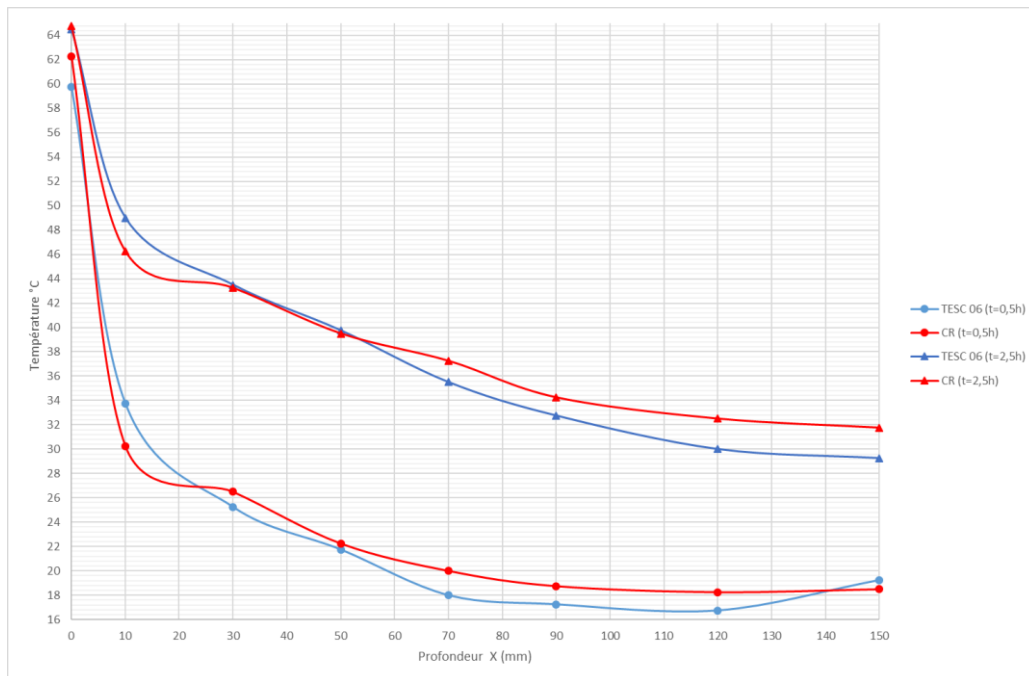


Figure 29 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 06 et CR

## Bloc TESC 08 et CR

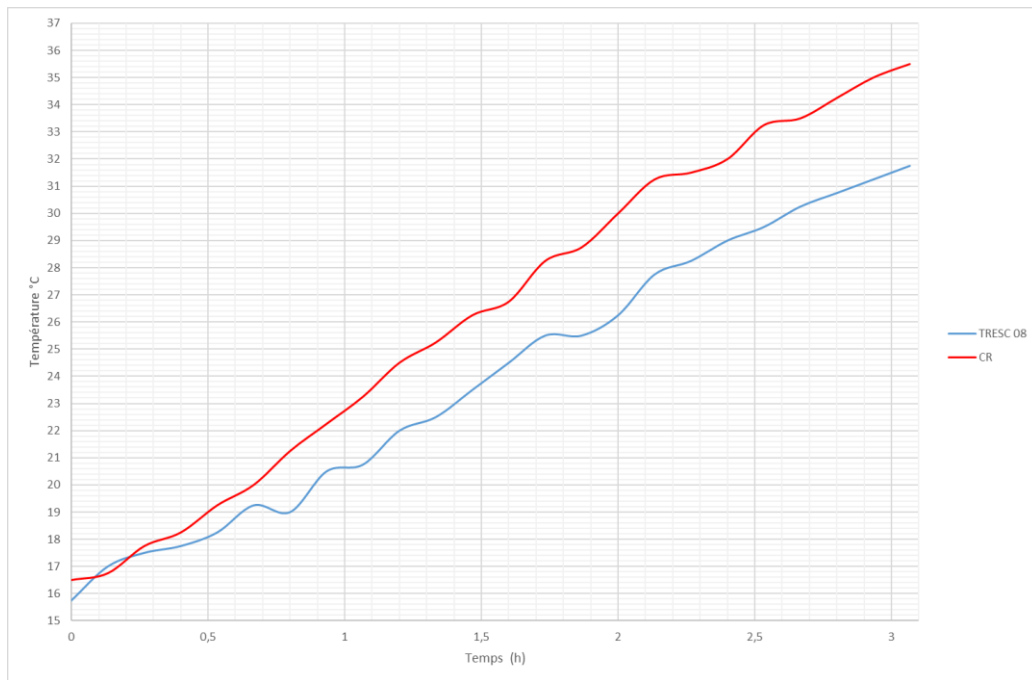


Figure 30 Évolution de la température des blocs TESC 08 et CR en fonction du temps a  $x=12$  cm

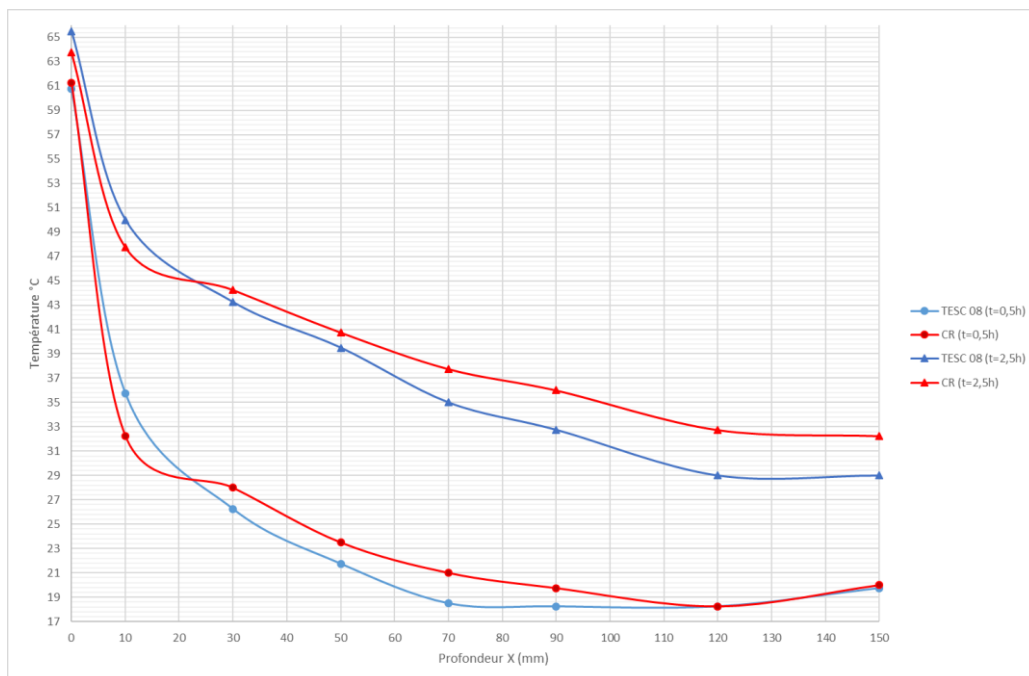


Figure 31 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 08 et CR

## Bloc TESC 10 et CR

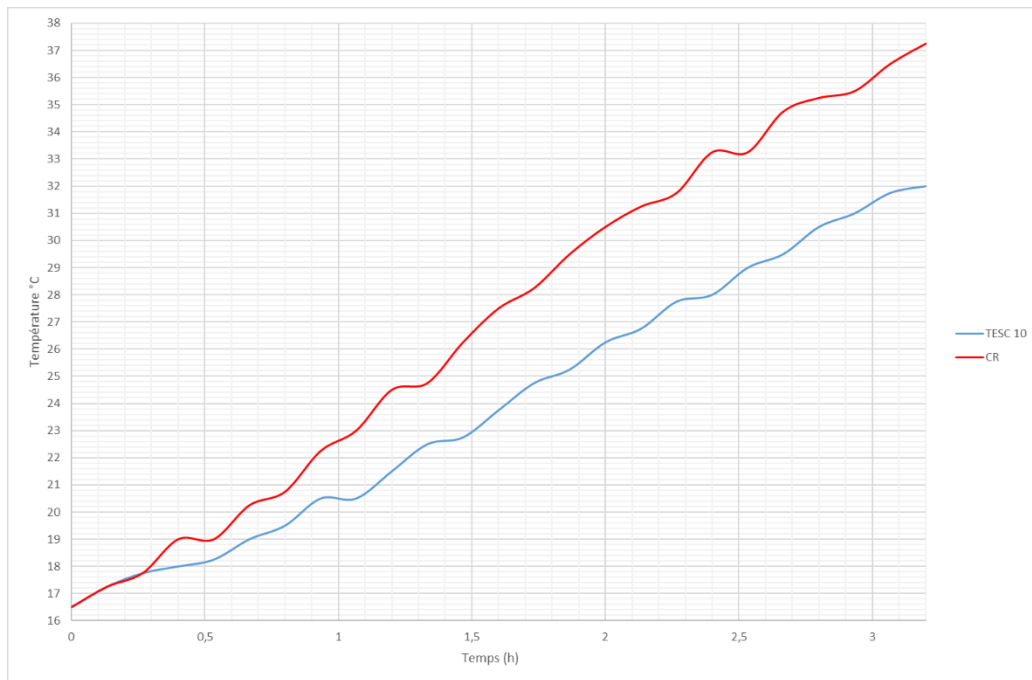


Figure 32 Évolution de la température des blocs TESC 10 et CR en fonction du temps a  $x=12$  cm

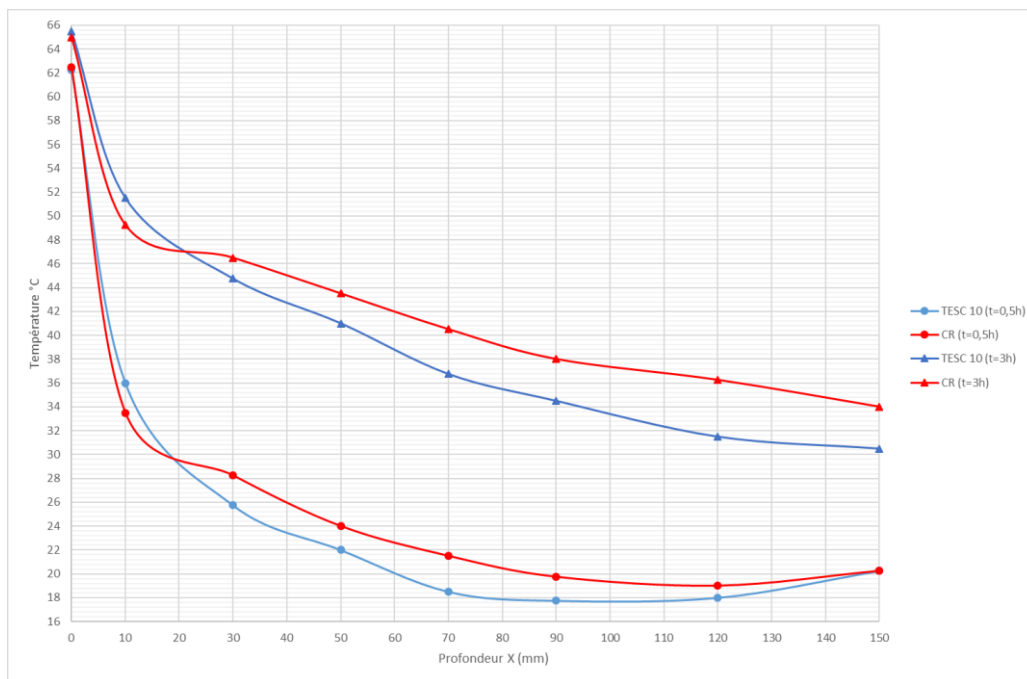


Figure 33 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 10 et CR

### Scénario 03 : Température de la plaque chaude 80 °C

#### Bloc TESC 03 et CR

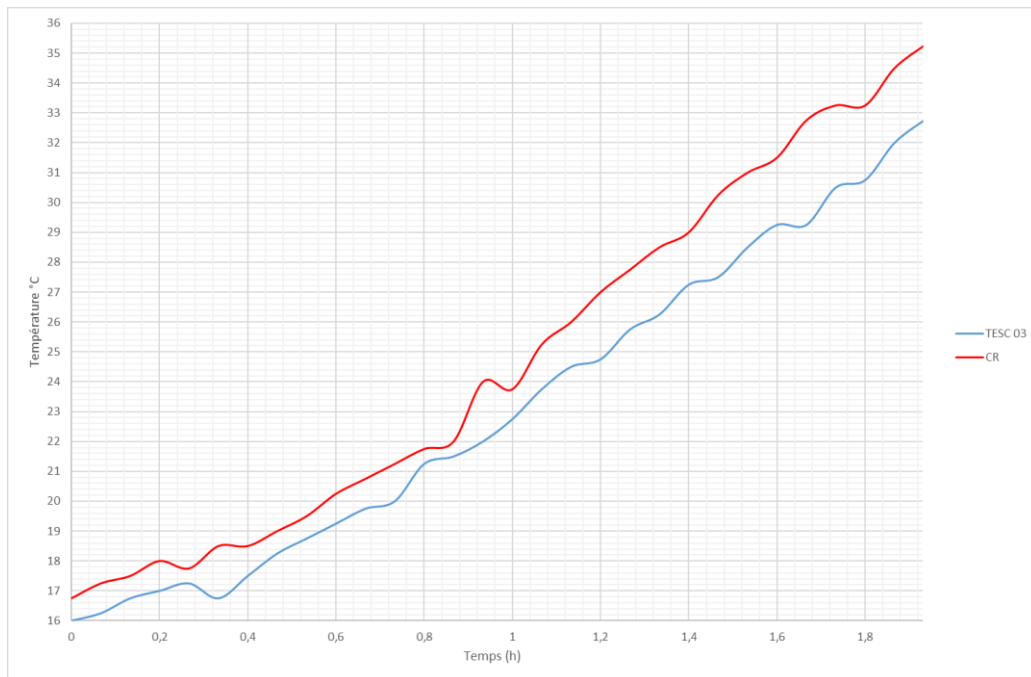


Figure 34 Évolution de la température des blocs TESC 03 et CR en fonction du temps a  $x=12$  cm

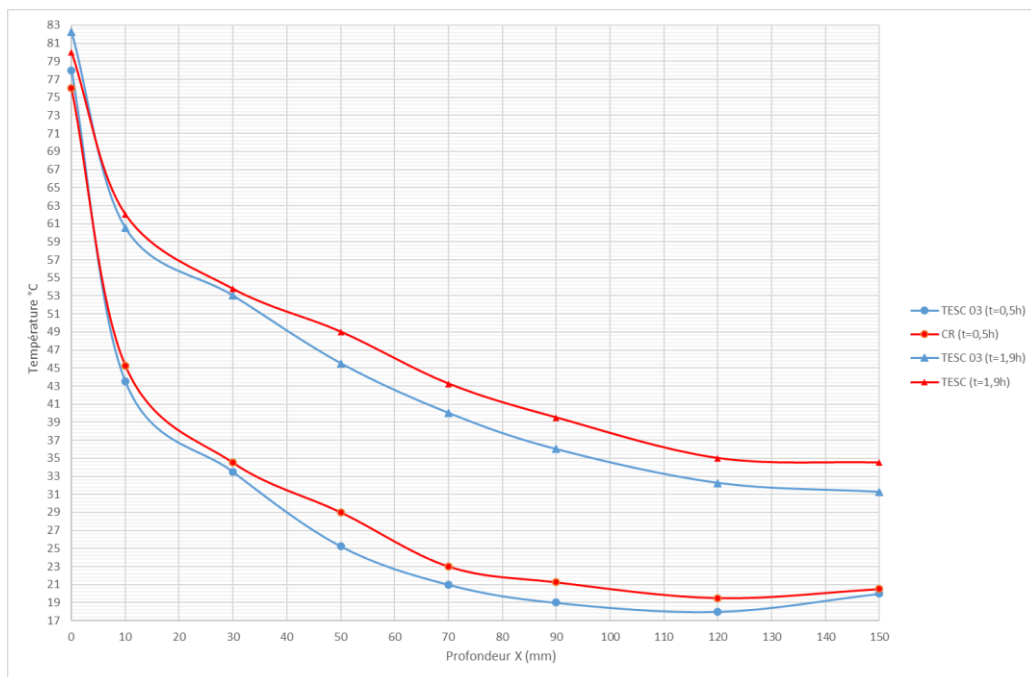


Figure 35 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 03 et CR

**Bloc TESC 06 et CR**

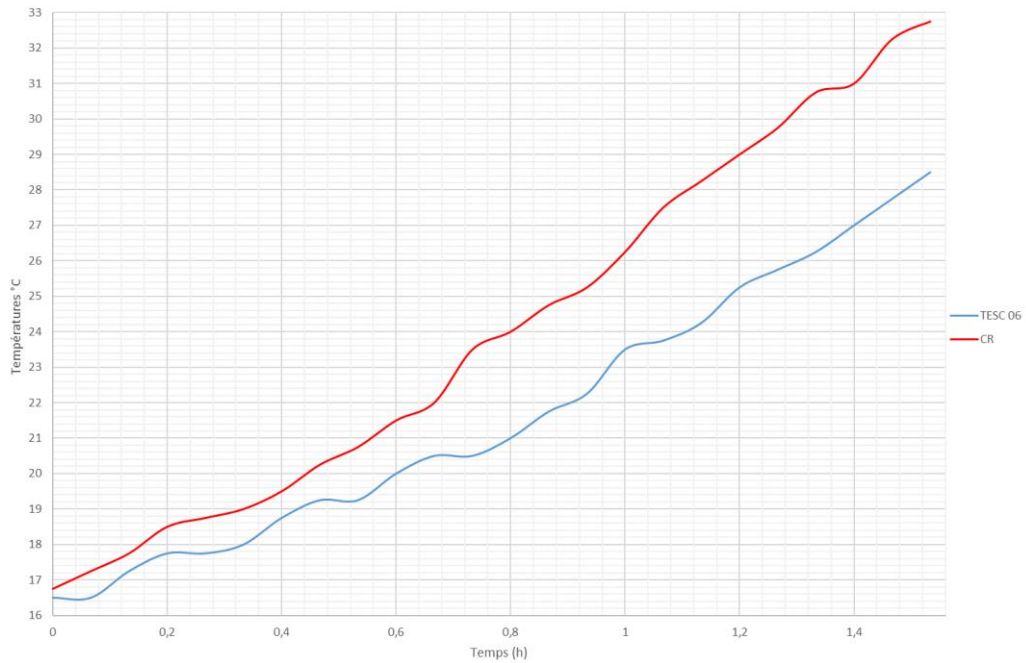


Figure 36 Évolution de la température des blocs TESC 06 et CR en fonction du temps a  $x=12$  cm

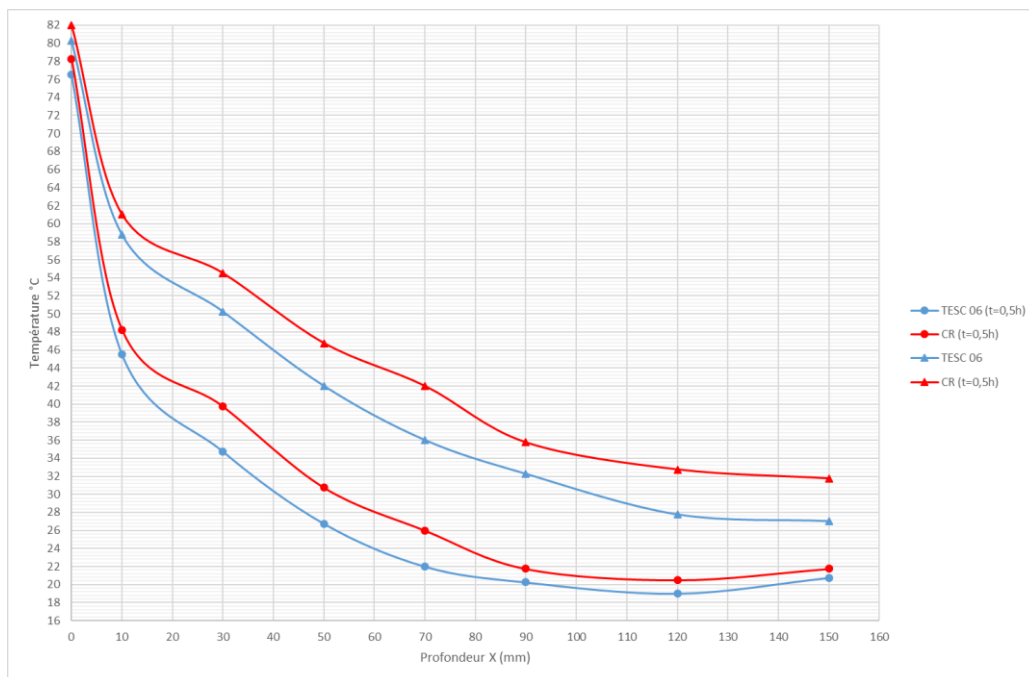


Figure 37 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 06 et CR

**Bloc TESC 08 et CR**

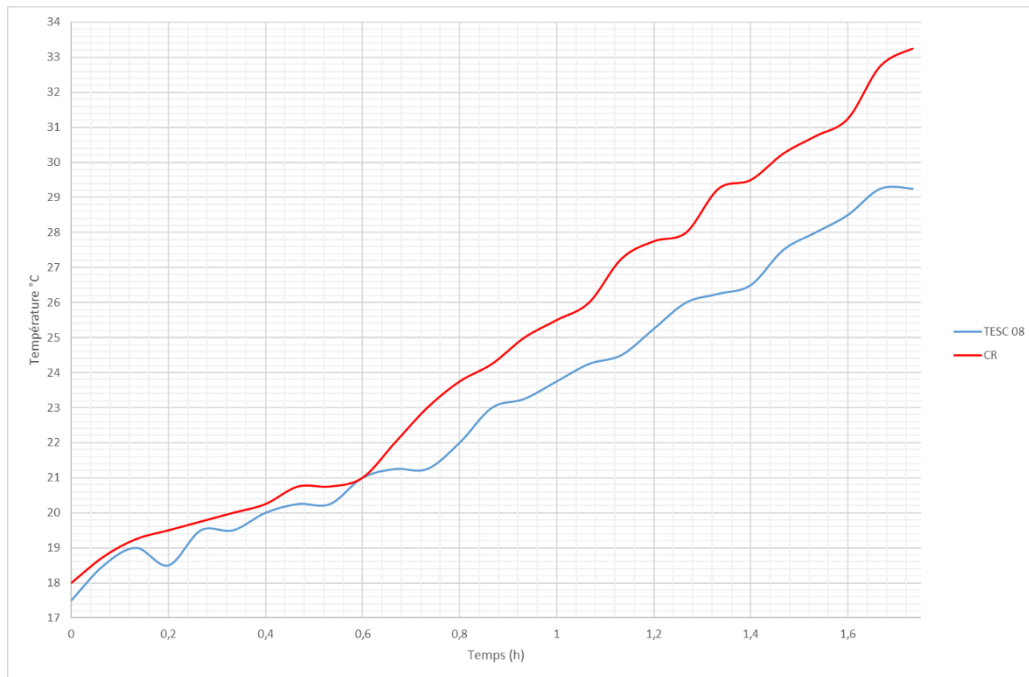


Figure 38 Évolution de la température des blocs TESC 08 et CR en fonction du temps a  $x=12$  cm

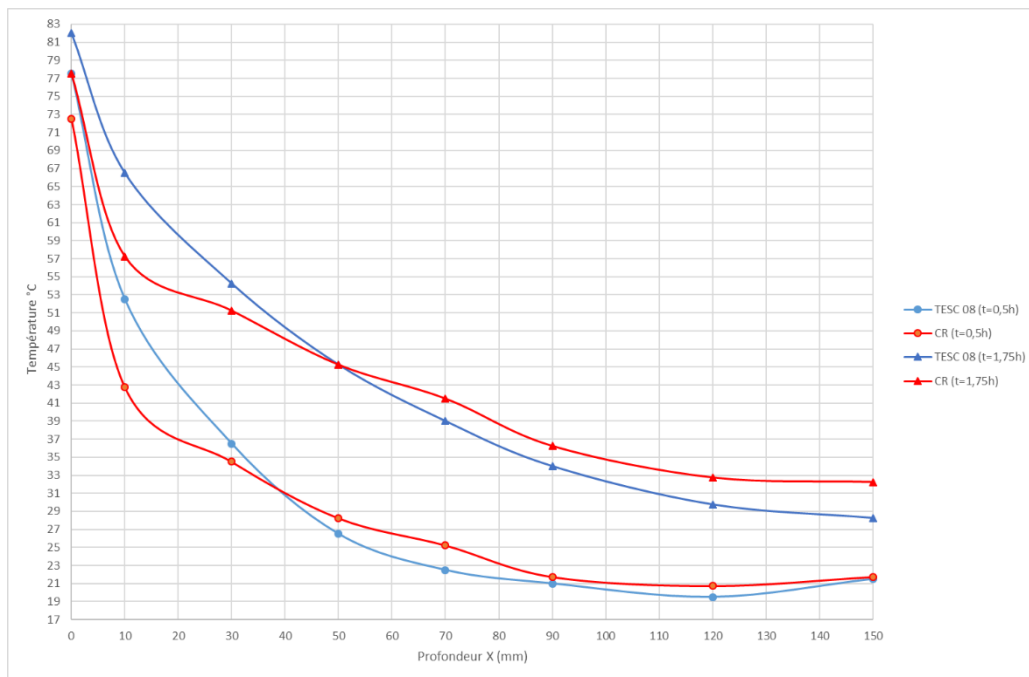


Figure 39 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 08 et CR

**Bloc TESC 10 et CR**

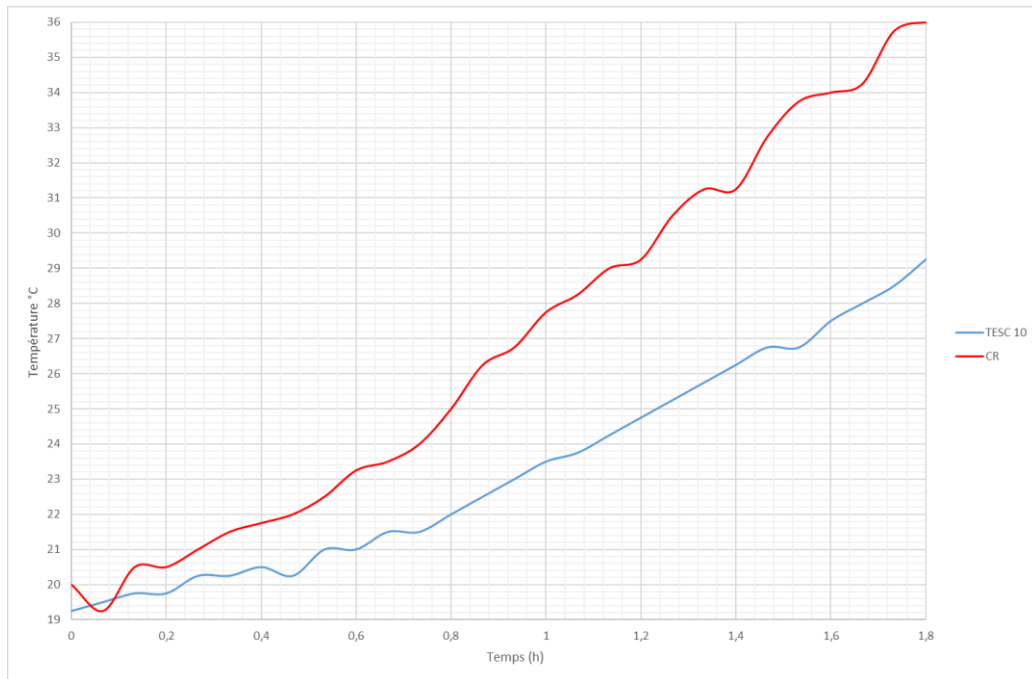


Figure 40 Évolution de la température des blocs TESC 10 et CR en fonction du temps a  $x=12\text{ cm}$

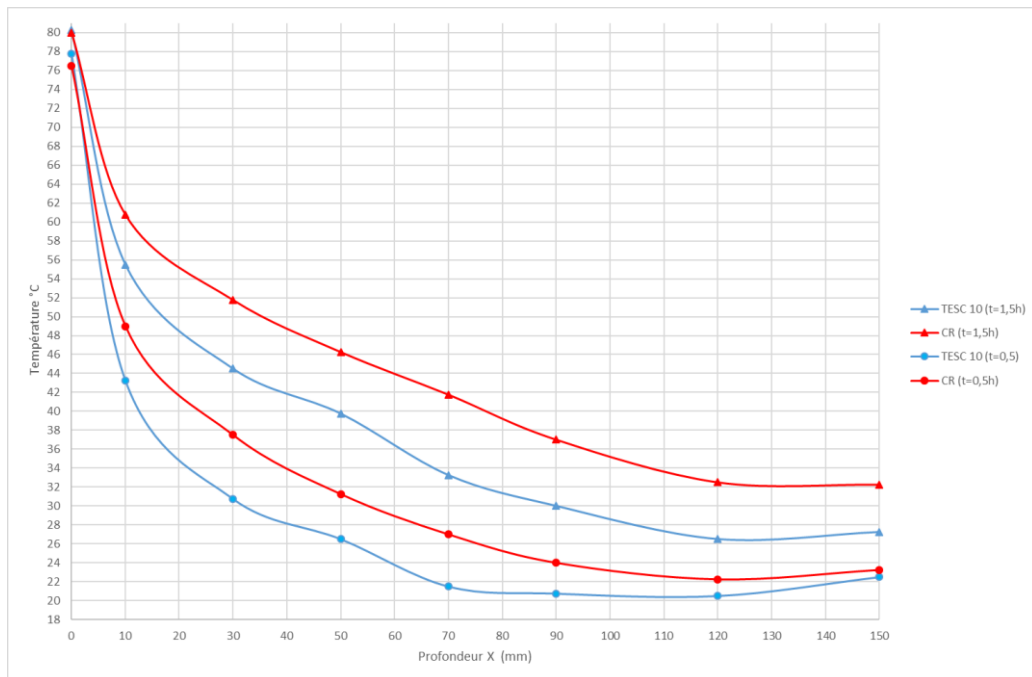


Figure 41 Évolution des températures en fonction de la profondeur X dans les blocs TESC 10 et CR

#### 4.4.1 Bloc TESC 10 et CR à 60 °C

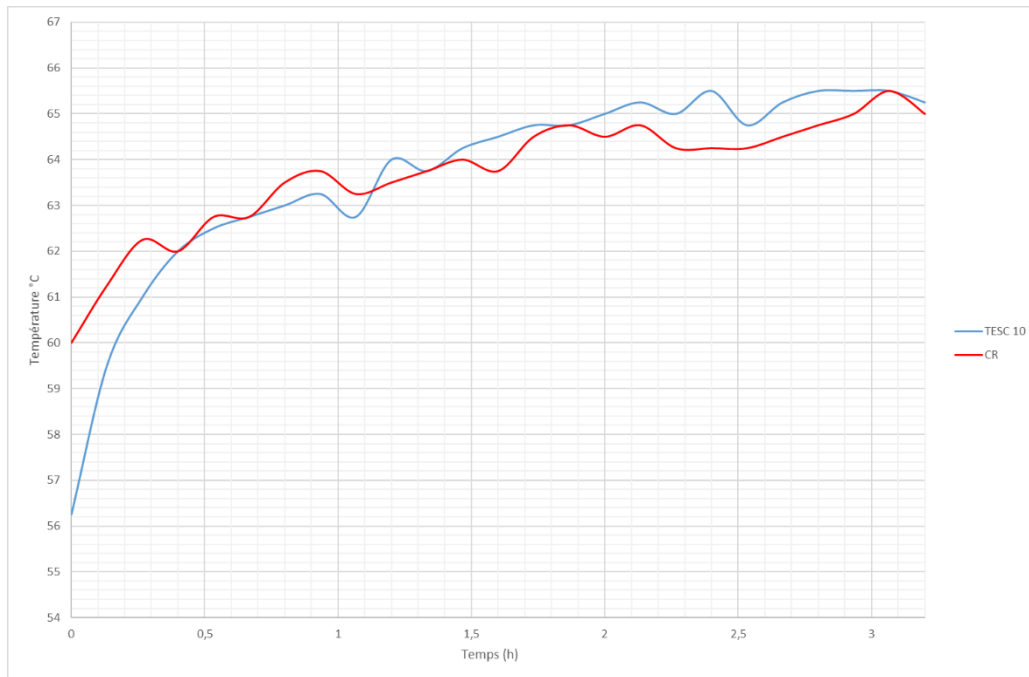


Figure 42 Évolution de la température des blocs TESC 10 et CR en fonction du temps

a  $x=0$  cm

#### 4.5 Tableau récapitulatif des paramètres caractéristiques issus de l'analyse comparative des courbes de température

Le tableau ci-après condense l'ensemble des paramètres caractéristiques extraits de l'analyse comparative des courbes de température obtenues pour les blocs TESC et le bloc témoin (CR). L'étude est menée pour quatre taux d'ajout en MCP, chacun de ces TESC étant alors comparé au témoin, à partir des deux représentations graphiques complémentaires suivantes :

1. Températures en fonction du temps – permettant de caractériser la réponse thermique dynamique des blocs.
2. Températures en fonction de l'épaisseur ( $x$ ) – relevées à un instant donné afin de décrire l'évolution du profil thermique à travers l'épaisseur du bloc.

**Ce tableau synthétise notamment :**

- La température ambiante mesurée lors des essais.
- Les écarts de température  $\Delta T$  (°C) entre blocs TESC et témoin à  $x=12$  Cm de profondeur.
- Le déphasage thermique  $\Delta t$ (min) entre les deux signaux de température à  $x=12$  Cm de profondeur.
- La différence de température initiale  $\Delta T_0$  (°C) à  $x= 0$  entre les deux blocs (au point de contact avec la paroi chauffante).

Il constitue un outil de synthèse facilitant la comparaison des comportements thermiques selon le pourcentage de TESC incorporé, en mettant en évidence l'influence de la composition des bétons sur la propagation et l'accumulation de chaleur au sein des blocs.

*Tableau 7 Tableau récapitulatif des paramètres caractéristiques issus de l'analyse comparative des courbes de température*

Bloc	Température de la plaque chauffante(°C)	Température ambiante (°C)	$\Delta T$ (°C)=T( tesc) –T(cr) Pour X=12Cm	Déphasage (min)	$\Delta T_0$ (°C)
Tesc 03	50	22,5	2	16,8	1
	60	26	1	13,32	6
	80	27,5	2	10,2	1
Tesc 06	50	24	2	30	4
	60	27	2,5	25,8	6
	80	28	4	19,2	6
Tesc 08	50	24	2,5	39,9	6
	60	26,5	3	34,5	7
	80	27	3,5	18,6	5
Tesc 10	50	25	3	50,4	1
	60	26	4	52	5
	80	27	6	36	5

#### **4.6 Analyse comparative du comportement thermique des blocs TESC et témoin CR en fonction de la teneur en MCP et de la température de chauffage.**

##### **1. Comparaison concernant l'amortissement du signal de température $\Delta T$**

Cette différence varie de 1 à 6 °C en augmentant avec la concentration en MCP et la température de chauffage.

- Pour le TESC 03, soit 3% massique de MCP sur la masse totale du bloc, les écarts restent faibles (1 à 2 °C), traduisant un effet limité du MCP à faible concentration.

- Pour les TESC 06 et 08, la différence augmente légèrement (jusqu'à 3,5 °C), indiquant une meilleure capacité de stockage thermique.

- Enfin le TESC 10 donne des écarts plus significatifs (3 à 6 °C), cet effet étant accentué par l'augmentation de la température de chauffage, ce qui confirme qu'une teneur plus élevée en MCP accentue le rôle tampon du matériau.

##### **2. Déphasage du signal de température (en minutes)**

Le déphasage correspond au retard observé entre la réponse thermique du bloc témoin et celle du bloc TESC.

- Pour le TESC 03, le retard reste modeste (10 à 16 min), ce qui est cohérent avec la faible fraction de MCP.
- Pour le TESC 06, le déphasage atteint 19 à 30 min selon la température de consigne, traduisant une inertie accrue.
- Pour le TESC 08, le décalage monte jusqu'à 40 min, ce qui montre une régulation thermique notable.
- Pour le TESC 10 enfin, on observe un retard maximal dépassant 50 min à 50–60 °C, soit une valeur trois fois plus importante que TESC 03.

L'augmentation du déphasage traduit la capacité des blocs TESC à retarder la propagation de chaleur en profondeur. Plus le pourcentage de MCP est élevé, plus le phénomène est accentué. Ce comportement est particulièrement intéressant pour les applications dans le bâtiment, car il permet de décaler les pics de chaleur et d'améliorer le confort thermique en période de forte sollicitation solaire.

### 3. Différence de température initiale à l'interface plaque chauffante/blocs de béton CR et TESC

Cette grandeur reflète l'écart de température observé entre les deux blocs TESC et béton CR sur leur surface de contact avec la plaque chauffante. Ces températures sont en effet légèrement différentes en début d'expérience. Ce qui s'explique physiquement par la différence d'effusivité thermique des deux blocs. En effet, du point de vue théorique la température de contact à l'interface de deux milieux infinis de température  $T_1$  et  $T_2$  est donnée en fonction de leur effusivité  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$

par la relation :  $T(\text{contact}) = \frac{\varepsilon_1 T_1 + \varepsilon_2 T_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$  Comme l'effusivité du TESC est plus faible,

sa température est initialement plus basse.

- Pour TESC 03, les écarts sont faibles (1–2 °C).
- Pour TESC 06 et TESC 08, la différence s'élève à 5–7 °C.
- Pour TESC 10, la différence reste relativement élevée (jusqu'à 6 °C).

En conclusion, il faut retenir deux résultats essentiels de nos expériences :

Les températures mesurées dans le bloc de béton contenant le matériau à changement de phase sont toujours inférieures à celle du béton classique. Cet écart est perceptible initialement sur la paroi qui reçoit la chaleur puis se propage progressivement dans la profondeur du bloc avec une augmentation de l'écart entre les deux températures. Cet effet d'amortissement du signal de température est probablement une conséquence de l'augmentation de l'inertie thermique par la chaleur latente du MCP.

Le déphasage que l'on peut observer entre les deux signaux de température est aussi important comme paramètre thermique. Il augmente lui aussi avec la quantité de MCP ajoutée au béton. Une bonne partie de l'énergie arrivant par la face chauffée est absorbée sous forme de chaleur latente avant de se propager. Ainsi, les blocs TESC, notamment les TESC 08 et 10, agissent comme des tampons thermiques efficaces.

Ces expériences illustrent de manière concrète le rôle des matériaux à changement de phase ajoutés dans les bétons : **retarder** la diffusion de la chaleur ; c'est l'effet de déphasage, et **amortir** la montée en température qui est due à l'augmentation de l'inertie thermique du composé due à la chaleur latente de changement de phase. Plus la teneur en MCP est élevée, plus ces effets sont

remarquables, et ce d'autant plus que le bloc est soumis à de plus hautes températures, dans l'intervalle des valeurs étudié.

Dans le chapitre qui suit, nous allons mesurer la conductivité des TESC et béton CR pour évaluer les effusivités et diffusivité de ces matériaux, et mettre en relation ces caractéristiques avec le comportement des blocs.

# Chapitre 5 Conductivité thermique

## 5.1 Introduction

La conductivité thermique est une propriété essentielle pour évaluer la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur. Dans le secteur du bâtiment, cette caractéristique influence fortement la performance énergétique des structures, en particulier leur capacité à assurer une isolation thermique efficace et stable.

Dans le cadre de ce travail, une étude expérimentale a été menée sur cinq formulations de béton. Un béton témoin, basé sur la méthode de formulation Dreux-Gorisse, sert de référence. Les quatre autres formulations intègrent un matériau à changement de phase (MCP) : de l'huile de coprah emprisonnée dans une matrice minérale poreuse, la sépiolite.

Ce chapitre est consacré à la caractérisation de la conductivité thermique de ces cinq types de béton. Il détaille le protocole expérimental mis en place pour la mesure, les équipements utilisés, les conditions de réalisation des essais, ainsi que la méthode d'analyse adoptée. L'objectif est de comparer les performances thermiques de ces matériaux afin d'évaluer l'effet de l'incorporation du MCP sur la conductivité thermique du béton.

## 5.2 Méthodologie de mesure de la conductivité thermique

### 5.2.1 Principe de la méthode utilisée

La conductivité thermique des matériaux peut être déterminée à partir de leur résistance thermique, en mesurant le flux de chaleur traversant un échantillon soumis à un gradient de température stable. Dans ce travail, la méthode adoptée repose sur une mesure indirecte à l'aide d'un appareil de type CT-mètre, associé à un fluxmètre pour contourner les limitations techniques liées aux propriétés thermiques du béton.

### 5.2.2 Dispositif expérimental

L'appareil principal utilisé pour la caractérisation est le CT-mètre Hilton H112, un banc didactique conçu pour la mesure de la résistance thermique de matériaux plans. Cet appareil fonctionne selon le principe de la garde chaude : une plaque chaude applique une température constante sur une face de l'échantillon, pendant

qu'une plaque froide maintient l'autre face à une température plus basse. Le flux thermique traversant l'échantillon est lu sur un cadran du ct-mètre après avoir attendu l'établissement du régime thermique. A partir d'une relation donnée par le constructeur, la conductivité est alors déduite en utilisant la valeur du gradient de température imposé aux bords de l'échantillon.

Cependant, le CT-mètre Hilton H112, disponible au sein du laboratoire du LMSE, est limité à des matériaux ayant une faible conductivité thermique, correspondant à une résistance  $R = e/\lambda$  comprise entre 0,1 et 1,4  $m^2 \cdot K/W$ . Cela le rend inadapté à la mesure de la conductivité de nos échantillons, qui nécessiterait alors une épaisseur d'au moins 13 cm pour le respect de cette consigne alors que l'appareil n'en autorise que 5,8 cm (estimation faite de l'épaisseur pour la conductivité du béton comprise entre 1,3 et 1,7  $W/m K$ ).



*Figure 43 Dispositif expérimental*

### **5.2.3 Adaptation du dispositif : ajout d'un fluxmètre**

Pour utiliser le CT-mètre et contourner la limitation de validité des mesures, une solution pratique a été mise en place. Dans cette nouvelle configuration, un fluxmètre est intégré au CT-mètre entre la plaque froide et l'échantillon.

Ce capteur permet de mesurer le flux thermique traversant le matériau, indépendamment de son épaisseur. L'isolation des surfaces latérales, dont la dimension devient conséquente lorsque l'épaisseur de l'échantillon est importante, est renforcée par des bandes de polystyrène collées sur tout le pourtour de l'échantillon. Les données issues du fluxmètre sont enregistrées à l'aide d'un système d'acquisition Picolog, connecté à un ordinateur, ce qui permet de suivre en temps réel l'évolution du flux de chaleur au cours de l'expérience et repérer le moment où le régime établi est atteint.

Les échantillons TESC et CR utilisés sont des plaques de surface 30 x 30 cm<sup>2</sup>, égale à la surface des plaques du CT-mètre, et une épaisseur d'environ 6 cm, limitée par la fermeture du boîtier. Afin d'obtenir des faces planes, les plaques ont été soigneusement lissées à l'aide d'une ponceuse électrique et au papier abrasif, en commençant par le plus grossier le P40, puis P60, P80 et enfin le plus fin le P120. Notons que malgré ces précautions, la platitude des surfaces souhaitée n'a pas été totalement atteinte, surtout pour les TESC.

Ce défaut est en partie compensé par des feuilles en caoutchouc fourni par le concepteur qui viennent se placer entre les plaques et les deux faces de l'échantillon. Cela permet de corriger les irrégularités de surface, de renforcer le contact thermique échantillon-plaque en chassant l'air résiduel et de réduire au minimum les résistances de contact.

Nous avons ajouté au dispositif initial un fluxmètre positionné entre la plaque froide et la feuille de caoutchouc ainsi que deux thermocouples, que nous avons insérés de part et d'autre de l'échantillon pour mesurer directement la différence de température entre les deux faces de l'échantillon. La conductivité thermique  $\lambda$  de l'échantillon est ensuite déterminée à partir de la loi de Fourier :

$$\lambda = \frac{q \cdot e}{\Delta T}$$

Où  $q$  est le flux thermique ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $e$  l'épaisseur de l'échantillon (m) et  $\Delta T$  la différence de température mesurée entre les deux faces du matériau (K).



*Figure 44 Association du CT-mètre et du fluxmètre dans l'installation expérimentale*



*Figure 45 Mise en place de la plaque en caoutchouc et raccordement des thermocouples au CT-mètre*



*Figure 46 Mise en place d'une plaque pour la mesure de la conductivité avec le CT-mètre Hilton 112 et acquisition des données avec le PicoLog.*

#### **5.2.4 Conditions de mesure**

Le CT-mètre est composé de deux plaques ; l'une est chaude, maintenue à un niveau de température assuré par un système de chauffage par des résistances électriques insérées à l'intérieur de la plaque en acier, et régulé par l'intermédiaire d'un PID (proportionnel- intégral- dérivé) ; l'autre plaque est froide.

Elle est maintenue à une température basse par l'intermédiaire d'un circuit de refroidissement dans lequel circule de l'eau glycolée, réfrigérée par un système externe. Pour une fiabilité des résultats, le constructeur recommande de choisir des températures pour les plaques de manière à assurer une différence comprise entre 15 à 20°C. D'autre part, les conditions stationnaires doivent être atteintes avant tout relevé de mesures, c'est-à-dire qu'il faut toujours attendre que le régime de conduction thermique soit établi, ce qui est le cas à partir du moment où le flux de chaleur relevé devient constant.

### 5.3 Résultats de mesure

Avant toutes mesures, le **fluxmètre** ajouté au CT-mètre, de marque Captec, est étalonné de nouveau pour tenir compte des phénomènes qui auraient altéré son état et donc ses caractéristiques initiales.

Ce fluxmètre est une plaque mince en cuivre, très bonne conductrice, de forme carrée de 10 Cm de côté, qui convertit un flux thermique surfacique  $q$  ( $W \cdot m^{-2}$ ) en tension électrique  $V$  ( $\mu V$ ) grâce à une thermopile intégrée exploitant l'effet Seebeck. Le flux thermique est ensuite déduit de la tension lue sur le capteur en fonction de la sensibilité  $S$  par la relation :

$$q = \frac{V}{S}$$

Le constructeur indique une sensibilité nominale  $S=26,9 \mu V/(W \cdot m^{-2})$ . Cependant, au fil du temps et de l'utilisation, des dépôts de graisse, de salissures ainsi que des phénomènes de corrosion qui peuvent se former à la surface du capteur, modifient la conductivité de contact et entraînent une dérive de la sensibilité.

L'opération de **réétalonnage** s'est fait en utilisant deux plaques, l'une en polystyrène et l'autre en polyuréthane, donc des matériaux isolants, fournies par le fabricant du ct-mètre. A partir des valeurs de leur conductivité thermique connues (respectivement à 0,038 et 0,031 W/m.K ), valeurs que nous avons contrôlées au préalable par des mesures au CT-mètre, nous avons estimé la sensibilité corrigée nommée  $S'$  selon :

$$S' = \frac{V}{q} = \frac{V}{(\lambda/e)\Delta T}$$

$V$  est la mesure de la DDP relevée sur le capteur CAPTEC et  $\Delta T$  est la différence de température entre les deux faces des échantillons mesurée par des thermocouples placés à cet. Une fois  $S'$  déterminé, la conductivité thermique  $\lambda$  des blocs peut être calculée à partir des mesures selon la relation :

$$\lambda = \frac{e}{\Delta T} \cdot \frac{V}{S'}$$

Les tensions  $V$  ont été relevées directement sur le graphique fourni par l'application **PicoLog**, connectée au système d'acquisition. Le graphe obtenu est présenté ci-après afin d'illustrer l'évolution au cours du temps de la tension.

Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 8 Réétalonnage expérimental de la sensibilité du fluxmètre

Matériaux	Tension V (μV)	ΔT	λ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	S' (μV/W·m <sup>-2</sup> )
Polystyrène	566	17,2	0,0382	19,38
Polyuréthane	505	17,4	0,0310	19,66

Par suite la nouvelle valeur de la sensibilité du capteur sera prise comme la moyenne des deux valeurs de S', 19,38 μV/W·m<sup>-2</sup> pour le polystyrène et 19,66 μV/W·m<sup>-2</sup> pour le polyuréthane, soit **19,52** μV/W·m<sup>-2</sup>. C'est cette dernière valeur qui sera utilisée pour la mesure des conductivités thermiques des échantillons de béton et TESC.

Ces valeurs sont rapportées dans le tableau récapitulatif ci-dessous ainsi que l'ensemble des paramètres associés, à savoir le flux, le gradient de température (ΔT), l'épaisseur de la plaque, l'effusivité et la diffusivité des échantillons.

Tableau 9 Résultats expérimentaux de la mesure de la conductivité

Echantillon	ΔT	e(mm)	Le flux mV	λ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	ε (kJ /m <sup>2</sup> K s <sup>1/2</sup> )	ax10 <sup>6</sup> (m <sup>2</sup> /s)
CR	4,8	52	2,469	1,37	1,912	0,512
TESC 03	4,8	38	2,2	0,87	1,416	0,377
TESC 06	9	59	4,11	0,82	1,339	0,373
TESC 08	7	44	1,797	0,69	1,215	0,322
TESC 10	11,7	60	3,61	0,62	1,129	0,301

Le temps nécessaire pour atteindre le régime établi, est estimé au moyen d'une relation déduite de l'équation de la diffusion thermique en régime instationnaire :

$$t = 3 \cdot \frac{e^2}{a}$$

Où  $e$  représente l'épaisseur de la plaque et  $a$  la diffusivité thermique du matériau. 3 est un facteur de sécurité introduit pour assurer une marge de stabilité suffisante. Une autre manière d'observer l'établissement du régime stationnaire est possible à partir du graphe fourni par le picolog. Dans le cas par exemple de la plaque de béton de 51,94 mm d'épaisseur, le graphe indique un temps d'environ 2,5 heures, tandis que la relation estime ce temps à 8200 s, soit 2,27 h. Ce qui confirme la validité relative de l'estimation théorique.

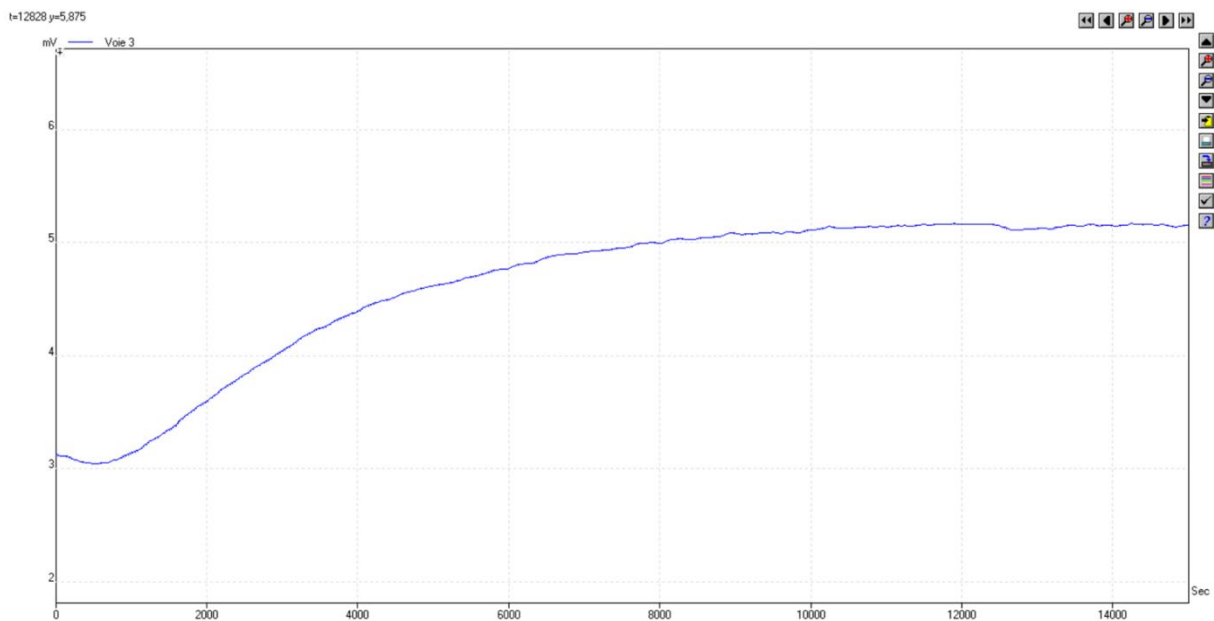


Figure 47 Évolution de la tension issue du fluxmètre (mV) en fonction du temps (s) — vérification du régime stationnaire (béton,  $e = 51,94$  mm).

### 5.3.1 Modèle de détermination théorique de la conductivité thermique de matériaux composites

L'intégration du fluxmètre dans un appareil initialement non conçu pour la mesure de la conductivité thermique de matériaux non isolants constitue une adaptation expérimentale.

A ce titre, la fiabilité de telles mesures doit être vérifiée. Les résultats trouvés ont une marge d'incertitude que nous n'avons pu estimer car dépendant de trop nombreux paramètres comme la fidélité du fluxmètre, les pertes thermiques latérales, qui peuvent être très importantes lorsque les parois concernées ont une surface de taille comparable à la surface de base de l'échantillon, et l'importance des résistances thermiques de contact dues à des surfaces pas vraiment planes.

Pour approcher les valeurs de la conductivité thermique des bétons ensemencés de sépiolite saturée en huile, nous avons utilisé un modèle de calcul basé sur l'hypothèse que ce composite est formé d'une combinaison de deux résistances thermiques, la première due au béton et la seconde à la sépiolite.

Nous supposons que ces résistances sont placées en parallèle dans une première configuration et en série dans une seconde hypothèse. La résistance thermique globale sera alors calculée comme la moyenne de ces deux résistances, correspondant à une configuration combinant ces deux modes d'association.

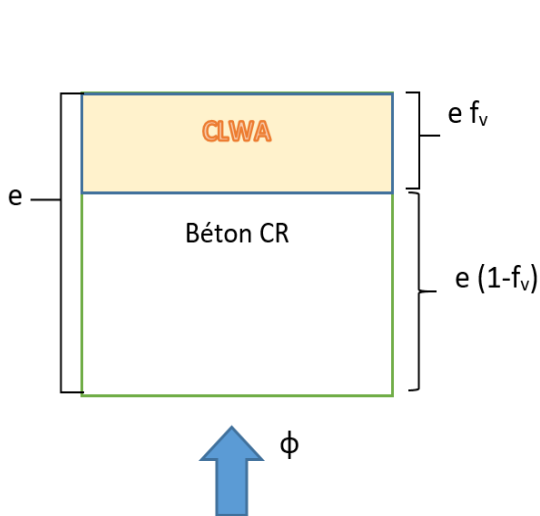


Figure 48 Résistances en série

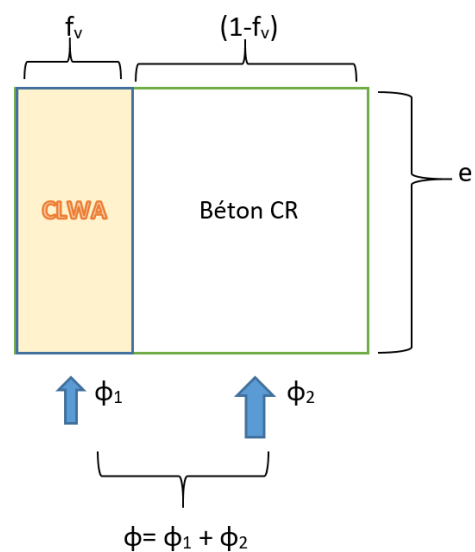


Figure 49 Résistances en parallèle

### Formule de calcul de la résistance série

$$R_{série} = R_{th_{CR}} + R_{th_{CLWA}} = \left( \frac{e_{CR}}{\lambda_{CR}} \right) + \left( \frac{e_{CLWA}}{\lambda_{CLWA}} \right) = \left[ \frac{(1-f_v)}{\lambda_{CR}} + \frac{f_v}{\lambda_{CLWA}} \right] e$$

### Formule de calcul de la résistance parallèle

$$\phi = \phi_{CR} + \phi_{CLWA} = \lambda_{CR} \cdot \Delta T \cdot (1-f_v) + \lambda_{CLWA} \cdot \Delta T \cdot f_v$$

$$\text{D'où : } R_{parallèle} = \frac{\phi}{\Delta T} = \frac{e}{\lambda_{CR}(1-f_v) + \lambda_{CLWA}f_v}$$

La résistance thermique R sera calculée comme :  $R = R_{série} + R_{parallèle}$

Et la conductivité du TESC donnée par la relation :  $\lambda = \frac{e}{R}$

Tableau 10 Conductivités thermiques théoriques des TESC avec MCP a l'état liquide et solide

BLOC	e (m)	f <sub>v</sub>	$\lambda$ (liquide) (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (solide) (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$\varepsilon$ (kJ /m <sup>2</sup> K s <sup>1/2</sup> )	ax10 <sup>6</sup> (m <sup>2</sup> /s)	
CR	0,052	0	/	/	1,912	0,512	
TESC 03	0,038	0,086	1,28	1,357	liquide :	1,763	0,527
					solide :	1,769	0,589
TESC 06	0,059	0,180	1,20	1,311	liquide :	1,667	0,518
					solide :	1,698	0,596
TESC 08	0,044	0,220	1,17	1,294	liquide :	1,624	0,519
					solide :	1,664	0,605
TESC 10	0,060	0,260	1,15	1,287	liquide :	1,578	0,531
					solide :	1,627	0,626

**Remarque :**

On peut constater que les valeurs expérimentales de la conductivité sont plus faibles, puis relativement éloignées des valeurs qui sont calculées par le modèle théorique.

C'est pourquoi, il faudrait reprendre les mesures de ce paramètre si important dans de telles problèmes pour pouvoir analyser correctement les courbes de température par rapport à ces valeurs et en étudier l'influence de l'effusivité et de la diffusivité thermique.

Si ces paramètres varient de 5 à 6 % en passant des échantillons de béton ensemencés à celui du béton classique, ces différences atteignent 15% pour le modèle théorique.

## Chapitre 6 Simulation numérique

### 6.1 Introduction

Dans le cadre de cette étude, une simulation numérique du comportement thermique du bloc en béton incorporant un matériau à changement de phase (MCP) est réalisée en parallèle de l'étude expérimentale.

Cette simulation est effectuée dans les conditions de température de l'expérience menée en laboratoire, et pour une durée de chauffage de **10 800 secondes (3 heures)**.

Deux blocs sont comparés dans ces simulations :

- Le bloc de référence en béton classique (CR),
- Le bloc composite intégrant le maximum de MCP, le TESC 10, contenant de l'huile de coprah dans une proportion de 10 % du poids total de l'échantillon dans la matrice cimentaire.

Les logiciels **Gambit** (préparation du maillage) et **Fluent 6.3.26** (résolution des équations de transfert thermique) ont été utilisés. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes de distribution de température et comparés directement aux résultats expérimentaux.

Cette comparaison permettra de tester la validité de la modélisation et de mieux comprendre l'effet du MCP sur l'inertie thermique du matériau.

### 6.2 Préparation du modèle géométrique

#### 6.2.1 Simplification et hypothèses géométriques adoptées

Afin de réduire la complexité du modèle, les hypothèses suivantes ont été adoptées :

- Matériaux supposés homogènes et isotropes.
- Représentation en 2D.
- Répartition uniforme du MCP dans les pores du béton.
- Pertes thermiques limitées aux échanges de convection sur la face supérieure (parois latérales adiabatiques).
- Effets liés aux fissures ou hétérogénéités locales négligés.

## 6.2.2 Choix de la géométrie étudiées

Le bloc modélisé est un parallélépipède de 150 mm d'épaisseur. Les parois latérales étant isolées, le transfert de chaleur par conduction se fait uniquement selon la direction (OY). La géométrie a été représentée en 2D avec une surface chauffante réduite à 30 mm (Figure 50).

Deux configurations ont été simulées :

- Un bloc homogène en béton classique (CR),
- Un bloc composite (TESC 10) où le MCP est réparti de manière uniforme dans la matrice.

## 6.3 Préparation du maillage (Gambit)

### 6.3.1 Création de la géométrie

La géométrie du bloc a été construite dans **Gambit** en 2D avec un côté de 30 mm de longueur et un autre de dimension égale à l'épaisseur réelle des blocs (150mm). Elle est ensuite exportée vers Fluent.

### 6.3.2 Type de maillage utilisé

Un maillage automatique a été généré à l'aide du logiciel **Gambit 2.4.6**. Celui-ci est de type structuré, avec des mailles quadrilatères régulières d'environ 1 mm × 1 mm, ce qui permet une bonne homogénéité et une répartition correcte sur l'ensemble du domaine étudié.

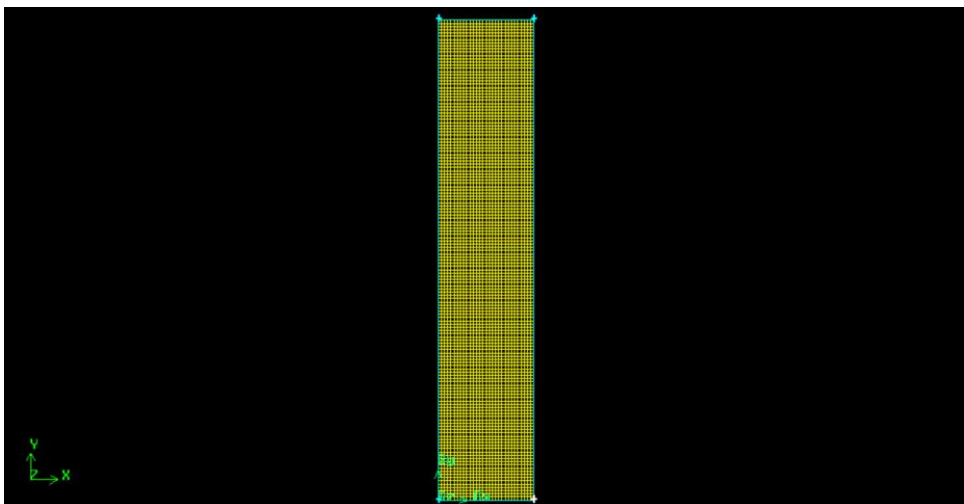


Figure 50 Maillage de la géométrie 2D du bloc (30 mm × 150 mm) sous Gambit 2.4.6.

## 6.4 Mise en place du modèle numérique dans Fluent

### 6.4.1 Modèles physiques activés

- Équations de l'énergie.
- Régime transitoire (unsteady).
- Modèle solidification & melting pour le bloc TESC afin de prendre en compte le changement de phase du MCP.

### 6.4.2 Propriétés des matériaux

- Béton (CR) :  $\rho = 2360 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p = 1132 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ,  $\lambda = 1,369 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .
- MCP (huile de coprah) :  $\rho = 920 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p = 900 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ,  $\lambda = 0,9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , chaleur latente  $L = 90 \text{ J/g}$ , point de fusion = 23-26 °C.
- TESC 10:  $\rho = 2093,33 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p = 1093 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ,  $\lambda = 1,023 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .

### 6.4.3 Conditions aux limites

- Surface inférieure : température imposée 323 K (plaque chaude).
- Surface supérieure : convection avec  $h = 7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  et température ambiante 296 K.
- Surfaces latérales : isolées thermiquement.

### 6.4.4 Paramètres de calcul

- Température initiale du bloc : 288 K.
- Durée de chauffage : 10 800 s ( $\approx 3$  heures), correspondant à la durée réelle de l'expérience.
- Pas de temps : 60 s.
- Nombre d'itérations maximum par pas de temps : 20.
- Critère de convergence :  $10^{-3}$ .

## 6.5 Résultats numériques

La figure 51 présente la distribution de la température statique en fonction de la coordonnée Y (épaisseur du bloc) après 10 800 s.

- La **courbe rouge** correspond au béton classique (CR).

- La **courbe blanche** correspond au bloc TESC 10.

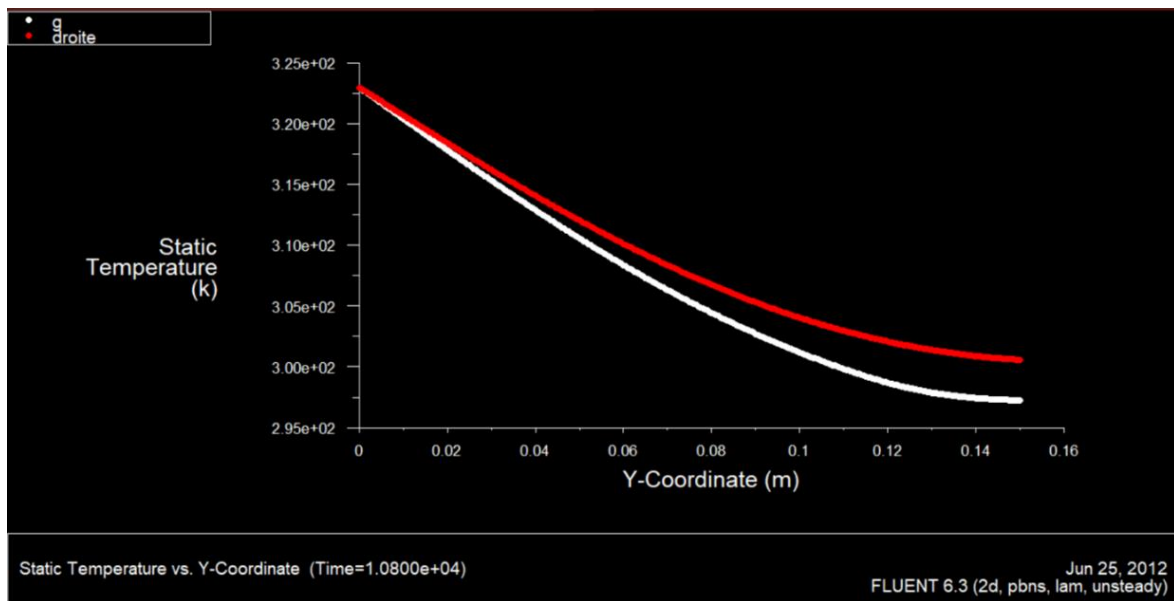


Figure 51 Comparaison de la distribution de température entre le béton CR et le béton TESC 10 (simulation numérique).

On remarque que la température est plus faible dans le bloc TESC 10 que dans le bloc CR, confirmant l'effet du MCP qui absorbe une partie de la chaleur pendant sa transition de phase.

## 6.6 Comparaison entre les courbes de simulation et les courbes expérimentales

Afin de valider la simulation, les résultats numériques ont été comparés aux résultats expérimentaux obtenus dans les mêmes conditions (durée de chauffage de 3 h, température imposée sur la plaque chaude).

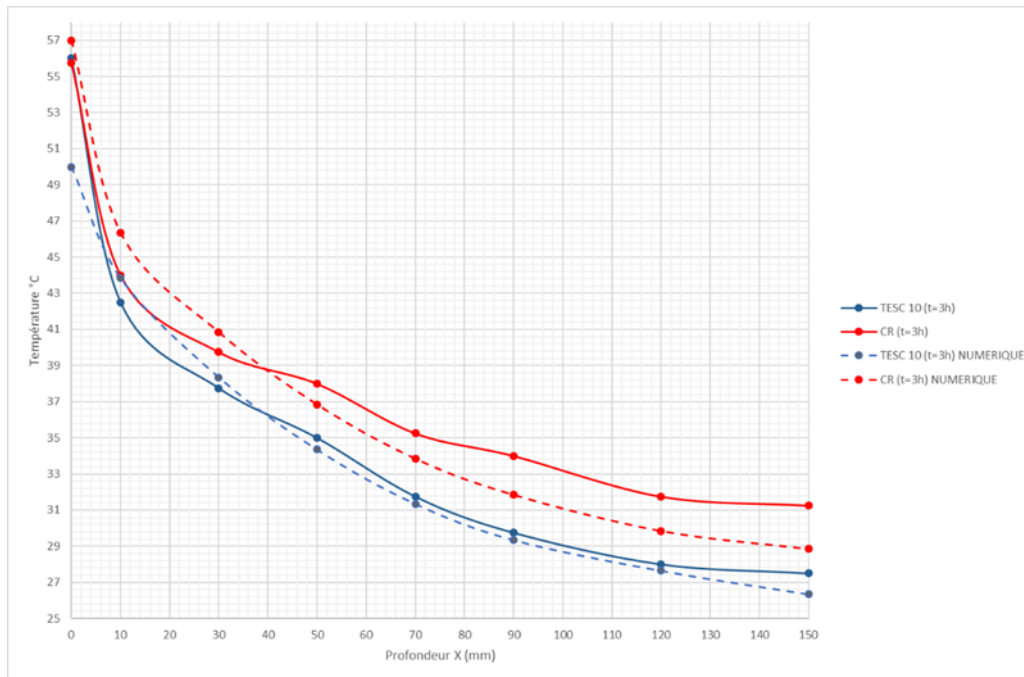


Figure 52 Comparaison des évolutions expérimentales et simulées de la température dans les blocs de référence CR et TESC 10.

L'analyse montre une assez bonne concordance entre les deux courbes, confirmant la validité du modèle numérique. Les écarts observés (de l'ordre de 1 à 2 °C) peuvent être expliqués par :

- L'inhomogénéité du mélange MCP/béton dans le bloc réel,
- Les pertes thermiques résiduelles malgré une isolation des parois,
- L'incertitude de mesure des thermocouples, estimée à  $\pm 1$  °C.

## 6.7 Conclusion partielle

La simulation numérique a permis de reproduire fidèlement le comportement thermique des blocs testés expérimentalement. Les résultats montrent que l'incorporation de MCP réduit la température dans le bloc et améliore son inertie thermique.

La comparaison entre les résultats simulés et expérimentaux révèle une forte similarité, confirmant la fiabilité du modèle numérique. Les différences constatées

sont attribuées à l'hétérogénéité du mélange réel, aux pertes de chaleur et à l'incertitude instrumentale.

Ces résultats renforcent la conclusion selon laquelle les MCP jouent un rôle significatif dans l'amélioration de la performance thermique des matériaux de construction.

## Conclusion générale

Les investigations expérimentales réalisées dans ce travail ont permis de démontrer l'efficacité de l'intégration des matériaux à changement de phase (MCP) dans les blocs composites.

Les résultats montrent que l'écart de température mesuré entre les blocs en béton TESC et le béton de référence (CR) s'accroît de manière significative avec l'augmentation du pourcentage de MCP incorporé.

Cette évolution traduit une amélioration progressive de l'inertie thermique et donc une meilleure capacité de régulation des variations de température.

L'analyse comparative des différents échantillons a mis en évidence comme on pouvait le prédire, des performances thermiques plus élevées pour le bloc **TESC 10** devant le TESC 08 et le TESC 06. Même le TESC 03, le bloc le moins chargé en MCP, (il contient exactement 360 grammes d'huile de coprah pour un bloc pesant environ 12 Kg) a montré des résultats satisfaisants, confirmant l'apport positif de l'intégration des MCP, même à faible teneur.

Il est également observé que l'écart de température entre les deux blocs augmente lorsque la température de la face chauffée est plus élevée, (test fait à 80°C) ce qui correspond à une situation réaliste d'une paroi de bâtiment exposée directement au rayonnement solaire.

En définitive, ces résultats expérimentaux sont intéressants. Ils confirment l'intérêt et la pertinence de l'utilisation des MCP dans les parois de bâtiments et comme une solution efficace pour l'amélioration de leurs performances thermiques. C'est incontestablement une voie passive pour atteindre le confort thermique dans le bâtiment.

Dans cette étude, l'huile de coprah est choisie comme MCP par défaut, non pas évidemment pour ses performances thermiques assez modestes, mais plutôt pour sa disponibilité et son coût très bas.

Nos résultats, malgré quelques lacunes à reprendre et des manques en termes de moyens d'investigations à combler, sont intéressants et donc d'autant plus parlants et encourageants que nous avons utilisé un MCP peu performant.

A ce titre, Il serait intéressant de mener une autre étude avec un MCP ayant une plus grande chaleur latente comme la paraffine par exemple. Par ailleurs, en plus de l'aspect thermique, il serait nécessaire de faire des investigations sur l'aspect non moins intéressant de la résistance mécanique des bétons contenant ces MCP

car il est connu que leurs propriétés mécaniques sont sévèrement affectées par ces ajouts. Voilà une suite toute trouvée pour nos travaux.

## Références bibliographiques

- [1] « L. Derradji, Comportement thermique des bâtiments à parois incorporant les matériaux à changement de phase. Thèse de Doctorat en Génie Mécanique, Université Saad Dahlab de Blida, Faculté de Technologie, Département de Mécanique, Blida, Algérie, juin 2015. »
- [2] S. B. E. Ango, « Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment: développement d'un système actif à matériaux à changement de phase ».
- [3] « A. Hessad, Apport des matériaux nouveaux dans le confort thermique des bâtiments : Cas des matériaux à changement de phase (MCP). Mémoire de Master en Architecture et Environnement, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Faculté de Génie de la Construction, Département d'Architecture, Tizi Ouzou, Algérie, 2021. »
- [4] « J. P. Arzamendia López, Méthodologie de conception des matériaux architecturés pour le stockage latent dans le domaine du bâtiment. Thèse de Doctorat en Énergétique, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA Lyon), École doctorale : Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique, Centre Thermique de Lyon, Lyon, France, 28 juin 2013. »
- [5] J. Borderon, « Intégration des Matériaux à Changement de Phase comme système de régulation dynamique en rénovation thermique ».
- [6] « A. Hamid, Stockage thermique par changement de phase matériaux et applications, Thèse de Doctorat, Université Saad Dahlab — Blida 1, Blida, Algérie, 2008. »
- [7] 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.
- [8] R. Sharma, J.-G. Jang, et J.-W. Hu, « Phase-Change Materials in Concrete: Opportunities and Challenges for Sustainable Construction and Building Materials », *Materials*, vol. 15, n° 1, p. 335, janv. 2022, doi: 10.3390/ma15010335.
- [9] m'hand Dehmous, « M. Dehmous, 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. Thèse de Doctorat en Thermique, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, France, 1er décembre 2021. ».
- [10] S. Drissi, « Développement de nouveaux bétons "« accumulateurs d'énergie »": investigations expérimentale, probabiliste et numérique du comportement thermique ».
- [11] K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, et C. Castelain, « A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications », *J. Energy Storage*, vol. 33, p. 101913, janv. 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.101913.