

## SUJET DE THESE

### « Stockage de la chaleur fatale issue de procédés industriels à hautes températures »

- **Formation/ Niveau d'études requis :**

Ingénieur ou Master mécanique/énergétique

- **Nature du travail**

Etude sur les chaleurs fatales, stockage de la chaleur, Modélisation, simulation numérique, validation expérimentale, étude des transferts thermiques couplés, identification de modèles réduits.

- **Contexte scientifique général**

Dans le contexte actuel de réduction des gaz à effet de serre, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les industries mettant en œuvre des procédés à haute température passe par le développement de solutions de récupération / stockage / transport de chaleur à haute température. Face aux enjeux de la transition énergétique et écologique, la réduction de la consommation d'énergie des secteurs industriels gros consommateurs est essentielle. La récupération de la chaleur fatale générée par les procédés industriels de production, transformation et mise en forme du verre, de céramiques et de métaux constitue ainsi un potentiel d'économie d'énergie, d'amélioration de la compétitivité, de maîtrise des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES).

- **Sujet de Thèse**

La Thèse proposée s'intéresse à la récupération des chaleurs dites « fatales » et plus particulièrement à son stockage dans des matériaux poreux, des lits de sables fixes ou fluidisés. L'un des aspects qui sera étudié sera les transferts de chaleur entre les systèmes de captation et de stockage via un lit de sable dont les temps de stockage/déstockage peuvent être contrôlés par sa fluidisation. La quantité d'énergie stockée en un temps donné et la température atteinte par l'unité de stockage sont des paramètres à considérer. Enfin, la mise en place de modèles réduits pour permettre le pilotage du système global captation et stockage est une étape essentielle qui sera également regardée. La validation de ces modèles nécessitera la mise en place d'une validation expérimentale sur une maquette de capteur - stockeur développée au LEMTA.

- **Objectifs détaillés de la thèse**

Il s'agira dans un premier temps de faire un état de l'art sur les systèmes de stockage par lits fixes et fluidisés, en présence d'échangeurs à tubes et de faire une revue bibliographique sur les coefficients de transfert entre un écoulement chargé de particules et une paroi solide. Des premiers essais à basses températures seront réalisés sur le dispositif de lits fluidisés du LEMTA, afin d'évaluer les pertes de charge et de chaleur. Cette partie expérimentale sera

complétée par l'instrumentation du dispositif pour évaluer l'énergie consommée pour la fluidisation et le transfert de chaleur versus l'énergie transférée et stockée.

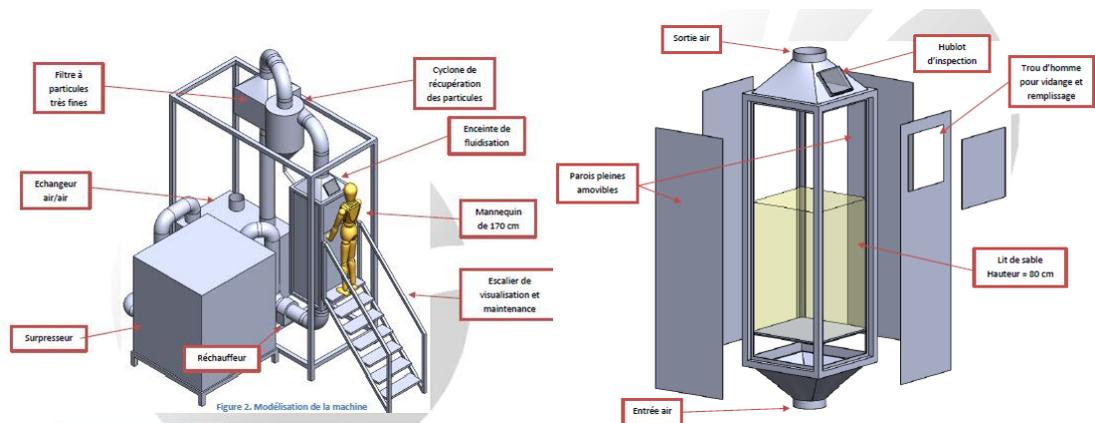


Fig. 1 - Dispositif de lits fixes ou fluidisés [LEMTA]

Dans un second temps, il s'agira de faire les premiers essais en intégrant dans le stockeur un échangeur constitué d'un réseau de tubes. Le nombre de tubes, leur disposition et leur configuration seront étudiées de façon théorique. Les coefficients de transfert seront mesurés expérimentalement (mesures de températures et de flux de parois par méthodes inverses pour remonter à des impédances de paroi). Nous étudierons les échanges dans le cas d'un tube unique ou d'un réseau de tubes. Les mesures seront faites pour des lits fixes ou mobiles. Parallèlement à l'étude expérimentale, des simulations numériques seront faites et des modèles seront proposés et confrontés aux expériences. Une modification du banc sera réalisée pour permettre des études à de plus hauts niveaux de température où le rayonnement prendra une part plus importante. On s'intéressera également à l'étude de la diffusion et dispersion de la chaleur dans un tel système (évaluation du tenseur de dispersion).

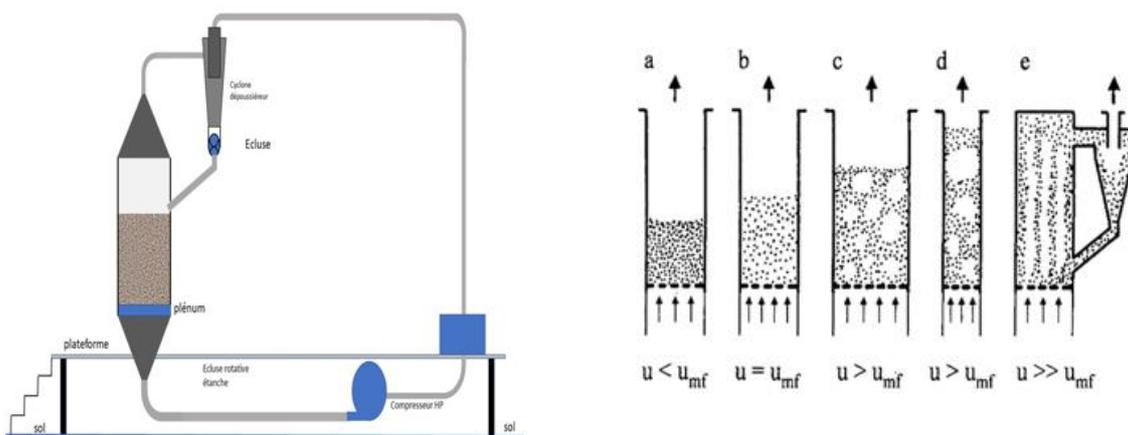


Fig. 2 – Principe du stockage par fluidisation pour différents régimes d'écoulement

Enfin, la dernière partie du travail sera consacrée au couplage du stockeur avec le capteur. On cherchera à identifier les temps de transfert et de stockage entre ces deux unités et à étudier l'influence de la fluidisation du lit de sable sur ces temps. On évaluera l'efficacité de cette fluidisation versus quantité d'énergie stockée et la puissance du système. Une étude

particulière sera faire afin d'étudier l'influence du rapport Surface d'échange / Volume de stockeur sur les temps caractéristiques de Stockage/Déstockage. Pour finir, on s'intéressera à la modélisation dynamique du stockeur et l'identification de modèles thermiques dynamiques pour en réaliser le contrôle-comande Cette dernière partie se fera conjointement à une autre Thèse portant sur la captation de la chaleur fatale.

- **Compétences requises :**

- ✓ Connaissances avancées en transfert thermique, plus particulièrement en transferts couplés rayonnement/conduction et convection;
- ✓ Connaissances en méthodes inverses appliquées aux transferts thermiques (identification de système) ;
- ✓ Connaissances en métrologie thermique (mesure de température, flux et propriétés thermophysiques) ;
- ✓ Maîtrise d'outils numérique éléments finis (COMSOL, FLEXPDE) et MATLAB;
- ✓ Instrumentation et goût pour l'expérimentation ;
- ✓ Rigueur, méthodologie et capacité à communiquer dans un environnement industriel et universitaire ;

- **Financement :**

Elle bénéficie d'un financement de 3 ans de type « Contrat doctoral » obtenu dans la cadre de Lorraine Université d'Excellence (LUE 2022).

- **Date de démarrage :**

La date démarrage souhaitée est octobre-novembre 2022.

- **Environnement de la Thèse**

Elle se déroulera au sein du LEMTA, en collaboration avec SAINT-GOBAIN dans le cadre du Laboratoire commun « CANOPEE » (enjeu Carbone : matériaux inNOvants pour des Procédés Economes en Energie) créé le 23 octobre 2020 sur le Thème des matériaux en « conditions extrêmes de température et bas Carbone ».

CANOPEE est un laboratoire commun associant deux laboratoires académiques, le CEMHTI (CNRS INC) et le LEMTA (UL/CNRS INSIS), et deux centres de recherche de SAINT-GOBAIN.

### **Laboratoire d'accueil**

LEMMA - UMR 7563 (CNRS – Université de Lorraine)  
ENSEM - 2 avenue de la Forêt de Haye  
BP 90161- 54505 Vandoeuvre-les-Nancy Cedex

### **Entreprise partenaire via le Labcom « CANOPEE » SAINT-GOBAIN – LEMTA (UL-CNRS):**

Saint Gobain Recherche Paris  
39 Quai Lucien Lefranc,  
93300 Aubervilliers– France

### *Présentation de la société :*

Saint-Gobain Research Paris (SGR Paris) est l'un des 8 centres de recherche à vocation transversale qui servent l'ensemble des activités du Groupe Saint-Gobain.

### *Présentation du laboratoire :*

Unité Mixte de Recherche de l'université et du CNRS, le LEMTA (Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée, UMR 7563) concentre ses recherches autour de la Mécanique et de l'Énergie. Les activités de recherche s'articulent autour de la mécanique des fluides, de l'énergie et des transferts thermiques.

La thèse se déroulera au sein du groupe Vecteur Énergétiques dans l'opération scientifique gestion de la chaleur.

### **Encadrement et contact**

Directeurs de thèse : Benjamin Rémy (Pr UL) : [benjamin.remy@univ-lorraine.fr](mailto:benjamin.remy@univ-lorraine.fr)  
Vincent Schick (MCF UL) : [vincent.schick@univ-lorraine.fr](mailto:vincent.schick@univ-lorraine.fr)

Dir. Industriel : Johann Meulemans (IR SGR) : [johann.meulemans@saint-gobain.com](mailto:johann.meulemans@saint-gobain.com)

### **Références bibliographiques**

[1] ADEME 2017. La chaleur fatale - Faits & chiffres. 2017 ed. Angers (France): Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). <https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/2312-chaleur-fatale-9791029708954.html>

[2] R. Coquard, D. Rochais, D. Baillis, « Experimental investigations of the coupled conductive and radiative heat transfer in metallic/ceramic foams », Int. Jour. of Heat and Mass Transfer, vol. 52, pp 4907–4918.

[3] Z. Wu, C. Caliot, F. Bai, G. Flamant, Z. Wang, “Coupled radiation and flow modeling ceramic foam volumetric solar air receivers”, Solar Energy, vol. 85, pp2374–2385, 2011.

[4] Kuravi, S., Trahan, J., Yogi Goswami, D., Rahman, M.M. & Stefanakos, E.K., Thermal energy storage technologies and systems for centering power plants, Progress in Energy and Combustion Science 39, 285-319, 2013.

[5] M. Sans, V. Schick, G. Parent, O. Farges, “Experimental characterization of the coupled conductive and radiative heat transfer in ceramic foams with a flash method at high temperature”, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 148, pp. 119077, 2020.

[6] DOE 2015. Quadrennial Technology Review 2015 – Chapter 6: Innovating Clean Energy Technologies in Advanced Manufacturing - Waste Heat Recovery Systems. U.S. Department of Energy (DOE). <https://www.energy.gov/quadrennial-technology-review-2015-omnibus>