

PROPOSITION DE SUJET POUR UN CONTRAT DOCTORAL

<p>Laboratoire LASIE (Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement)</p>
<p>Titre de la thèse LASIE (Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement)</p>
<p>Direction de la thèse <i>directeur-trice-s (grade, HDR) et éventuels co-directeur-trice-s</i> Marie DUQUESNE (80%, La Rochelle Université, LaSIE) Thierry DUFORESTEL (20%, EDF)</p>
<p>Adéquation scientifique avec les priorités de l'établissement</p> <p>Les activités de recherche proposées dans le cadre de cette thèse ont pour objectif de contribuer à améliorer les performances énergétiques des bâtiments existants. Le bâtiment est un secteur particulièrement énergivore, avec un parc vieillissant qui nécessite une amélioration pour diminuer les besoins de chauffage et de rafraîchissement. L'augmentation à la fois de la fréquence et de l'amplitude des vagues de chaleur nous amène tout naturellement à centrer les activités de cette thèse sur le rafraîchissement des bâtiments. Par ailleurs, face aux enjeux énergétiques, environnementaux (réchauffement climatique) et économiques (augmentation du prix de l'énergie), il faut œuvrer pour une nouvelle gestion de l'énergie et repenser les émetteurs de froid afin d'apporter de la flexibilité au système de gestion de l'électricité. Il s'agit d'axes essentiels pour réussir la transition énergétique, pour réhabiliter les bâtiments, réduire les îlots de chaleur urbains qui sont déjà bien identifiés sur la ville de La Rochelle. Cela est d'autant plus prégnant pour les villes littorales à cause du tourisme de masse de certaines périodes qui a pour effet d'augmenter drastiquement le nombre d'usagers et donc les consommations énergétiques.</p> <p>Dans ce contexte, les travaux proposés ici visent à contribuer au développement d'une nouvelle génération de plafonds rafraîchissants intégrant des technologies de stockage d'énergie. L'apport original de ces travaux est le développement de matériaux composites qui constitueront ces plafonds innovants pour favoriser la décarbonation du rafraîchissement des bâtiments favorisant ainsi la durabilité des espaces bâtis.</p>
<p>Descriptif du sujet <i>(enjeux scientifiques, applicatifs, sociétaux...)</i></p> <p>Ce projet est transverse, à l'interface de nombreuses disciplines et intègre des activités de recherche numériques et expérimentales à différentes échelles combinant des sciences fondamentales et appliquées. Le développement de technologies innovantes de plafonds rafraîchissants intégrant une solution de stockage latent passe nécessairement par une attention particulière à l'échelle du matériau (Figure 1). Les matériaux développés seront des matériaux composites constitués d'une matrice support (gyroïde réalisée en fabrication additive) biosourcée voire si possible active (matériau à changement de phase solide-solide, MCP S-S) contenant un matériau à changement de phase liquide-solide (MCP L-S). Ces matériaux composites joueront un rôle actif dans le stockage/déstockage de froid et feront bénéficier le plafond rafraîchissant d'une inertie importante ce qui permettra d'optimiser l'utilisation de la climatisation en termes de puissance installée voire d'effacement de pointe de consommation.</p>
<p>The figure illustrates a cooling ceiling system with thermal energy storage. On the left, a 3D cutaway shows a hydraulic cable connected to a ceiling structure containing MCP (Microcapsules) and Gyroïde. In the center, a 'Serpentin' (serpentine) coil is shown. On the right, a 'Capsule de MCP' is shown, containing MCP solide-liquide and MCP solide-solide. Below these is a graph of 'Température plafond (°C)' vs 'Temps (heures)'. The graph shows a temperature profile over 24 hours, with a peak during the day. A red shaded area indicates the 'Activation de la PCM' (Phase Change Material) during the day, with labels for 'Fusion' and 'Cristallisation'.</p>
<p>Figure 1. Plafond rafraîchissant intégrant une solution de stockage d'énergie thermique.</p>

Originalité et réalisations scientifiques du projet

Les systèmes de climatisation des bâtiments tertiaires sont composés de pompes à chaleur (PAC) souvent réversibles afin de contrôler la température intérieure des pièces. Ce type de systèmes dispose généralement de peu d'inertie et ne permet pas le décalage des besoins en froid et de la consommation d'énergie. La sensation de confort thermique dépend des températures des parois et de l'air sachant que les échanges par rayonnement et convection sont favorisés avec un plafond (absence de meubles, de tapis...). Par ailleurs, les plafonds rafraîchissants sont favorables aux échanges convectifs ce qui permet de disposer de la puissance de refroidissement adéquate avec un risque de condensation superficielle faible. Pour cette étude, nous nous focaliserons sur le développement de matériaux composites éco-responsables en vue de leur intégration dans un plafond rafraîchissant. Ces matériaux seront composés d'un support biosourcé permettant le passage du fluide rafraîchissant (ex : eau) et d'un matériau à changement de phase (MCP). Le dimensionnement du matériau et du plafond sera optimisé en faisant appel à des méthodes numériques idoines. Le système sera hybride ce qui veut dire qu'il fonctionnera de manière passive (refroidissement grâce à la fusion du MCP) avec l'utilisation possible d'une pompe à chaleur les jours de l'année où les températures seront trop élevées pour recristalliser les MCP donc pour reconstituer le stock de froid. Pour cela, un module de contrôle sera intégré pour piloter la pompe à chaleur en fonction des conditions extérieures et intérieures.

Positionnement du projet par rapport à l'état de l'art

Dans ce projet, nous nous intéressons aux MCP organiques à faible surfusion. Ces derniers sont stables au cyclage (fusion non congruente), changent de phase à des températures quasi-constantes et ne sont pas corrosifs. Ils permettent également de couvrir une plage de températures de changement de phase en adéquation avec l'application envisagée. Dans une logique d'économie circulaire, la sélection de MCP L-S répondant au cahier des charges passera en premier lieu par l'identification d'entreprises locales générant des résidus valorisables (déchets et co-produits : huiles végétales et animales) qui contiennent des acides gras ainsi que leurs dérivés. Composés à plus de 75% par des acides gras, ces résidus possèdent des propriétés de stockage et des températures de transition adaptées à l'application [1].

Le développement des MCP composites a pour objectif d'améliorer les performances des MCP traditionnels et de faciliter leur manipulation ainsi que leur intégration aux applications ciblées. Les matériaux composites envisagés dans ce projet sont des matériaux hétérogènes composés d'une matrice support biosourcée (gyroïde ou capsule) permettant l'optimisation du transfert de chaleur entre un fluide et le MCP L-S sans mélange ni fuite.

Des techniques de type FDM (Fused Deposition Modelling) d'impression 3D seront employées pour la fabrication d'une gyroïde, matrice support architecturée, par déposition d'un filament. Ce dernier sera dans un premier temps formé d'un bioplastique (Acide polylactique (PLA) + fibres végétales (lin et bois) [2]). Dans un deuxième temps, un filament contenant du MCP sera élaboré (mélange du MCP + PLA + fibres végétales avant extrusion). Ce filament sera utilisé en impression 3D et permettra la conception d'une matrice support (gyroïde) active au sens du stockage de froid. Cette technique permettra d'obtenir et d'optimiser les topologies des éléments de parois en maximisant les surfaces d'échanges entre le fluide caloporteur et le MCP. L'objectif est d'augmenter notablement les propriétés thermiques et hydriques.

Enfin, dans le domaine des MCP, les simulations des transferts thermiques avec prise en compte de la convection sont rares et centrées sur des géométries simples [3]. De manière plus générale, les simulations du changement de phase n'abordent que très peu des morphologies complexes [4]. Une étude numérique aux différentes échelles, prenant en compte ces aspects, sera donc également réalisée.

Contexte partenarial (cotutelle internationale, EU-CONEXUS, partenariat avec un autre laboratoire, une entreprise...)

Le (ou la) doctorant(e) intégrera une équipe pluridisciplinaire composée de divers spécialistes en termes d'analyses du cycle de vie (ACV), de revalorisation des déchets, de traitement de données (images et signaux), de modélisation thermodynamique, de sciences des matériaux et chimistes etc. (**LaSIE UMR CNRS 7356, I2M UMR CNRS 5295, ISM UMR CNRS 5255**).

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une **collaboration internationale** avec le CICenergiGUNE (Vitoria, Espagne, Elena Palomo de Barrio <https://cicenergigune.com/en/elena-palomo-del-barrio#>).

Enfin, ces activités de recherche s'intègrent au sein du Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE - UMR CNRS 7356) et du Laboratoire commun 4eVLab (Laboratoire pour l'Efficacité Energétique et Environnementale de l'Enveloppe et des Villes, Laboratoire commun EDF R&D - La Rochelle Université CNRS - LaSIE). Elles portent sur le développement et l'étude d'enveloppes du bâtiment innovantes et durables à l'aide d'une solution de stockage d'énergie nécessitant le développement puis la caractérisation des matériaux hétérogènes associés.

Impacts (scientifiques, technologiques, socio-économiques, environnementaux, sociétaux...)

Les résultats de cette étude peuvent être exploités dans des domaines distincts : la recherche scientifique, la valorisation/le transfert des travaux de recherche au secteur industriel.

Ce projet est transverse, à l'interface de différentes disciplines/axes du LaSIE et intègre des activités de recherche numériques et expérimentales à différentes échelles (adhésifs, assemblage laser, montage avec boîtier).

Une part importante de la valorisation des résultats se trouvera dans le domaine industriel. La labellisation « Science Avec et Pour la Société » (SAPS) est un des axes structurants de La Rochelle Université dans lequel ce projet s'inscrit complètement. Dans ce cadre, une capsule vidéo sera réalisée grâce au studio accessible à LRUUniv pour présenter les développements les travaux réalisés. Après validation par les partenaires du projet, cette vidéo sera mise en ligne sur la plateforme de vidéos de LRUUniv, présentées aux collectivités territoriales et aux industriels (<https://www.univ-larochelle.fr/luniversite/nos-partenariats-avec-le-monde-socio-economique/collaboration-filieres-socio-eco/>).

Le (ou la) doctorant(e) participera à MT180 et/ou au « Festival du film pas trop scientifique » de manière à diffuser et à vulgariser les principaux résultats de ses travaux de thèse. Des actions de médiation culturelle seront également proposées à Cap Sciences (e.g Nuit européenne des chercheurs) à Bordeaux. De manière générale, les actions de diffusion se reposeront sur les services de communication de LRUUniv.

Programme de travail du (ou de la) doctorant (e) (tâches confiées)

1. Définition du cahier des charges, étude et sélection des matériaux

Définition des spécifications des matériaux en fonction des températures d'usage et des besoins des usagers

Le cahier des charges devra considérer plusieurs échelles : du matériau (densité énergétique, températures des transitions, éco-responsabilité) à l'application (température d'usage, réglementation et confort thermique). Les matériaux choisis ainsi que leur mise en forme devront permettre de gérer localement le problème de changement de volume propre aux MCP et d'améliorer les transferts thermiques. Cette étape nécessitera un état de l'art approfondi.

Etude et sélection des déchets et co-produits, MCP multi-composants complexes

Dans une logique d'économie circulaire, la recherche et la caractérisation complète de MCP simples ou hétérogènes passe par l'identification d'entreprises locales générant des résidus valorisables de type huiles végétales (ex : huiles de friture usagées) et animales (ex : huiles de poissons). Ces déchets et co-produits sont par nature des matériaux multi-composants en raison de leur pureté dégradée. La versatilité de la méthodologie de screening rapide proposée dans [5] sera utilisée pour accélérer les étapes de sélection et de caractérisation (imagerie infrarouge, microscopie, ATG) de ces systèmes multi-composants. Cette tâche permettra la caractérisation de mélanges complexes et un ajustement des propriétés en fonction des composants et de leur interaction, tout en favorisant un gain de temps et de matière donc des économies d'énergie conséquentes.

2. Elaboration et caractérisation de matériaux composites architecturés grâce à des procédés durables et innovants

Elaboration et caractérisation de matériaux composites architecturés grâce à l'impression 3D

Le développement de MCP composites est envisagé. Dans un 1^{er} temps, des éléments des parois (matériaux supports architecturés, gyroïdes) seront imprimés en forte interaction avec les travaux numériques de façon à optimiser la taille, l'épaisseur et la géométrie des parois. Il s'agit ici d'avoir le meilleur transfert thermique tout en assurant l'intégrité structurelle avec du composite « PLA+fibres végétales » puis avec des polyalcools (MCP S-S) via des techniques de fabrication additive. Une géométrie permettant une optimisation de la surface d'échange donc un transfert thermique optimisé entre les fluides (MCP L-S et fluide caloporteur) et une circulation des fluides sans qu'ils ne se mélangent sera sélectionnée.

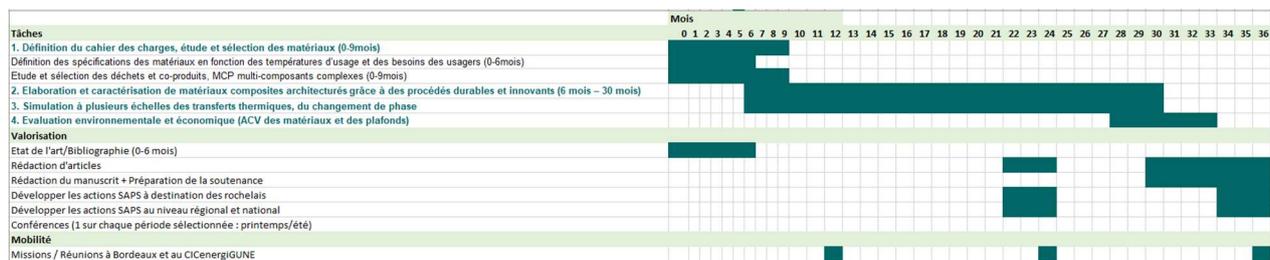
3. Simulation à plusieurs échelles des transferts thermiques, du changement de phase

Les simulations numériques seront effectuées (en forte interaction les résultats expérimentaux permettant l'obtention des données d'entrée via les caractérisations des matériaux). La modélisation du changement de phase sera ajoutée et validée sur des configurations expérimentales de la littérature [3]. Des modèles de changement d'échelle basés sur les propriétés équivalentes des matériaux (prise de moyennes ou techniques d'homogénéisation [6]) seront implémentés pour traduire la remontée d'échelle visée.

4. Evaluation environnementale et économique

Les performances environnementales et économiques (coût de production et coûts spécifiques) des matériaux et des plafonds développés seront évaluées et comparées à celles des systèmes existants. Les impacts environnementaux seront déterminés à partir d'analyses de cycle de vie (ACV) réalisées à différentes échelles : (i) à l'échelle des matériaux MCP et composites. Les données d'inventaire (quantités et types de matières premières, énergie de fabrication ...) seront établies au sein des tâches 2 et 3. Les résultats de l'ACV des matériaux permettront d'identifier les éléments générant le plus d'impacts et éventuellement de comparer différentes formulations afin d'identifier le matériau le plus éco-responsable ; (ii) à l'échelle de l'enveloppe i.e. le plafond, il s'agira d'évaluer les bénéfices environnementaux liés à une consommation énergétique optimisée du bâtiment avec les systèmes développés (WP5), en comparaison avec les solutions existantes. Les ACV seront réalisées avec un ou des logiciels (openLCA, SimaPro ou brightway2) et des bases de données expertes telle qu'ecoinvent). Les coûts économiques seront évalués en parallèle, dans une logique d'évaluation des coûts du cycle de vie.

Calendrier de réalisation



Références bibliographiques

- [1] Sarier, N. and Onder, E., *Thermochimica Acta*, 540, 7-60, 2012.
- [2] Belarbi Y.E., Benmahiddine F., Hamami A.A., Guessasma S., Belhabib S. *Structures. Fibers*, 10 (3), pp.24, 2022.
- [3] Faden M., Konig-Haagen A., Brüggemann D., 12, 868, 2019.
- [4] Lin Y., Luo Y., Li W., Minkowycz W., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 179, 121739, 2019.
- [5] Mailhé C., Gorse S., Thirion B., Palomo E., Duquesne M., *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021, DOI: 10.1007/s10973-021-11091-9, 2021.
- [6] Vel S. S., Goupee A. J., *Computational Materials Science* 48 (2010) 22–38

Accompagnement du (ou de la) doctorant(e) / Fonctionnement de la thèse (*accompagnement humain, matériel, financier, en particulier pour la prise en charge du fonctionnement de la thèse et des dépenses associées*)

Laboratoire commun 4eVLab

Dépôt de projet ANR PRC avec les laboratoires I2M et ISM de l'université de Bordeaux (actuellement en phase 2).