

Étude numérique sur l'intégration des matériaux à changement de phase dans l'isolation

Ancrage : Aujourd'hui, un tiers de la consommation énergétique de la France est utilisée pour le chauffage résidentiel. L'été, en ville, les pics de chaleur plus intenses qu'en banlieue encouragent l'utilisation de climatisations énergivores. Intégrer des matériaux à changement de phase dans l'isolation des bâtiments permet lisser passivement leur température.

Motivation du choix de l'étude: La nécessité de réduire la consommation énergétique pour répondre aux enjeux de réchauffement climatique m'a poussé à étudier l'utilisation de ces matériaux dans les isolations. Pour éviter le surdimensionnement et une production inutile de matériau, je me suis alors proposé de réaliser une simulation numérique d'un mur contenant un MCP.

MCOT

Positionnement thématique :

1. Physique – Physique de la Matière
2. Informatique – Informatique pratique

Mots-clés :

1. Matériau à changement de phase – Phase changing material
2. Mur composite – Composite wall
3. Chaleur latente – Latent heat
4. Méthode des différences finies – Finite difference method
5. Schéma implicite – Implicit scheme

Bibliographie commentée :

La consommation d'énergie a considérablement augmenté au cours des dernières années : en 2019, 353 TWh ont servi au chauffage/refroidissement des ménages français dont 132 TWh provenaient de la combustion de gaz naturel. La part de consommation énergétique des ménages représente 40% de la consommation totale de la France (industries comprises) [1]. Le réchauffement climatique et les microclimats extrêmes auxquels font face les villes – en raison d'une pollution de l'air plus concentrée – lors des pics de chaleur entraînent et continueront d'entraîner une utilisation accrue de climatiseurs : le stock de ces derniers est prévu d'augmenter de 50% d'ici dix ans. L'ensemble des climatiseurs dans le monde consommera autant d'électricité en 2050 que la Chine et l'Inde réunis en consomment aujourd'hui [2].

Dans ce contexte, les matériaux à changement de phase (MCP) sont apparus aux yeux de **Mohammed M Farid** comme une alternative pour réguler la température des bâtiments de manière passive (sans consommation d'énergie). Dans le secteur des bâtiments, l'énergie thermique peut être stockée de 2 manières : par chaleur sensible (le matériau faisant office de stockage change de température) et par chaleur latente (le matériau change de phase tout en restant à une température (quasi) constante). L'avantage principal des MCP est la haute densité d'énergie volumique pouvant être stockée. Lorsque la température ambiante s'élève au-delà de la température de fusion du MCP, celui-ci passe de l'état solide à l'état liquide en absorbant une très grande quantité d'énergie thermique, limitant ainsi le flux de chaleur entrant dans le bâtiment. La nuit, lorsque la température ambiante diminue, le MCP se solidifie en libérant l'énergie thermique qu'il avait accumulée la journée [3].

Aujourd'hui, la technique la plus répandue pour intégrer les MCP aux matériaux de construction est l'encapsulation : son principal avantage est que les microbilles utilisées empêchent les fuites lors de la liquéfaction du MCP. De nombreuses investigations expérimentales ont récemment été menées visant à

évaluer le potentiel de l'intégration des MCP dans les isolations thermiques. En parallèle, la simulation numérique peut permettre de généraliser les résultats expérimentaux afin de prévoir le dimensionnement du MCP pour son intégration à un système complet. C'est pourquoi il est nécessaire de développer un modèle mathématique pour reproduire le comportement thermique et optimiser l'intégration des MCP dans les bâtiments.

Dans ce cadre-là, J. Crank a mis au point une approche enthalpique pour modéliser les transferts de chaleur dans un matériau à changement de phase [4]. En effet, l'équation traditionnelle de la chaleur portant sur la température suppose que le matériau ne stocke de l'énergie que sous forme sensible, i.e. en changeant de température. Dans le cas d'un changement de phase, cette approche n'est donc plus valable car le matériau absorbe de l'énergie sans changer de température. En décomposant l'énergie interne du matériau en énergie sensible (issue de la température) et énergie latente (issue du changement de phase) J. Crank trouve une version plus générale de l'équation de la chaleur qui se distingue de la précédente par un terme supplémentaire caractérisant l'énergie d'une éventuelle partie fondue du matériau.

Sur ce travail, V. R. Voller a développé une méthode implicite de résolution pour cette nouvelle équation de la chaleur [5]. Cette méthode présente un avantage de convergence par rapport à une méthode explicite mais fait apparaître des équations compliquées à résoudre à chaque pas de temps. En effet, pour chaque pas de temps, la nouvelle enthalpie d'un nœud dépend de la nouvelle fraction liquide de ce même nœud : une méthode itérative est donc nécessaire à chaque pas de temps pour trouver les valeurs coïncidentes. Une fois de plus, V. R. Voller propose une technique optimisée pour parvenir au résultat [6]. Cette technique d'optimisation se sert de la prédiction de l'état d'un nœud au pas de temps suivant : les nœuds ne changeant pas de phase ont la même fraction liquide au pas de temps suivant. La convergence est « instantanée » si aucun nœud ne change de phase et rapide sinon.

Problématique : Comment réaliser une simulation numérique et mettre en œuvre une expérimentation de transfert de chaleur à travers un mur contenant un MCP ?

Objectifs :

- Mettre en équation les transferts thermiques dans un matériau à changement de phase
- Déterminer les conditions d'interface entre deux MCP grâce à la méthode des nœuds fantômes
- Réaliser un programme Python mettant en jeu ces équations et permettant ainsi de simuler un mur composite
- Mettre en œuvre une manipulation expérimentale permettant de mesurer le temps de fonte d'un MCP dans les conditions de la simulation.
- Comparer les résultats expérimentaux à la simulation.

Références bibliographiques :

[1]	Ministère de la transition écologique et de la cohésion territoriale	Statistiques consommation énergie	https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/consommation-finale-denergie-par-secteur-pefa
-----	--	-----------------------------------	---

[2]	Agence internationale de l'énergie	Le futur de la climatisation	https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling
[3]	Mohammed M Farid, Amar M Khudhair, Siddique Ali K Razack, Said Al-Hallaj	A review on phase change energy storage: materials and applications	Energy Conversion and Management, Volume 45, 2004, 1597-1615
[4]	J. Crank	Free and Moving Boundary Problems	Clarendon Press, Oxford, 1984
[5]	Vaughan R. Voller	Implicit Finite-Difference Solutions of the Enthalpy Formulation of Stefan Problems	IMA Journal of Numerical Analysis, Volume 5, 1985, 201-214
[6]	Vaughan R. Voller	Fast implicit finite-difference method for the Analysis of phase change problems	Numerical Heat Transfer, Part B, Volume 17, 1990, 155-169