Evolution des architectures de systèmes pour le stockage de chaleur

Porteur : Alexandre MALLEY-ERNEWEIN
Partenaires : /
Laboratoire : CETHIL (Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon)
Composante : IUT Lyon1 – Département MT2E

Nature du financement demandé : Stage de M2
Dates : printemps 2027, 1er février 2027 au 31 juillet 2027

Résumé :

Le développement des énergies renouvelables comme le solaire et l'éolien se heurte à leur intermittence et au décalage entre les périodes de production et les besoins énergétiques. Le stockage thermique apparaît essentiel à leur développement. Trois grandes familles de stockage de chaleur existent : le stockage sensible, mature mais peu dense énergétiquement, le stockage latent, plus performant mais limité par des difficultés de transfert thermique et le stockage thermochimique, très dense mais encore peu mature et confronté à des problèmes de transfert de masse. Les performances de ces systèmes dépendent de la géométrie des réacteurs utilisés, dont les configurations ont souvent été transposées d'un type de stockage à un autre malgré des phénomènes physiques différents. Ce projet a pour but d'analyser l'évolution de ces réacteurs en combinant une approche d'intelligence artificielle (IA) et la loi constructale. Un agent IA recensera systématiquement les géométries des systèmes décrites dans la littérature scientifique, tandis que l'approche analytique issu de la loi constructale permettra d'identifier les mécanismes gouvernant leur évolution.

Sujet développé :

Contexte

Dans sa trajectoire pour assurer sa neutralité carbone et climatique à l'horizon 2050, la France a pour objectif que la part d'énergies renouvelables **atteigne 33 %** de sa consommation finale brute d'énergie en 2030 (23 % en 2024 [1]). Dans l'usage des bâtiments, représentant 16% des émissions de gaz à effet de serre (GES) en France [2], le principal poste de consommation d'énergie et d'émissions de GES est **le chauffage** : respectivement, 68 et 43 % de la consommation énergétique dans les bâtiments tertiaires et du chauffage résidentiel sont d'origines fossiles [3]. Substituer aux énergies fossiles des énergies renouvelables, telles que le solaire ou l'éolien, nécessite de parer à leur intermittence : ces énergies présentent des périodes de production (principalement estivale et diurne) décorrélées des périodes de besoins (principalement hivernale et nocturne). **Stocker ces énergies** semble indispensable pour développer leur usage et réduire les émissions de gaz à effet de serre françaises et européennes.

Les trois principales façons de stocker de l'énergie sous forme de chaleur sont le stockage **sensible** (basé sur un changement de température d'un matériau), le stockage **latent** (basé sur le changement de phase d'un matériau) et le stockage via une **réaction entre deux composants** (adsorption, absorption et thermochimique). Le stockage sensible présente la densité énergétique la plus faible mais une facilité de mise en place et une maturité technologique (TRL 8-9) ; le stockage latent est plus dense énergétiquement, mais moins mature (TRL 5-8) et présente **des**

problématiques de transferts thermiques en raison de la faible conductivité thermique des matériaux utilisés ; le stockage thermochimique a une densité énergétique importante mais est peu mature (TRL 2-5) et présente des **problématiques de transfert de masse** au sein des matériaux utilisés.

Ces problématiques font l'objet d'études à l'échelle du système, particulièrement l'impact de la **géométrie du réacteur de stockage sur ses performances** [4,5]. Les principes des configurations découvertes ont été transposées aux trois types de stockage (par exemple, les ailettes) bien que les phénomènes physiques impliqués diffèrent. En effet, si dans le cas du stockage sensible le matériau de stockage est un fluide jouant également le rôle de caloporteur, dans le cas du stockage latent le matériau est présent simultanément en plusieurs phases. Le cas du stockage thermochimique couple des problématiques de transfert de masse et thermique car le fluide caloporteur transporte un des réactifs nécessaires au processus.

Le but de ce stage est de coupler une approche analytique, la loi constructale, avec une approche par IA pour analyser l'évolution de ses systèmes et déterminer des tendances de conceptions pour une application bâtiment.

Objectifs du stage

Ce stage a deux objectifs principaux : i) effectuer un **recensement exhaustif** des configurations de réacteurs de stockage de chaleur présents dans la littérature à l'aide d'un agent IA ; ii) utiliser la méthode constructale pour **analyser l'évolution** des réacteurs de stockage. L'agent IA qui sera utilisé est un outil développé par le CNRS : une phase d'apprentissage, sous le contrôle du ou de la stagiaire, permettra à l'agent IA de collecter au sein de la littérature scientifique les paramètres et performances des différents systèmes de stockage. La méthode analytique qui sera utilisée est issue de la loi constructale, énoncée par Adrian Bejan [6] telle que : "*For a finite-size system to persist in time (to live), it must evolve in such a way that it provides easier access to the imposed (global) currents that flow through it*". Son utilisation a montré sa pertinence pour la **prédiction de géométrie de systèmes naturels** (architecture des deltas de fleuve [7], des poumons [8]) et de **l'évolution de technologies** [9,10]. Cette méthodologie a déjà été appliquée aux systèmes de stockage de chaleur ([11–13]) pour concevoir des architectures plus performantes que les configurations classiques. Ici, elle sera utilisée pour **prédire leur évolution** ; couplée à l'IA, elle permettra de découvrir de **nouvelles tendances de conception** des réacteurs de stockage de chaleur.

[1] Chiffres clés des énergies renouvelables - Édition 2025, Données Études Stat. Pour Chang. Clim. Lénergie Environ. Logement Transp. (n.d.). https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-des-energies-renouvelables-edition-2025-0 (accessed October 30, 2026).

[2] notre-environnement, Les émissions françaises de gaz à effet de serre, Notre-Environ. (2025). https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/climat/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-et-l-empreinte-carbone-ressources/article/les-emissions-francaises-de-gaz-a-effet-de-serre (accessed October 30, 2026).

[3] BE 2025 - Principaux résultats | Analyses et données, (n.d.). https://analysesetdonnees.rte-france.com/bilan-electrique-2025/synthese (accessed October 30, 2026).

[4] A.A. Hawwash, H. Hassan, K.E. feky, Impact of reactor design on the thermal energy storage of thermochemical materials, Appl. Therm. Eng. 168 (2020) 114776. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114776.

[5] A. Sciacovelli, F. Gagliardi, V. Verda, Maximization of performance of a PCM latent heat storage system with innovative fins, Appl. Energy 137 (2015) 707–715. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.015.

[6] A. Bejan, Street network theory of organization in nature, J. Adv. Transp. 30 (1996) 85–107. https://doi.org/10.1002/atr.5670300207.

[7] A. Bejan, How nature takes shape: extensions of constructural theory to ducts, rivers, turbulence, cracks, dendritic crystals and spatial economics, Int. J. Therm. Sci. 38 (1999) 653–663. https://doi.org/10.1016/S1290-0729(99)80058-1.

[8] A. Bejan, Vascular flow design and predicting evolution, Int. Commun. Heat Mass Transf. 155 (2024) 107517. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107517.

[9] A. Bejan, J.D. Charles, S. Lorente, The evolution of airplanes, J. Appl. Phys. 116 (2014) 044901. https://doi.org/10.1063/1.4886855.

[10] P. Mardanpour, A. Bejan, N. Rangel, H. Ebrahimi Fakhari, The evolutionary design of wind turbines, Wind Eng. (2026) 0309524X261466500. https://doi.org/10.1177/0309524X261466500.

[11] M. Eslami, M.A. Bahrami, Sensible and latent thermal energy storage with constructal fins, Int. J. Hydrog. Energy 42 (2017) 17681–17691. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.097.

[12] V. Joshi, M.K. Rathod, Constructal enhancement of thermal transport in latent heat storage systems assisted with fins, Int. J. Therm. Sci. 145 (2019) 105984. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.105984.

[13] K. Kant, R. Pitchumani, Analysis of a novel constructal fin tree embedded thermochemical energy storage for buildings applications, Energy Convers. Manag. 258 (2022) 115542. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115542.