

DESCRIPTIF DU SUJET ET ARGUMENTAIRE DU DIRECTEUR DE THESE

Nom et prénom du directeur de thèse : ZALEWSKI Laurent

Adresse mail : laurent.zalewski@univ-artois.fr

Numéro de téléphone : 06 21 28 83 16

Co-encadrant : CHERIF Yassine (préparation HDR 2022/2023)

Intitulé du sujet de thèse (en français) :

Caractérisation de matériaux à changement de phase (MCP) biosourcés destinés au stockage de l'énergie thermique pour les bâtiments.

Résumé du sujet de thèse (Décrire en français les objectifs visés en 1500 caractères maximum)

Le stockage de l'énergie ainsi que l'amélioration de l'efficacité énergétique font partie des axes majeurs pour diminuer l'impact environnemental des bâtiments. L'intérêt du stockage est de récupérer l'énergie aux moments où elle est disponible (ENR, énergie fatale) et lorsque les besoins sont faibles afin de les restituer aux moments les plus adéquats (fin de journée ou nuit). Le stockage de l'énergie par l'intermédiaire des matériaux à changement de phase (MCP) permet une densité de stockage plus importante que les matériaux dits "classiques" (stockage d'énergie sous forme sensible). Du fait des politiques d'amélioration de la performance énergétique des bâtiments par la mise en place de la nouvelle Réglementation Environnementale (RE 2020), le recours aux matériaux biosourcés sera privilégié. Les MCP biosourcés présentent toutefois des spécificités qui compliquent leur caractérisation thermophysique. En effet, ils montrent des comportements thermiques en fusion et solidification différents qui font apparaître plusieurs pics d'énergie ou de la surfusion. Les modèles numériques actuels ont des difficultés à prendre en compte ces particularités. Leur fiabilité est pourtant indispensable pour choisir le meilleur MCP pour une application ou évaluer les performances énergétiques d'un stockage. Le sujet proposé vise à une meilleure compréhension des phénomènes et à améliorer les méthodes de caractérisation afin de développer des modèles numériques fiables pour ce type de matériau.

DESCRIPTIF DU SUJET (en 3 pages minimum)

1) Le sujet de recherche choisi et son contexte scientifique et économique :

Dans le secteur du bâtiment, les consommations énergétiques pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire représentent respectivement 61,3 % et 12,1 % de la consommation d'énergie moyenne dans le résidentiel (source Ademe 2016 : <https://www.ademe.fr/expertises/batiment/passer-a-laction/elements-dequipement/leau-chaude-sanitaire>). Le secteur du bâtiment représente 44 % de l'énergie consommée en France, émet plus de 123 millions de tonnes de CO₂ chaque année, ce qui en fait un des domaines clés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la transition énergétique (<https://www.ecologie.gouv.fr/energie-dans-batiments>). La France s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre en agissant sur sa politique de l'énergie dans les bâtiments. Dès le Plan Climat en 2004 et la loi POPE en 2005, la France s'est engagée à réduire d'un facteur 4 ses émissions à échéance de 2050. Pour y parvenir, une directive européenne du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments (2010/31/CE) a pour objectif de promouvoir l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments neufs et existants. En parallèle, la loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte fixe les objectifs au secteur du bâtiment d'atteindre le niveau basse consommation pour l'ensemble des bâtiments du parc immobilier français à l'horizon 2050 par la rénovation énergétique de 500 000 bâtiments par an à partir de 2017 (https://www.ecologie.gouv.fr/energie-dans-batiments#scroll-nav_1). Le respect des engagements pris dans la lutte contre le changement climatique, récemment réaffirmés dans la loi Energie Climat, suppose que la France atteigne la neutralité carbone en 2050. Dans ce cadre, la réglementation thermique 2012 est remplacée en 2021 par la Réglementation Environnementale (RE 2020) dont l'un des principaux leviers est d'agir sur les émissions des bâtiments neufs, du secteur résidentiel comme du secteur tertiaire. Celle-ci a pour objectif de diminuer l'impact sur le climat des bâtiments neufs en prenant en compte l'ensemble des émissions du bâtiment sur son cycle de vie, dès la construction. Cela permettra d'une part d'inciter à des modes constructifs qui émettent peu de gaz à effet de serre ou qui permettent d'en stocker tels que le recours aux matériaux biosourcés. D'autre part, la consommation de sources d'énergie décarbonées sera encouragée, notamment la chaleur renouvelable. Elle a également pour objectif de poursuivre l'amélioration de la performance énergétique et la baisse des consommations des bâtiments neufs. La réglementation ira au-delà de l'exigence de la réglementation actuelle, en insistant en particulier sur la performance de l'isolation quel que soit le mode de chauffage installé et de garantir aux habitants que leur logement sera adapté aux conditions climatiques futures (<https://www.ecologie.gouv.fr/re2020-nouvelle-etape-vers-future-reglementation-environnementale-des-batiments-neufs-plus>).

Depuis de nombreuses années, au fur et à mesure de l'accroissement des exigences des réglementations thermiques, les bâtiments ont vu le renforcement de leur isolation thermique et par conséquent, très souvent, une diminution de leur inertie thermique. Il faut ajouter à cela la favorisation des apports solaires gratuits pour diminuer les consommations énergétiques en période de chauffe. Les bâtiments neufs ou rénovés voient ainsi leurs besoins énergétiques en chauffage fortement diminuer mais il n'est pas rare que ceux-ci présentent des périodes conséquentes d'inconfort durant les périodes d'intersaisons ou en été. Le stockage thermique prend ainsi tout son

sens. Le principe est de stocker l'énergie, en l'occurrence les apports solaires ou l'énergie fatale émise par les équipements notamment, durant les moments les plus favorables climatiquement de la journée (température extérieure plus élevée, apports solaires directs) où les besoins sont les plus faibles voire inexistantes afin de les restituer aux instants adéquats. Le stockage thermique permet ainsi d'éviter le pic de demande d'énergie entre 18h00 et 22h00 (shift demand off-peak en anglais) et de ce fait de limiter les puissances des équipements installés des fournisseurs d'énergie (surpuissance qui impactent défavorablement le coût de l'énergie). D'un autre côté, le stockage de l'énergie surabondante en journée limite les surchauffes dans les bâtiments et les situations d'inconfort.

Le sujet de thèse consiste à travailler sur le stockage de l'énergie thermique par l'intermédiaire des matériaux à changement de phase (MCP) qui permettent une densité de stockage plus importante que les matériaux "classiques" ne stockant que l'énergie que sous forme sensible. Ce sujet fait l'objet de nombreux travaux de recherches et de possibilités d'applications et notamment dans le domaine du bâtiment (K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, C. Castelain, A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications, *Journal of Energy Storage*. 33 (2021) 101913. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101913> ; hal-02965149).

Les MCP traditionnels comme les paraffines qui sont issues de la chimie du pétrole présentent un comportement bien connu [Zalewski, 2019], mais ils pourront difficilement être valorisés à l'avenir pour des raisons environnementales. D'autres types de MCP semblent beaucoup plus intéressants sur cet aspect environnemental, comme les acides gras ou certains mélanges. Néanmoins, ces matériaux présentent des comportements thermodynamiques complexes (surfusion, recalescence [Beaupere, 2020], plusieurs pics de fusion ou solidification) qui rendent difficile leur modélisation, et donc l'optimisation de composants ou systèmes intégrant ces matériaux. La caractérisation thermophysique de ces matériaux présente des intérêts scientifiques certains (A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations, Y Dutil, DR Rousse, NB Salah, S Lassue, L Zalewski, *Renewable and sustainable Energy reviews* 15 (1), 112-130, 437 citations Scopus, 637 Google scholar) et nécessaire aux dimensionnements et développement des applications de stockage d'énergie latente.

2) L'état du sujet dans le laboratoire d'accueil.

Le stockage de l'énergie au travers de l'étude des matériaux à changement de phase est un sujet de recherche actif depuis plus de quinze années au sein du LGCgE. Les travaux de recherche menés sur les matériaux à stockage d'énergie latente ont débuté dans le cadre du projet ANR PREBAT "INPASOL" (2005-2008). La problématique du projet était déjà de valoriser les apports solaires par l'intermédiaire de murs solaires dont la paroi stockeuse était constituée de MCP (sels hydratés). Ce projet ANR mené en collaboration avec un bailleur social (Pas-de-Calais Habitat) visait également à valoriser les énergies renouvelables (solaire thermique), d'augmenter l'efficacité énergétique des bâtiments, de lutter contre la précarité énergétique et d'assurer des conditions de vie confortable et saine pour les locataires. Les derniers travaux en lien avec ce sujet concernaient la thèse de LEANG Eng-hok (10/2015-03/2019), financée pour moitié par la Région et l'Université d'Artois. Cette thèse a fait l'objet de 3 publications internationales de rang A, 2 publications dans des congrès internationaux et 4 participations à des congrès nationaux. Ces travaux nous ont également permis d'intégrer le groupe de chercheurs de la Fédération de recherche sur l'énergie solaire Fedésol (<https://www.fedesol.cnrs.fr/>) dans la thématique "Bâtiment solaire" et puis à l'heure actuelle dans le groupe thématique "stockage de l'énergie" [1].

Lors de ce premier projet ANR, nous nous sommes déjà confrontés à la problématique de la caractérisation des MCP. Un projet ANR avait, sur cette idée, été déposé et accepté en collaboration avec les équipes de recherche du LaTEP (PAU) et le CETHIL (LYON). Le projet ANR Stock_E "MICMCP" a été réalisé de décembre 2010 à novembre 2014. Ce projet ayant pour titre "Utilisation de Méthodes d'Identification pour la Caractérisation de Matériaux à Changement de Phase ("MICMCP")" avait pour objectif de proposer une méthode fiable de caractérisation des MCP afin d'estimer leurs propriétés thermophysiques et notamment la fonction régissant l'évolution de leur enthalpie en fonction de la température.

La méthode peut s'appliquer à différentes échelles, au MCP seul ou à un matériau composite intégrant un MCP. La première étape consiste à mettre en place un protocole basé sur une méthode d'inversion en s'appuyant à la fois sur un modèle numérique et sur des mesures expérimentales. Cette méthode est soit appliquée à des mesures de calorimétrie (DSC) faisant intervenir des échantillons microscopiques (quelques mg de PCM seul) soit à des mesures réalisées au moyen d'un banc d'essai fluxmétrique (dispositif développé au LGCgE) sur des échantillons macroscopiques (matériau composite) à des dimensions telles qu'ils seront mis en œuvre (dimension 25x25cm² jusqu'à 100x100 cm²) et plus représentatives des conditions d'utilisation réelle. Ce projet a produit 14 articles dans des journaux Internationaux de rang A, 16 conférences Internationales et 10 Nationales. Le LGCgE a réalisé des avancées significatives sur le sujet et suite à ces travaux, une thématique "Stockage de l'énergie" (Resp : ZALEWSKI L.) est identifiée dans l'équipe "Habitat" du LGCgE. Les publications marquantes dans le cadre de ce projet pour le LGCgE sont [2,3].

Suite à ce travail, un projet d'actions d'initiatives régionales pour la recherche (AIRR) volet "Start-AIRR" a été initié. Le Projet "TESTE" (Textile à capacité de stockage d'énergie améliorée pour le bâtiment" 12/2016-05/2018 en collaboration avec le Gemtex (génie des matériaux textile), laboratoire de recherche de l'ENSAIT et avec le soutien du pôle de compétitivité Up-tex. Les objectifs de ce projet de 14 mois (2017) était de valider la faisabilité d'intégration d'un MCP microencapsulé dans un matériau textile qui aurait la fonction d'écran sous toiture, d'identifier par modélisation quelles sont les caractéristiques d'un MCP microencapsulé pouvant bloquer les apports de chaleur dans un bâtiment sous des conditions météorologiques prédéfinies. Les premières simulations réalisées ont montré que l'efficacité de cet écran sous toiture n'était pas probante (1 publication dans Congrès Int).

En 2016, Laurent ZALEWSKI a été sollicité par le CEA de Grenoble en vue de diriger une thèse de label "sujet phare" du CEA. Ce doctorat intitulé : " Pilotage de la libération de la chaleur et étude du vieillissement de matériaux

à changement de phase (MCP)" a été financé à 100% par le CEA et a été réalisé par Noé BEUPERE (11/2019-11/2019). Le sujet consistait à étudier des MCP présentant un large degré de surfusion (phénomène se produisant lorsque le matériau reste liquide en dessous de son point de fusion pendant son refroidissement). Cette surfusion est généralement perçue comme un obstacle au développement d'applications mais cependant, elle pourrait devenir un atout si un moyen efficace était développé pour déclencher une libération de chaleur à la demande. L'intérêt est de récupérer l'énergie aux moments souhaités (mettre en adéquation les besoins avec les ressources ENR) par une cristallisation répétable. L'acétate de sodium trihydraté (AST, $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) a tout d'abord été sélectionné parmi différents MCP. Un banc expérimental original a ensuite été développé qui intègre une sonde à ultrasons externe pour déclencher la cristallisation à la demande. Le banc expérimental fluxmétrique du LGCgE a permis d'étudier les caractéristiques de l'AST et d'étudier les phénomènes de surfusion et de recalescence (remontée en température au moment de la nucléation) [4,5]. Ces travaux ont fait l'objet de 4 publications Int., 1 publication dans congrès Int et 1 dans un congrès Nat. Parmi celles-ci, une publication commune avec les chercheurs participants à l'annexe de l'IEA SHC (Solar Heating & Cooling) tâche 58 de l'annexe 33 "Material & Components for Thermal Energy Storage" [6].

Depuis octobre 2018, un travail de thèse intitulé "Caractérisation et modélisation d'enduits thermorégulants intérieurs, contenant des matériaux à changement de phase biosourcés, pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments" co-financé par l'Université d'Artois et Entreprise WINCO est mené. La soutenance est prévue pour la première moitié de 2022. Ce travail concerne l'étude d'un nouvel enduit intérieur, composé de plâtre et d'un nouveau MCP biosourcé à base d'huiles végétales 100% recyclables développé par la société MCI. Là encore dans ce travail, nous sommes confrontés au problème de la caractérisation du matériau et de l'établissement d'un modèle numérique qui puisse reproduire de façon fiable le comportement thermique de l'enduit. Les MCP commerciaux sont rarement des produits purs, car trop chers, et sont souvent des mélanges de plusieurs MCP afin d'obtenir un produit qui soit adéquat, en termes de température de fusion et chaleur latente, pour une application bien précise. En l'occurrence le matériau composite (MCPs+plâtre) étudié présente plusieurs pics d'énergie et de la surfusion, ce qui n'a pas facilité le travail.

Depuis janvier 2019, Le LGCgE est partenaire du Projet ANR de Recherche Collaborative – Entreprise (PRCE) "EUROPA" (Échangeur stockeur ultra- compact à changement de phase) (Appel à projets générique 2018 CE05 - Une énergie durable, propre, sûre et efficace) pour une durée 48 mois avec le LOCIE, le CEA/INES (Chambéry), et deux entreprises SMCI (Sainte Marie Constructions Isothermes / R&D) et DATE (Devel Applic Tech Energie).

Le projet EUROPA cible ainsi un stockage de chaleur ultra-compact pour la production d'eau chaude qui constitue un poste important de consommation dans les nouveaux bâtiments résidentiels. Ce projet a pour objectif de développer un concept innovant de stockage et d'échange thermique, qui soit à la fois modulaire, ultra-compact et de coût limité. Le LGCgE est chargé d'évaluer les propriétés thermophysiques du stockage (conductivités, capacités thermiques, et chaleur latente), de déterminer des lois de comportement adimensionnelles des cavités et modules, d'évaluation de l'effet d'intensification des transferts par les ailettes (échange direct + stockage dans les cas de la charge/décharge seules et simultanées).

Des progrès ont été réalisés sur la modélisation du comportement thermodynamique des MCP (ANR EUROPA) conduisant à une nette amélioration des modèles. Les méthodes inverses appliquées à des échantillons relativement volumineux (briquettes/essais LGCgE) ont permis de déterminer les principales caractéristiques thermodynamiques et de valider les modèles de stockage de MCP sans surfusion (Paraffine RT58) [7,8]. Cette approche trouve néanmoins ses limites par la non prise en compte précise des dynamiques d'apparition et de disparition des structures cristallines dans le cas de matériaux présentant de la surfusion (cas du PEG6000 étudié dans le projet EUROPA [9]).

En synthèse, le LGCgE a développé un dispositif expérimental (banc fluxmétrique) et des protocoles de mesures qui, couplés à des méthodes numériques inverses, permettent de déterminer la courbe enthalpique du matériau composite tel qu'il sera mis en œuvre (matériaux macro et micro-encapsulé). Une fonction objectif est définie en comparant le flux thermique numérique et expérimental et minimisée en adaptant la valeur des coefficients thermodynamiques. La méthode permet ainsi de reconstruire une fonction d'état qui respecte les principes de base de la thermodynamique (notamment l'indépendance en fonction de la vitesse de chauffe/refroidissement de l'échantillon) contrairement à l'ensemble des autres méthodes couramment utilisées dans le domaine. Cette courbe enthalpique se base sur les lois thermodynamiques et permet de reproduire de façon fiable le comportement thermique du matériau lors des processus de stockage (fusion du MCP) ou de déstockage (solidification du MCP). Ceci implique de déterminer ses propriétés thermophysiques (conductivités et capacités calorifiques sensibles (MCP à l'état solide et liquide), chaleur latente, surfusion, etc.). Cette méthode a montré ses limites pour les matériaux présentant de la surfusion.

3) Les objectifs visés, les résultats escomptés.

Le sujet de thèse permettra de compléter les méthodes de caractérisation déjà mises en œuvre mais sur des matériaux plus complexes et de traiter des cas spécifiques. L'objectif est de développer et de renforcer les méthodes de caractérisation du LGCgE. Dernièrement des études sur des parois de bâtiments bio-sourcées ont permis de développer des méthodes numériques de caractérisation plus avancées (études de sensibilité des paramètres, optimisation multi-objectifs, etc.) [10]. Nous envisageons de les mettre en œuvre pour les matériaux à changement de phase.

Les études menées dans la thèse de Noé BEUPERE, ont mis en évidence les phénomènes de surfusion ainsi que les quantités d'énergie importantes mises en jeu lors de la solidification des MCP surfondus. Ceci se traduit par une remontée en température du matériau à cet instant (recalescence). Peu d'études sont effectuées sur ces phénomènes. Les MCP intéressants d'un point de vue environnemental pour le stockage de chaleur font souvent apparaître le phénomène de surfusion. Souvent les chercheurs identifient ce phénomène de surfusion par un hystérésis entre les processus de fusion et solidification. Cette approche introduit des difficultés importantes pour modéliser correctement les cycles de fusions et solidifications partielles et conduit à des bilans énergétiques incorrects et de ce fait à des dimensionnements ou des évaluations d'efficacité de systèmes erronées. Nous pensons qu'il est nécessaire de prendre en compte simultanément la nature de la structure du matériau et son comportement thermodynamique pour modéliser correctement les phénomènes. Des cinétiques de cristallisation doivent certainement être mises en place dans les modélisations pour prendre en compte ces phénomènes de surfusion qui impactent la structure du matériau.

Le LGCgE possède le matériel nécessaire à ces études (Matériel de calcul, banc fluxmétriques, PIV laser). Les résultats escomptés sont de continuer à développer les méthodes de caractérisation des matériaux, de développer des modèles numériques capables de reproduire les comportements thermiques des matériaux à changement de phase présentant des phénomènes de surfusion. La fiabilité de ces modèles est nécessaire aux développements des applications de stockage de l'énergie thermique latent dans le domaine du bâtiment et dans le secteur industriel.

4) Le programme de travail avec les livrables et l'échéancier prévisionnel.

Le doctorant devra dans un premier temps prendre connaissance des travaux réalisés précédemment au sein du laboratoire ainsi que des travaux disponibles dans la littérature scientifique ou appliquée dans le domaine des matériaux à changement de phase et de méthodes numériques inverses et d'optimisation.

Dans un second temps et simultanément, les essais de caractérisation en laboratoire seront réalisés sur des matériaux sélectionnés en fonction de l'étude bibliographique ou des applications de projets qui pourraient être connexes au sujet de thèse (ANR Europa en cours, Projet ANR CRITHER (déposé en oct. 2021 par exemple).

A partir des mesures expérimentales réalisées, un modèle numérique sera développé afin de pouvoir déterminer par méthodes inverses la fonction d'état qui respecte les principes de base de la thermodynamique (notamment l'indépendance en fonction de la vitesse de chauffe/refroidissement de l'échantillon). Des cinétiques de cristallisation seront étudiées pour améliorer les modèles existants pour les cas des MCP présentant de la surfusion. En fonction de l'avancement des travaux, ces modèles pourront être testés et évalués pour le cas d'un stockage d'énergie réel (module de stockage développé dans le cadre du projet ANR EUROPA).

	2022	2023				2024				2025		
	4 ^{ème} trim.	1 ^{er} trim.	2 ^{ème} trim.	3 ^{ème} trim.	4 ^{ème} trim.	1 ^{er} trim.	2 ^{ème} trim.	3 ^{ème} trim.	4 ^{ème} trim.	1 ^{er} trim.	2 ^{ème} trim.	3 ^{ème} trim.
Tâche n°1 : Prise de connaissance du sujet - Recherches bibliographiques	[Barre bleue couvrant toute la durée de la période]											
Tâche 1.1. : MCP biosourcés, surfusion, cinétique de cristallisation	[Barre bleue couvrant toute la durée de la période]											
Tâche 1.2. : Méthodes de caractérisation, modèles numériques et optimisation	[Barre bleue couvrant toute la durée de la période]											
Tâche n°2 : Caractérisation expérimentale	[Barre bleue couvrant toute la durée de la période]											
Tâche 2.1. : Réalisation des essais / Traitement des données	[Barre bleue couvrant toute la durée de la période]											
Tâche n°3 : Modélisation et caractérisation numérique	[Barre bleue couvrant toute la durée de la période]											
Tâche 3.1. : Développement du modèle numérique et méthodes d'optimisation	[Barre bleue couvrant toute la durée de la période]											
Tâche 3.3. : Modélisation à l'échelle du matériau	[Barre bleue couvrant toute la durée de la période]											
Tâche n°4 : Simulation thermique stockage (possiblement)	[Barre bleue couvrant toute la durée de la période]											
Tâche 4.2. : Simulations : évaluat ^o efficacité énergétique stockage en fct du MCP	[Barre bleue couvrant toute la durée de la période]											
Tâche n°5 : Valorisation des résultats / rédaction thèse	[Barre bleue couvrant toute la durée de la période]											

5) Les collaborations prévues (préciser le cadre, la nature des collaborations, l'ancrage régional, national, international, la transdisciplinarité éventuellement).

Le projet ANR EUROPA en cours devrait s'achever mi-2023 (fin 2022 + 6 mois liés au COVID). Les chercheurs du LGCgE travaillent dans ce projet tout particulièrement en collaboration avec le LOCIE ((Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement, Université Savoie Mont Blanc) sur les problèmes de caractérisation des MCP. Au cours de ce projet, nous avons mis en évidence les limites des modèles actuels. Pour cette raison, nous avons déposé fin 2021 avec le LOCIE, en collaboration avec le LaTEP (Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés, Université de Pau et des Pays de l'Adour) et le CETHIL (Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon, INSA de Lyon), une pré-proposition d'ANR sur cette thématique.

Dans le cadre du groupe de chercheurs de la Fédération de recherche sur l'énergie solaire "Fédésol" (<https://www.fedesol.cnrs.fr/>), ces travaux s'intégreront dans la thématique "stockage de l'énergie". Nous avons participé à la rédaction d'un document qui fait un état des lieux de nos réflexions concernant des thématiques prospectives du CNRS : ARPEGE stockage (comprenant le stockage électrique, le stockage thermique et le stockage mécanique). Les principaux points ont été présentés lors du colloque ENERGIE 2021 du CNRS (7/12/2022).

Depuis 2014, le LGCgE participe par l'intermédiaire de Laurent ZALEWSKI (<https://task58.iea-shc.org/participants>) aux travaux de l'Agence Internationale de l'Énergie dans le programme "Solar Heating & Cooling" tâche 58 (Task 58 | Material & Components for Thermal Energy Storage). Une nouvelle tâche vient d'être

lancée en octobre 2021 : Task 67 | Compact Thermal Energy Storage Materials (<https://task67.iea-shc.org/about>). Nous sommes intégrés aux travaux de la Subtask A: Material Characterization and Database ainsi que dans la Subtask E: Effective Component Performance with Innovative Materials (<https://task67.iea-shc.org/subtasks>).

Ce projet de thèse permettra de renforcer les collaborations avec les chercheurs de l'UCCS de Lens sur des aspects matériaux, caractérisation avec DSC et aussi sur la possibilité de regarder la structure des MCP (microscope électronique) en fonction des sollicitations thermiques.

6) Une liste de 10 publications maximum portant directement sur le sujet en soulignant celles du laboratoire.

- [1] B. Stutz, N. Le Pierres, F. Kuznik, K. Johannes, E. Palomo Del Barrio, J.-P. Bédécarrats, S. Gibout, P. Marty, L. **Zalewski**, J. Soto, N. Mazet, R. Olives, J.-J. Beziau, D.P. Minh, Storage of thermal solar energy, Comptes Rendus Physique. 18 (2017) 401–414. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.09.008>.
- [2] **L. Zalewski**, E. Franquet, S. Gibout, **P. Tittlein**, **D. Defer**, Efficient Characterization of Macroscopic Composite Cement Mortars with Various Contents of Phase Change Material, Applied Sciences. 9 (2019) 1104. <https://doi.org/10.3390/app9061104>.
- [3] **A. Joulin**, **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. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.027>.
- [4] **N. Beaupere**, U. Soupremanien, **L. Zalewski**, Experimental measurements of the residual solidification duration of a supercooled sodium acetate trihydrate, International Journal of Thermal Sciences. 158 (2020) 106544. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106544>.
- [5] **N. Beaupere**, U. Soupremanien, **L. Zalewski**, Influence of Water Addition on the Latent Heat Degradation of Sodium Acetate Trihydrate, Applied Sciences. 11 (2021) 484. <https://doi.org/10.3390/app11020484>.
- [6] C. Rathgeber, S. Hiebler, R. Bayón, L.F. Cabeza, G. Zsembinszki, G. Englmaier, M. Dannemand, G. Diarce, O. Fellmann, R. Ravotti, D. Groulx, A.C. Kheirabadi, S. Gschwander, S. Höhle, A. König-Haagen, **N. Beaupere**, **L. Zalewski**, Experimental Devices to Investigate the Long-Term Stability of Phase Change Materials under Application Conditions, Applied Sciences. 10 (2020) 7968. <https://doi.org/10.3390/app10227968>.
- [7] M. Thonon, G. Fraisse, **L. Zalewski**, M. Pailha, Towards a better analytical modelling of the thermodynamic behaviour of phase change materials, Journal of Energy Storage. 32 (2020) 101826. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101826>.
- [8] M. Thonon, **L. Zalewski**, S. Gibout, E. Franquet, G. Fraisse, M. Pailha, Experimental Comparison of Three Characterization Methods for Two Phase Change Materials Suitable for Domestic Hot Water Storage, Applied Sciences. 11 (2021) 10229. <https://doi.org/10.3390/app112110229>.
- [9] M. Thonon, G. Fraisse, **L. Zalewski**, M. Pailha, Analytical modelling of PCM supercooling including recalescence for complete and partial heating/cooling cycles, Applied Thermal Engineering. 190 (2021) 116751. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116751>.
- [10] **E. Biteau**, **D. Defer**, **F. Brachelet**, **L. Zalewski**, Active Thermal Method Applied to the In Situ Characterization of Insulating Materials in a Wall, Buildings. 11 (2021) 578. <https://doi.org/10.3390/buildings11120578>.

ARGUMENTAIRE DU DIRECTEUR DE THESE

En quoi le sujet répond à l'un au moins des critères de priorisation de la Région ? cf. Délibération de lancement de l'appel à projets Allocations n° 2021.02022 du 23 novembre 2021 <https://delibinternet.hautsdefrance.fr/>

En quoi le sujet participe à la structuration de la recherche en Région ? Indiquer si le sujet contribue ou non à un programme régional en cours ou envisagé, *notamment un projet déposé au CPER 2021-2017*, si le sujet est lié à l'arrivée d'un chercheur en région, à la création d'une nouvelle équipe, à un rapprochement d'équipes, à un projet collaboratif etc...

En quoi le sujet s'inscrit dans les priorités du cofinanceur sollicité ?

Pour les sujets en lien avec un partenariat public-privé ou un partenariat entre plusieurs laboratoires publics, quelles sont les modalités du partenariat ? nature, moyens, propriété, partage et diffusion des résultats, encadrement et localisation du doctorant...

En quoi le sujet pourrait être valorisé dans un cadre national, européen, international ? conférences, publications
Quelles sont les perspectives de valorisation, de transfert et d'innovation sur le territoire des Hauts-de-France ?

Le projet contribue-t-il à la Stratégie Recherche Innovation de la région (S3) ? Si oui, pour quel Domaine d'Activité Stratégique ? D'une façon plus générale, quelles sont les retombées socio-économiques pour le territoire régional ?

https://delibinternet.hautsdefrance.fr/Docs/CommissionPermanente/2021/02/04/DELIBERATION/2021.00280_annexe.PDF

Le sujet peut-il ou non contribuer à la Troisième Révolution Industrielle (TRI) ? cf

Référentiel sur la TRI enseignement supérieur et recherche <https://rev3.fr/enseignement-superieur-recherche/>

Les Hauts-de-France pionniers d'une économie durable et connectée

https://rev3.fr/wp-content/uploads/sites/7/2020/09/REV3_2020_BROCHURE_A4-23.pdf

Feuille de route Hydrogène <https://www.hautsdefrance.fr/hydrogene-filiere-davenir/>

Feuille de route Economie circulaire

https://delibinternet.hautsdefrance.fr/Docs/CommissionPermanente/2020/11/19/DELIBERATION/2020.02126_annexe.PDF

Le sujet peut-il contribuer à développer la bioéconomie en région ? cf. master plan délibération n° 2018.1233 bioéconomie <https://www.hautsdefrance.fr/categorie/dossiers/bioeconomie/>

Le sujet peut-il contribuer à développer l'intelligence artificielle ?

<https://www.hautsdefrance.fr/humain-lambition-des-hauts-de-france-pour-une-intelligence-artificielle-au-service-des-habitants/>

Le sujet de thèse proposé s'inscrit dans le cadre des objectifs du Schéma Régional de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, qui visent notamment à structurer, valoriser et renforcer l'excellence et la lisibilité de la recherche sur l'ensemble du territoire régional. Ces travaux permettront également de montrer au niveau national et international que la Région des Hauts-de-France investit dans la recherche.

Il s'inscrit dans les enjeux de recherche prioritaires pour la région de la "Troisième révolution industrielle : transition énergétique" en ce qui concerne les nouveaux modes de stockage et de consommation de l'énergie, l'utilisation rationnelle des ressources par l'amélioration de l'efficacité énergétique. Il s'inscrit également dans la thématique "Energie" inscrite dans la Stratégie de Recherche Innovation pour une Spécialisation Intelligente (SRI-SI). L'aspect social de la lutte de la précarité énergétique via ces modes de stockages qui visent à réduire le coût de l'énergie supporté par les locataires dans le résidentiel ou le tertiaire est aussi un paramètre à prendre en compte.

Le sujet contribue à la Troisième Révolution Industrielle (TRI) en favorisant le développement régional des compétences par les enseignants chercheurs du LGCgE en matière de transition énergétique et des innovations technologiques. Ces enseignants chercheurs forment les doctorants du laboratoire ainsi que les étudiants des formations en génie civil de la Faculté des Sciences Appliquées de de l'université d'Artois à Béthune. Les étudiants particulièrement concernés sont ceux de la Licence Professionnelle : Construction durable, performance et comportement énergétiques ou encore le Master professionnalisé : Bâtiment Durable, Efficacité Energétique (BDEE) ; tous deux en formation initiale et en apprentissage.

En ce qui concerne la valorisation du sujet, celui pourra se faire dans le cadre des collaborations du laboratoire (projet ANR, de la Fédération de recherche sur l'énergie solaire (Fédésol) ou des travaux de l'Agence Internationale de l'Énergie dans le programme "Solar Heating & Cooling" (cf détails plus haut). Ces travaux sont une opportunité de publications pour le LGCgE dans des revues internationales, lors de congrès nationaux ou internationaux et ainsi consolider sa reconnaissance dans des thématiques de recherche porteuses et ayant des applications directes en vue de contribuer à la troisième révolution industrielle.

Ce sujet est en amont des sujets de recherche précédemment proposés. Néanmoins, il est en lien direct avec des applications de stockage d'énergie pour le bâtiment. Il pourra trouver des applications dans le stockage de l'énergie des constructions, pour l'ECS et ainsi répondre à l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Ces travaux constituent un intérêt certain pour l'Université d'Artois puisque que ces travaux s'inscrivent dans le premier de ses trois Domaines d'Intérêt Majeur (DIM) qui est : L'éco-efficacité énergétique : Habitat, Logistique, Systèmes électriques.

Fait à, Béthune

Le 3 janvier 2022

*Prénom, Nom du Directeur de Thèse
Laurent ZALEWSKI*

Signature

