



HAL
open science

CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE DE BETON DE CHANVRE INTEGRANT UN MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE MICROENCAPSULE

Hachmi Toifane, Pierre Tittlein, Laurent Zalewski, Emmanuel Antczak, Anh
Dung Tran Le, Omar Douzane, Thierry Langlet

► **To cite this version:**

Hachmi Toifane, Pierre Tittlein, Laurent Zalewski, Emmanuel Antczak, Anh Dung Tran Le, et al.. CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE DE BETON DE CHANVRE INTEGRANT UN MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE MICROENCAPSULE. XIVème Colloque International Franco-Québécois en énergie (CIFQ), Jun 2019, Baie St-Paul, Canada. hal-03552977

HAL Id: hal-03552977

<https://hal.science/hal-03552977v1>

Submitted on 2 Feb 2022

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

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



HAL
open science

CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE DE BETON DE CHANVRE INTEGRANT UN MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE MICROENCAPSULE

Hachmi Toifane, Pierre Tittlein, Laurent Zalewski, Emmanuel Antczak, Anh
Dung, Tran Le B, Omar Douzane, Thierry Langlet

► **To cite this version:**

Hachmi Toifane, Pierre Tittlein, Laurent Zalewski, Emmanuel Antczak, Anh Dung, et al.. CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE DE BETON DE CHANVRE INTEGRANT UN MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE MICROENCAPSULE. Colloque International Franco-Québécois en énergie (CIFQ), Jun 2019, Baie St-Paul, Canada. hal-03552977

HAL Id: hal-03552977

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03552977>

Submitted on 2 Feb 2022

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

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

CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE DE BETON DE CHANVRE INTEGRANT UN MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE MICROENCAPSULE

Hachmi TOIFANE ^a, Pierre TITTELEIN ^a, Laurent ZALEWSKI ^a, Emmanuel ANTCZAK ^a, Anh Dung TRAN LE ^b, Omar DOUZANE ^b, Thierry LANGLET ^b

^a Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), Université d'Artois/Faculté des Sciences Appliquées, Technoparc Futura, F-62400 Béthune, France

^b Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI), Université de Picardie Jules Verne - IUT d'Amiens, Le Bailly 80 025 Amiens Cedex, France

RÉSUMÉ

Cet article présente les travaux menés dans le cadre d'un projet collaboratif entre le laboratoire LGCgE de l'université d'Artois et le laboratoire LTI de l'université de Picardie Jules Verne. Ce projet avait pour objectif de concevoir un béton de chanvre intégrant un matériau à changement de phase (MCP), ayant à la fois des propriétés de régulateur thermique, hydrique et une résistance mécanique satisfaisante. Ce projet constitue une contribution à la caractérisation thermophysique (conductivités thermiques, capacités thermiques et chaleur latente) de ce nouveau béton. Cet article traitera également d'une méthode de caractérisation thermique qui se base sur des simulations numériques, en utilisant un couplage des logiciels **GenOpt** et **Dymola/Modelica**, et qui permet d'évaluer les performances de ce matériau contenant du MCP.

Mots Clés : Béton de chanvre ; Matériau à changement de phase, MCP micro-encapsulé

NOMENCLATURE

C_m	chaleur massique $J.kg^{-1}.°C^{-1}$
C_{solide}	chaleur massique à l'état solide $J.kg^{-1}.°C^{-1}$
$C_{liquide}$	chaleur massique à l'état liquide $J.kg^{-1}.°C^{-1}$
L_A	chaleur latente $J.kg^{-1}$
T	température $°C$
T_M	température de fusion $°C$
$T_{initiale}$	température à l'état initial $°C$
T_{finale}	température à l'état final $°C$
e	épaisseur m

Q	quantité d'énergie stockée $J.m^{-2}$
D	diffusivité $m^2.s^{-1}$
E_{ff}	effusivité $J.K^{-1}.m^2.s^{1/2}$

Lettres grecques :

λ	conductivité thermique $W.m^{-1}.°C^{-1}$
ρ	masse volumique $kg.m^{-3}$
ϕ	flux de chaleur W

1. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment est responsable de 25% des émissions de gaz à effet de serre en France et représente 44% de l'énergie consommée. C'est un enjeu très important dans la lutte contre le réchauffement climatique et la transition énergétique. Une réhabilitation massive doit être menée afin de réduire l'impact énergétique du patrimoine bâti et atteindre les objectifs fixés par la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV). Cette loi

visait à réduire les consommations énergétiques de 50% et à diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre en 2050 par rapport à l'année de référence 2012.

Pour mener à bien cette démarche, il est nécessaire de développer de nouveaux outils ou matériaux permettant d'améliorer les performances énergétiques mais également la qualité environnementale, sanitaire des bâtiments ainsi que le confort des usagers.

Ce projet vise à créer un nouveau béton de chanvre contenant du MCP afin d'améliorer ses propriétés

* auteur correspondant
laurent.zalewski@univ-artois.fr

thermiques. Le béton de chanvre a l'avantage d'être un matériau de construction éco-hybride isolant, obtenu à partir de produits renouvelables et recyclables. Il est réalisé à l'aide de tiges de chanvre séchées et concassées appelées chènevotte. Ces granulats de chanvre (chènevotte) sont mélangés avec une phase minérale liante de composition variable (chaux aérienne/hydraulique, ciment) et une quantité d'eau nécessaire à l'obtention d'un matériau ouvrable à l'état frais. Le béton de chanvre a un faible impact environnemental notamment au cours de sa fabrication et en fin de vie. Il permet d'assurer le confort des occupants tout en favorisant les transferts hydriques dans la paroi afin de réguler l'humidité intérieure. De plus, il ne présente pas de dangers pour la santé lors de sa mise en œuvre et au cours de sa durée de vie dans le bâtiment.

Plusieurs études réalisées sur différentes formulations de béton de chanvre, ont permis de déterminer ses propriétés, mais également d'évaluer ses capacités de régulateur hydrique [1–6]. Les résultats obtenus ont montré que ce matériau possède de bonnes performances hygrothermiques ainsi qu'une certaine stabilité structurelle. Leurs recherches ont mis en évidence les principaux paramètres qui influent sur sa conductivité thermique, sa capacité thermique, sa résistance mécanique ainsi que son efficacité à réguler le taux d'humidité. Ces informations étaient primordiales dans la détermination des formulations du nouveau béton de chanvre contenant un matériau à changement de phase.

Le matériau à changement de phase solide/liquide est un matériau capable de transiter entre les différentes phases de façon réversible en échangeant de l'énergie avec son environnement, et cela en fonction des conditions de température qu'on lui impose. Il existe trois grandes familles de MCP, qui sont détaillés dans les travaux de Harlé, à savoir : organique, inorganique et eutectique [7].

Celui qui est utilisé pour cette étude est organique, constitué de microscopique billes de cire de paraffine active (5 à 40 μm), encapsulées dans une matrice de liant acrylique (Micronal DS 5001X, point de fusion à 26°C) [8]. Elles sont capables de se solidifier sous forme de cire ou se liquéfier en fonction de la température. Lorsque la température augmente et qu'elle avoisine les 26°C, le matériau passe de l'état solide à l'état liquide, en stockant de l'énergie pendant ce changement de phase. Quand la température diminue, les microcapsules restituent la chaleur. Cette propriété du matériau est liée à son importante énergie de fusion par unité de volume. Plus celle-ci sera grande plus les propriétés de stockage/restitution de la chaleur seront intéressantes. A masse identique, le MCP stocke plus d'énergie qu'un matériau de construction classique. En effet les matériaux comme la brique par exemple, échangent de l'énergie seulement par chaleur sensible. Quant au MCP, il va aussi échanger de l'énergie par chaleur sensible, mais également par chaleur latente en absorbant ou en

diffusant de la chaleur lors de son changement de phase [9]. Ainsi, la chaleur latente et la chaleur sensible constituent la quantité totale d'énergie que le MCP est capable d'emmagasiner.

L'intérêt d'un tel système dans le bâtiment, c'est qu'il peut assurer le confort thermique intérieur s'il est bien dimensionné. Il va donc être utile dans le béton de chanvre pour absorber les surplus de chaleur au moment des pics de chaleur dans le bâtiment et les restituer lorsque la température redescendra en dessous d'un certain seuil, durant la nuit par exemple.

Cet article a pour but de présenter la conception et la caractérisation thermophysique d'un nouveau béton de chanvre intégrant un MCP (avec différents pourcentages de MCP de 20% ou 40%). Leurs propriétés sont ensuite confrontées à celles d'un béton de chanvre classique sans MCP afin d'évaluer l'impact de l'ajout de MCP dans le mélange. Les propriétés thermophysiques ont été déterminées au laboratoire grâce à des mesures expérimentales (banc fluxmétrique du LGCgE) combinées à des techniques d'identification utilisant un modèle numérique implémenté dans le logiciel Dymola sous le langage Modelica [10].

2. FORMULATIONS DU BETON DE CHANVRE

2.1 Formulation sans MCP

Les différentes formulations réalisées se basent sur une première formulation déjà étudiée par le Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI) de l'université de Picardie Jules Verne. Le mélange initial du béton de chanvre de référence contient 49% d'eau, 18% de chènevotte et 33% de liant Tradical PF70. Le béton de chanvre, obtenu grâce à cette formulation, a fait l'objet d'une caractérisation thermique afin de déterminer sa conductivité, sa chaleur massique ainsi que sa résistance en compression. Il a un rapport E/C (masse d'eau / masse de ciment) de 1,49, qui permet d'avoir une bonne ouvrabilité. Ce rapport est bien supérieur à celui d'un béton classique car la chènevotte absorbe une grande partie de l'eau de gâchage.

L'élaboration des nouvelles formulations intégrant du MCP prend en compte certaines contraintes qui garantissent la qualité du mélange final. En effet, plusieurs études ont montré que la concentration en liant, la masse volumique ainsi que la teneur en eau ont une influence sur la conductivité thermique, la chaleur massique, la résistance mécanique (compression) et les propriétés hygriques.

Le pouvoir isolant ou conducteur du béton de chanvre en régime permanent est caractérisée par sa conductivité thermique. Lorsque le dosage en liant augmente, la conductivité thermique du béton de chanvre augmente aussi. Cela s'explique par le fait que la conductivité thermique de la phase liante est plus élevée et la quantité

importante de liant va noyer les particules de chanvre, ce qui provoque une baisse de leur capacité isolante [11]. Dans cette étude, le dosage de liant est réalisé de façon optimale afin d'obtenir une conductivité thermique optimale.

De plus, l'augmentation de la teneur en eau entraîne une augmentation de la conductivité thermique, car l'eau affaiblit le pouvoir d'isolation du béton [4]. Cette teneur en eau modifie également la capacité thermique du béton de chanvre. Celle-ci augmente de façon proportionnelle par rapport à la quantité d'eau présente dans le matériau [4].

Il existe également, d'après [1], une relation linéaire entre la masse volumique et la conductivité thermique. Plus la masse volumique est élevée plus la conductivité thermique est élevée.

2.2 Formulations avec 20% et 40% de MCP

La deuxième formulation, qui se base sur la première, intègre 20% de MCP par rapport à la masse totale sèche (chènevotte, liant, MCP). Le rapport massique entre le TPF70 et la chènevotte reste inchangée pour faciliter la comparaison entre les différentes formulations. Seule le rapport E/C (masse d'eau / masse de ciment) a été légèrement augmenté jusqu'à 1.65. La quantité d'eau a été augmentée afin de fluidifier le mélange et faciliter l'intégration du MCP micro-encapsulé.

La troisième formulation, qui intègre 40% de MCP par rapport à la masse totale sèche, a été élaborée suivant le même principe. Son rapport E/C est de 1.86.

2.3 Bilan

	ρ [kg/m ³]	% Masse Totale		
		SANS MCP	20% MCP	40% MCP
Chènevotte	133	17.9	15.1	12.2
TPF70	739	33	27.9	22.6
MCP	373	-	10.8	23
Eau	1000	49.1	46.2	42.2

Tableau 1 : formulations des échantillons

Formulation	E/C	ρ [kg/m ³]		Dimensions [cm]
		Frais	à 40 jours	
sans MCP	1.49	686	370	25 x 25 x 6
20% de MCP	1.65	781	441	25 x 25 x 6
40% de MCP	1.89	1000	596	25 x 25 x 6

Tableau 2 : caractéristiques des échantillons

Les tableaux ci-dessus regroupent l'ensemble des échantillons fabriqués dans le cadre de ce projet, et qui étaient destinés aux essais de caractérisation thermique. On peut noter (tableau 2) qu'ils perdent une quantité importante d'eau au bout de 40 jours de séchage. Selon les travaux de Chamoin [12], ce temps de séchage est suffisant car le béton de chanvre atteint sa stabilisation massique à l'issue de 28 à 90 jours. Ces échantillons

étaient conservés dans une salle à température ambiante, d'environ 20°C et un taux d'humidité relative d'environ 50%.

3. CARACTERISATION THERMIQUE

3.1 Echantillon sans MCP

Afin d'évaluer expérimentalement sa conductivité thermique, l'échantillon est positionné entre deux plaques échangeuses et on impose trois niveaux de température entre les deux plaques, avec un écart constant pour chaque niveau de température. Ensuite, on mesure simultanément le flux thermique et la température sur les deux faces de l'échantillon. La conductivité thermique en régime permanent se détermine grâce à la relation entre la somme des flux de chaleur Φ mesurés et la différence des températures ΔT :

$$\lambda = \frac{\sum \Phi \times e}{2 \times \Delta T} \quad (1)$$

Les niveaux de température imposés à l'échantillon sans MCP (figure 1) sont les mêmes pour chaque cycle afin de pouvoir obtenir une moyenne des résultats et ainsi limiter les possibilités d'erreurs de mesure.

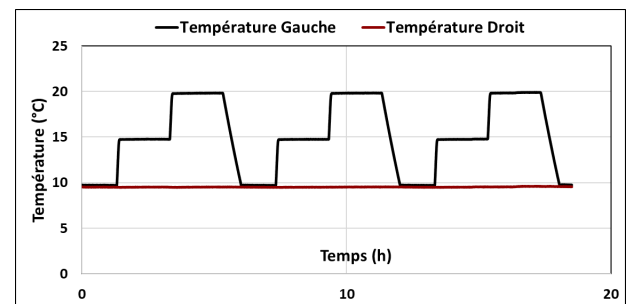


Figure 1 : Températures imposées pour les essais de conductivité thermique

Au 1^{er} niveau du cycle, la température imposée à l'échantillon est la même de chaque côté (10°C). Cette première étape permet de préchauffer le matériau afin d'avoir une température presque identique sur ses deux faces. Pour le 2^{ème} niveau (10°C/15°C) et le 3^{ème} niveau (10°C/20°C) du cycle, la température imposée sur les côtés de l'échantillon est différente. Entre chaque changement de niveau, il a fallu attendre la stabilisation des flux thermiques, c'est-à-dire qu'il fallait avoir une différence de flux thermique, côté gauche et droit, proche de 0 W.m⁻².

Pour ce qui est de la chaleur massique de ce béton de chanvre sans MCP, elle est déterminée en utilisant le même dispositif mis en œuvre pour mesurer la conductivité thermique. La seule différence c'est que l'on change les sollicitations de température.

On applique des rampes de température pour tous les échantillons, allant de 10° à 35°C (figure 2).

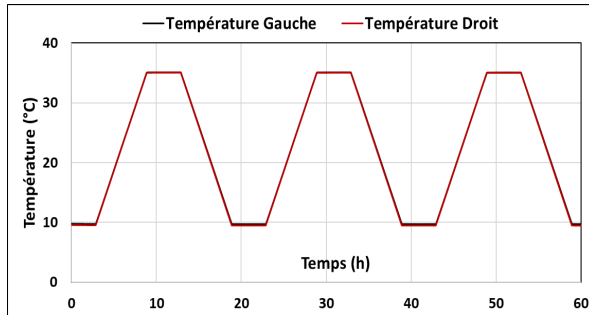


Figure 2 : Températures imposées pour les essais de capacité thermique

L'essai se déroule en plusieurs cycles constitués chacun de trois étapes :

Etape 1 : maintenir l'échantillon à une température isotherme de départ et attendre la stabilisation des flux thermiques.

Etape 2 : chauffer l'échantillon pour qu'il stocke de la chaleur et attendre la stabilisation des flux thermiques.

Etape 3 : Refroidir l'échantillon jusqu'à la température de départ pour qu'il déstocke la chaleur et attendre la stabilisation des flux thermiques.

Au cours des étapes 2 et 3, l'échantillon sous l'effet d'un flux de chaleur Φ , passe d'une température $T_{initiale}$ à une température T_{finale} en stockant une quantité d'énergie Q . La capacité thermique C , se calcule entre 2 stabilisations de flux (figure 3), suivant la formule ci-dessous :

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2)$$

Avec $\Delta T = T_{finale} - T_{initiale}$ et $Q = \int_{T_{initiale}}^{T_{finale}} \Delta \Phi . dT$

La chaleur massique C_m est ensuite déterminée grâce à la relation suivante :

$$C_m = \frac{C}{\rho . e} \quad (3)$$

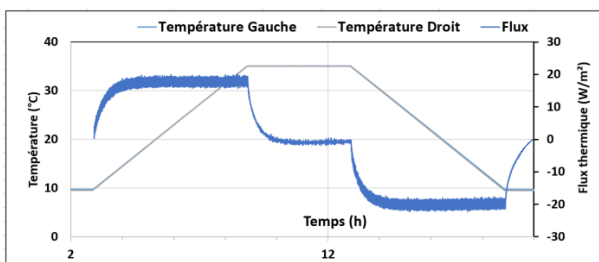


Figure 3 : Essai nécessaire au calcul de la capacité thermique

Pour le cas des échantillons contenant du MCP, il y a une quantité d'énergie supplémentaire qui rentre en jeu, qui est la chaleur latente. Cela est dû au fait que le MCP présent dans le béton de chanvre subi un changement de phase (solide-liquide) lorsque le matériau atteint une température d'environ 26°C. De ce fait, le calcul de la

capacité thermique à l'état solide et liquide s'effectue en suivant une autre méthode basée sur le logiciel de modélisation et simulation de système multi-physiques, **Dymola**.

3.2 Echantillon avec MCP

Pour caractériser les échantillons avec MCP, on utilise la méthode décrite dans [13]. Elle consiste à créer un modèle de paroi avec changement de phase et à identifier ses paramètres en comparant les résultats numériques et les résultats expérimentaux par méthodes inverses. Pour les essais, on utilise le même dispositif que présenté précédemment avec une sollicitation sous forme de rampes (figure 2). Cela permet d'observer en détails les phénomènes qui se produisent lorsqu'on approche des 26°C.

Cette méthode permet, à partir des résultats des essais (flux thermiques, températures), et des informations connues sur l'échantillon (masse volumique, dimensions), de déterminer la chaleur massique de l'échantillon à l'état solide et à l'état liquide. Elle permet également de calculer la chaleur latente de changement d'état ainsi que la conductivité thermique.

Pour modéliser la paroi, le logiciel Dymola, basé sur le langage de modélisation Modélica a été utilisé. La figure 4 ci-dessous présente le modèle utilisé.

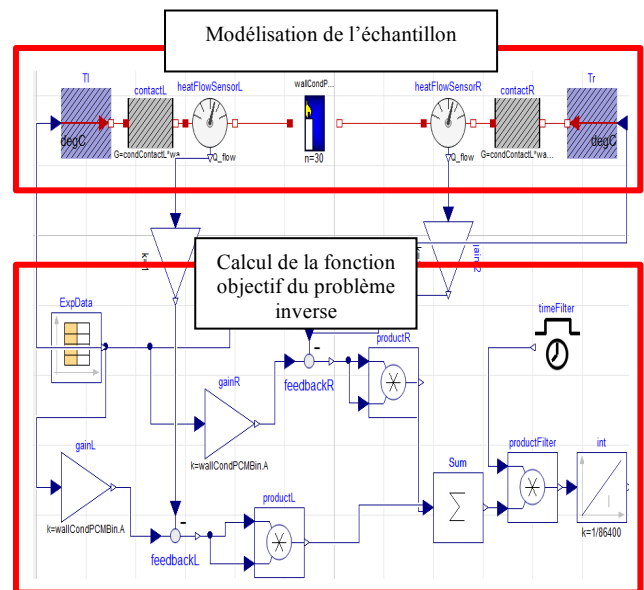


Figure 4 : Schéma du modèle utilisé dans le logiciel Dymola pour les simulations numériques

Le principe des méthodes inverses est ensuite utilisé afin de retrouver, à partir de mesures disponibles, les coefficients du modèle physique (théorique). Les paramètres nécessaires à l'inversion du problème sont la température, le flux thermique, la masse volumique ainsi que les dimensions de l'échantillon.

Les paramètres recherchés (inconnus) sont la capacité thermique C_{solide} et $C_{liquide}$, la chaleur latente L_A , la conductivité thermique et les températures de fusion T_M et T_A [13]. Le logiciel GenOpt est utilisé pour lancer les simulations dans Dymola et minimiser la fonction objectif qui est dans le cas présent la somme des écarts quadratiques des flux mesurés et calculés à gauche et à droite de l'échantillon.

4. RESULTATS

4.1 Conductivité thermique

Les mesures des flux thermiques sur le matériau sans MCP sont représentées sur la figure ci-dessous.

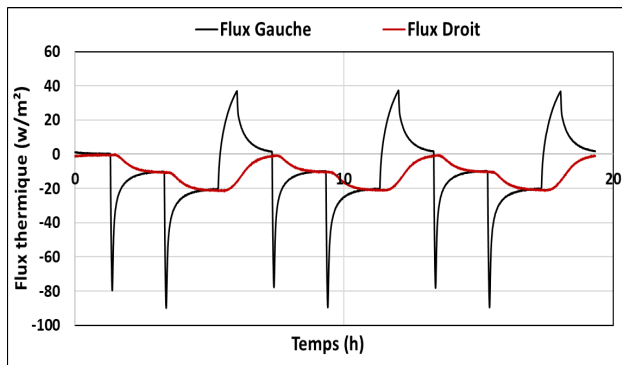


Figure 5 : Evolution du flux thermique, pour l'essai de conductivité thermique sur l'échantillon sans MCP

La conductivité thermique λ est ensuite déterminée selon la méthode abordée dans le paragraphe 3.1, à chaque point où le régime permanent est atteint. Elle est estimée à $\lambda = 0.122 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Cette valeur est en accord avec les résultats obtenus par les différents auteurs cités précédemment, tel que [6], c'est-à-dire $0.06 < \lambda < 0.20 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour des masses volumique allant de 200 à 840 kg.m^{-3} . Quant à [12], il a obtenu une conductivité $0.07 < \lambda < 0.12 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour une masse volumique variant entre 440 et 730 kg.m^{-3} .

Quant à la conduction thermique des échantillons contenant du MCP, elle est déterminée suite à la procédure d'inversion. Celle-ci est égale :

$\lambda = 0.136 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour l'échantillon à 20% de MCP

$\lambda = 0.178 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour celui à 40% de MCP.

4.2 Capacité thermique et chaleur latente

La figure ci-dessous représente les mesures des flux thermiques pour les 3 échantillons (avec MCP et sans MCP) soumis aux sollicitations de température présentées en figure 2.

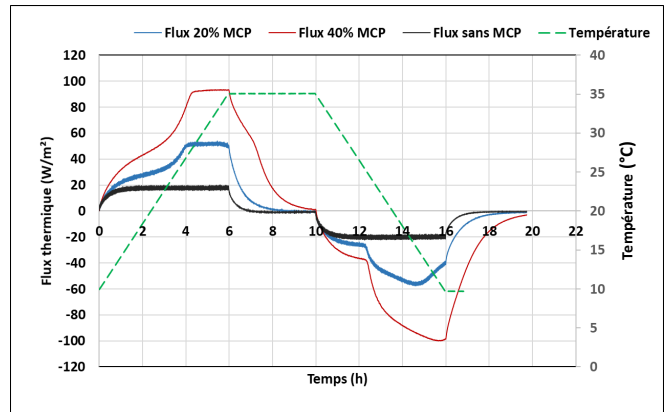


Figure 6 : Evolution du flux thermique, pour l'essai de capacité thermique sur les 3 échantillons

On observe des pics de flux thermique lorsqu'on avoisine les 26°C pour les deux échantillons contenant du MCP. Cela est dû à la quantité d'énergie supplémentaire liée à la chaleur latente, qui intervient pour ces deux échantillons au moment du changement d'état du MCP. On remarque également que plus l'échantillon contient un pourcentage élevé de MCP, plus les flux mesurés sont élevés. On relève aussi une augmentation de cette chaleur latente en fonction de la quantité de MCP présent dans le matériau.

Fomulation	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m.°C)]	C_p [J/(kg.K)]	L_A [J/kg]
Sans MCP (LGCgE)	370	0.12	1428	-
Collet	413	0.11	1000	-
Evrard	440	0.10	1530	-
20% de MCP	441	0.14	Cs : 1698 CL : 1677	28980
40% de MCP	596	0.18	Cs : 2048 CL : 2019	57620

Tableau 3 : comparaison des 3 échantillons avec ceux des différents auteurs cités

La chaleur massique de chaque échantillon (tableau 3) a été calculée par méthode inverse présentée au paragraphe 3.2.

4.3 Comparaison et discussion

Les expériences menées sur l'échantillon de béton de chanvre sans MCP, l'échantillon de béton de chanvre avec 20% et 40% de MCP ont donné les résultats ci-dessous (tableau 3). Ce tableau regroupe les résultats des échantillons étudiés par certains auteurs cités, comparés aux résultats des échantillons analysés au cours de ce projet.

On remarque donc que l'ajout de 20% de MCP fait augmenter la conductivité thermique du matériau d'environ 11,5% par rapport au béton de chanvre sans MCP. Celle-ci est augmentée de 45,9% pour l'échantillon qui contient 40% de MCP. Cela est dû au

fait que les pores du béton de chanvre se remplissent de MCP, or ces pores permettaient d'améliorer ses propriétés isolantes.

De plus en rajoutant du MCP, la compacité ainsi que la masse volumique de l'échantillon a augmenté. Cérézo [1] a montré lors de ses recherches qu'il existe un rapport linéaire entre la masse volumique et la conductivité thermique. Plus on augmente la masse volumique, plus la conductivité thermique augmente. Concernant l'objectif de cette étude, l'augmentation de la conductivité thermique est assez intéressante car une bonne conductivité thermique permet de faciliter les cycles de stockage et déstockage de chaleur lorsque le matériau subi des variations de température.

L'ajout de MCP permet également d'augmenter la quantité d'énergie stockée par le matériau grâce au stockage d'énergie par chaleur latente. On remarque aussi que cette chaleur est doublée entre l'échantillon à 20% de MCP et l'échantillon à 40% de MCP, ce qui est un élément de vérification de la méthode de caractérisation.

CONCLUSION

Le résultat de ces études préliminaires, réalisés sur le béton de chanvre classique sans MCP et avec MCP (20% et 40% en pourcentage par rapport à la masse totale sèche) montrent qu'il y a un réel intérêt à combiner les deux matériaux. L'ajout de MCP a permis d'améliorer les performances thermiques du béton de chanvre, notamment sa capacité thermique, ce qui lui permet de mieux assurer le confort intérieur. Cette première approche s'avère assez concluante mais devra tout de même être complétée par des études ultérieures en conditions réelles.

Pour compléter ce travail, il sera nécessaire de déterminer les propriétés hydriques des échantillons afin d'évaluer l'impact de l'ajout du MCP. En effet, la régulation hygrique du béton de chanvre est une capacité importante qui permet d'améliorer le confort intérieur dans le bâtiment.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les universités d'Artois et de Picardie Jules Verne pour le financement des laboratoires LGCgE (Univ. d'Artois) et du laboratoire LTI (Univ. de Picardie) dans le cadre de l'appel à projets conjoint Université d'Artois – UPJV – ULCO : "A2U".

RÉFÉRENCES

- [1] V. Cérézo, Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique, Lyon, INSA, 2005. <http://www.theses.fr/2005ISAL0037> (accessed March 13, 2018).
- [2] J. Chamoin, Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation, Rennes, INSA, 2013. <http://www.theses.fr/2013ISAR0016> (accessed March 13, 2018).
- [3] F. Collet-Foucault, Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux, Rennes, INSA, 2004. <http://www.theses.fr/2004ISAR0016> (accessed March 13, 2018).
- [4] A. Evrard, Transient hygrothermal behavior of Lime-Hemp Materials, 2008.
- [5] A. Youssef, Prise en compte des apports mécaniques du béton de chanvre pour le calcul de structure bois/béton de chanvre et métal/béton de chanvre, Lorient, 2017. <http://www.theses.fr/2017LORIS431> (accessed March 13, 2018).
- [6] D.C. Nguyen, Caractérisation de l'interface fibre/matrice : application aux composites polypropylène/chanvre, Troyes, 2016. <http://www.theses.fr/2016TROY0009> (accessed March 13, 2018).
- [7] T. Harle, Création et caractérisation d'un matériau de construction composite incorporant un nouveau matériau à changement de phase solide-solide, Cergy-Pontoise, 2016. <http://www.theses.fr/2016CERG0874> (accessed March 13, 2018).
- [8] BASF, Micronal PCM : intelligent temperature management for buildings, (2008). https://maisonpassive.be/IMG/pdf/Micronal_EN.pdf.
- [9] A. Joulain, L. Zalewski, S. LASSUE, H. Naji, Experimental investigation of thermal characteristics of a mortar with or without a micro-encapsulated phase change material, Applied Thermal Engineering. 66 (2014) 171–180. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.01.027.
- [10] P. Tittlein, S. Gibout, E. Franquet, K. Johannes, L. Zalewski, F. Kuznik, J.-P. Dumas, S. LASSUE, J.-P. Bedecarrats, D. David, Simulation of the thermal and energy behaviour of a composite material containing encapsulated-PCM: Influence of the thermodynamical modelling, Applied Energy. 140 (2015) 269–274. doi:10.1016/j.apenergy.2014.11.055.
- [11] T. Le, A. Dung, Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment, Reims, 2010. <http://www.theses.fr/2010REIMS012> (accessed March 13, 2018).
- [12] C. Magniont, Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources, Toulouse 3, 2010. <http://www.theses.fr/2010TOU30101> (accessed March 13, 2018).
- [13] E. Franquet, S. Gibout, P. Tittlein, L. Zalewski, J.-P. Dumas, Experimental and theoretical analysis of a cement mortar containing microencapsulated PCM, Applied Thermal Engineering. 73 (2014) 30–38. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.06.053.