

## Sujet de thèse :

### Etude expérimentale et modélisation thermo-hydraulique d'un prototype de stockage de chaleur et de froid par couplage des technologies thermocline et Matériau à Changement de Phase

LITEN/DTCH/SSETI/LCST

F.Bentivoglio, A.Bruch

Contact: [fabrice.bentivoglio@cea.fr](mailto:fabrice.bentivoglio@cea.fr)

[benoit.stutz@univ-smb.fr](mailto:benoit.stutz@univ-smb.fr)

La production de **chaleur et de froid** représente plus de **50% de la consommation finale d'énergie en France**, dont **28% pour l'habitat individuel et collectif**, et a été identifiée, dans le cadre du Grenelle de l'environnement puis de la loi sur la transition énergétique (TECV), comme une **source potentielle majeure de réduction d'émission de CO<sub>2</sub>**. Pour ce faire, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques promeut notamment le développement des réseaux de chaleur qui, en centralisant la production, permettent une meilleure efficacité des moyens de production et une intégration accrue des énergies renouvelables et de récupération (ENR&R). Le développement de réseaux de chaleur intelligents (Smart-Grid thermiques) a pour objectif d'améliorer encore l'efficacité énergétique des réseaux de chaleur et de froid, ainsi que leur capacité d'intégration d'ENR&R. L'une des **briques technologiques essentielles** de ces réseaux intelligents est le **stockage thermique**, stockage de chaleur l'hiver et stockage de froid l'été.

Le CEA développe depuis plusieurs années trois grandes technologies de systèmes de stockage de chaleur, pour des applications habitat, réseaux de chaleur urbains, valorisation de la chaleur fatale industrielle et solaire thermique :

- Le stockage **sensible thermocline** : la chaleur est stockée dans un fluide caloporteur par élévation de sa température sans changement de phase. Ce fluide caloporteur est stocké dans un réservoir qui se remplit alternativement de fluide chaud et froid dans les phases de stockage et de déstockage. Le principal sujet de recherche sur ces systèmes concerne le maintien de la stratification thermique dans le réservoir. Ces systèmes, à la densité de stockage assez faible ( $\sim 35 \text{ kW.h/m}^3$  pour un  $\Delta T$  de  $30^\circ\text{C}$ ), sont les plus mûrs technologiquement.
- Le stockage **thermochimique** : la chaleur est stockée et déstockée par des réactions chimiques réversibles endothermique et exothermique. Cette technologie présente une très forte densité de stockage ( $\sim 500 \text{ kW.h/m}^3$ ) mais est encore au stade de la recherche.
- Le stockage par **matériau à changement de phase (MCP)** : la chaleur est absorbée lors d'une transition de phase solide-liquide à forte enthalpie de fusion, est stockée sous forme de liquide chaud, puis récupérée lors de la transition inverse de solidification. Cette technologie permet une densité de stockage élevée (jusqu'à  $100 \text{ kW.h/m}^3$ ) et fait l'objet actuellement du développement de prototypes et de démonstrateurs.

Le prototype objet de la thèse proposée s'inscrit dans les activités du CEA sur le stockage pour les réseaux de chaleur urbains. Le concept étudié propose de **coupler au sein du même composant les fonctions de stockage de chaleur et de stockage de froid**, pour obtenir des gains à la fois de compacité et de coût. Ce composant semble particulièrement pertinent pour les réseaux proposant de la production de chaleur et de froid négatif (à température  $< 0^\circ\text{C}$ ), comme c'est le cas par exemple sur les réseaux de La Défense à Paris ou du quartier Méridia de Nice.

Technologiquement, le **stockage de froid** est basé sur le **changement de phase eau-glace** autour de tubes spiralés ailetés alimentés en eau glycolée à  $-6^\circ\text{C}$ . Le **déstockage du froid** se fait **par contact direct** entre l'eau du circuit de climatisation et la glace prise autour des tubes ailetés (contact direct = l'eau passe directement au

travers de la glace sans paroi d'échange entre l'eau et la glace). Le **stockage de chaud** est basé sur le principe de **thermocline** avec comme fluide de stockage la même eau que celle qui prend en glace pour le stockage de froid (avec des températures de l'ordre de 60-70°C). La thermocline en eau se développe alors autour des tubes ailetés spiralés qui sont inactifs lors de ce fonctionnement de stockage de chaud.

Le prototype en question est en cours de fabrication et sera fonctionnel au début de la thèse. Une première campagne expérimentale de caractérisation de ses performances aura déjà été effectuée avant le début de la thèse. **L'objectif de la thèse** est d'étudier plus finement ces performances avec de **nouveaux essais expérimentaux** dédiés, et de travailler sur la **modélisation numérique** de ce stockage. Le prototype est instrumenté avec plus de 200 thermocouples permettant de suivre et caractériser finement son comportement, tant en stockage de chaud qu'en stockage de froid. La modélisation de la décharge en mode été (**fusion de la glace par contact direct**) est particulièrement nouvelle, et fera l'objet d'une **étude bibliographique** poussée afin de choisir les modèles les mieux adaptés. La modélisation pourrait se faire soit à l'échelle système (logiciel DYMOLA) soit à l'échelle CFD (logiciel ANSYS FLUENT) selon les enseignements tirés de l'étude bibliographique. L'étude de **l'ajout de capsules de Matériau à Changement de Phase** sera aussi étudiée durant la thèse, pour augmenter la chaleur stockée en mode hiver, avec potentiellement une mise en œuvre expérimentale sur le prototype.

Cette thèse **s'inscrit dans la suite des travaux de thèse déjà effectués au LCST** par Matthieu Martinelli sur les performances des échangeurs à tubes & calandre pour le stockage MCP, par Adèle Caron sur la caractérisation thermique des MCP adaptés à la récupération de chaleur fatale industrielle, des thèses de Clément Beust, de Teddy Chedid et d'Amandine Da Col sur la modélisation aux échelles CFD et système des stockages MCP pour le solaire à concentration et les réseaux de chaleur urbains, et de la thèse d'Alexis Ferré sur la modélisation des stockages thermoclines. Ce sujet de thèse présente néanmoins **une rupture importante** avec les sujets précédents sur la caractérisation expérimentale et la simulation de **la décharge d'un stockage de glace par contact direct**.

La thèse se déroulera au CEA Grenoble, encadré localement par le CEA. La direction universitaire de la thèse sera effectuée par M. Benoit Stutz, de l'université Savoie Mont Blanc, qui apportera des compétences en thermique, en stockage de la chaleur et en expérimental.