



**HAL**  
open science

## Matériaux de stockage thermocline: de la sélection d'un couple huile-solide au modèle de stockage

Sophie Molina, Didier Haillot, Bertille Marie, Alexandre Deydier, Jean-Pierre Bedecarrats

### ► To cite this version:

Sophie Molina, Didier Haillot, Bertille Marie, Alexandre Deydier, Jean-Pierre Bedecarrats. Matériaux de stockage thermocline: de la sélection d'un couple huile-solide au modèle de stockage. Congrès Français de Thermique, SFT 2018, May 2018, Pau, France. hal-02151337

**HAL Id: hal-02151337**

**<https://hal.science/hal-02151337>**

Submitted on 11 Jun 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Matériaux de stockage thermocline : de la sélection d'un couple huile-solide au modèle de stockage.

Sophie MOLINA<sup>1\*</sup>, Didier HAILLOT<sup>1</sup>, Bertille MARIE<sup>2</sup>, Alexandre DEYDIER<sup>3</sup>, Jean-Pierre BEDECARRATS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ Pau & Pays Adour, LaTEP, EA1932, ENSGTI, Avenue Jules Ferry, BP7511, 64000 Pau, France

<sup>2</sup> Bertin Technologies Tarnos, Espace technologique Jean-Bertin, Avenue du 1er Mai, 40220 Tarnos, France

<sup>3</sup> CNIM (Constructions Industrielles de la Méditerranée), Siège social, Direction Générale, 35, rue de Bassano, 75008 Paris, France

\* (auteur correspondant : sophie.molina@univ-pau.fr)

**Résumé** - Le stockage d'énergie thermique, et notamment la technologie thermocline dual-media, constitue une solution prometteuse aux problématiques d'efficacité énergétique et d'intégration des énergies renouvelables. La mise en présence de deux matériaux dans les systèmes dual-media pose la question de leur compatibilité et de leur performance sur le long terme. Dans un premier temps, cette compatibilité est évaluée sur un banc de vieillissement en laboratoire, à 340°C. Les couples les plus prometteurs sont ensuite introduits dans un pilote de stockage d'un volume total de 0,3 m<sup>3</sup>, pilote dont le comportement a été modélisé à l'aide d'un programme développé sous l'environnement C++, afin d'extrapoler les données expérimentales récoltées.

## Nomenclature

|           |   |                             |  |
|-----------|---|-----------------------------|--|
| $A_{ech}$ | surface d'échange, m <sup>2</sup>                         | <i>Symboles grecs</i>       |  |
| $C_p$     | chaleur spécifique, J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>   | $\varepsilon$               | porosité   |
| $D_i$     | diamètre interne, m                                       | $\lambda$                   | conductivité thermique, W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> |
| $d_p$     | diamètre de particule, m                                  | $\mu$                       | viscosité dynamique, Pa.s                                  |
| $H_{lit}$ | hauteur du lit de solide, m                               | $\rho$                      | masse volumique, kg.m <sup>-3</sup>                        |
| $h_{vol}$ | coefficient d'échange, W.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup> | <i>Indices et exposants</i> |  |
| Pr        | nombre de Prandtl   | <i>ch</i>                   | charge   |
| R         | résistance thermique, m.K.W <sup>-1</sup>                 | <i>dech</i>                 | décharge   |
| Re        | nombre de Reynolds  | <i>ext</i>                  | extérieur  |
| T         | température, °C   | <i>f</i>                    | fluide   |
| t         | temps, s  | <i>s</i>                    | solide   |
| U         | vitesse, m.s <sup>-1</sup>                                |                             |  |
| V         | volume, m <sup>3</sup>                                    |                             |  |
| z         | hauteur dans le stockage, m                               |                             |  |

## 1. Introduction

Ces dernières années, la recherche de procédés toujours plus économes et écologiques a poussé le secteur de l'énergie à une évolution importante de ses technologies. Les systèmes de stockage constituent une solution prometteuse [1], adaptable à une grande variété de situations en permettant le découplage entre production et demande. Une part importante de l'énergie consommée mondialement étant thermique [2], le stockage de cette forme d'énergie bénéficie d'un intérêt grandissant de la part des chercheurs et des industriels.

Parmi les initiatives récentes de promotion de ces technologies, le projet Therm'Stock, soutenu par le programme « Investissements d'Avenir » de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), vise au développement d'une solution commerciale de stockage sensible thermocline dual-media, dans la gamme de température

150-350°C. Ces systèmes pourraient notamment permettre la récupération de chaleur fatale dans les procédés industriels et l'intégration des énergies renouvelables sur les réseaux.

Le principe de fonctionnement du stockage thermocline dual-media est présenté dans la Figure 1. Il consiste en une seule cuve, remplie d'un mélange d'un fluide caloporteur et d'un solide. En charge, le fluide chaud est introduit par le haut du réservoir et cède son énergie au lit de solide, qui s'élève en température. En décharge, le fluide froid est introduit par le bas du réservoir, et se réchauffe par contact avec le solide.

Le laboratoire LaTEP, de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, est associé au projet Therm'Stock pour la phase de sélection et caractérisation des matériaux de stockage.

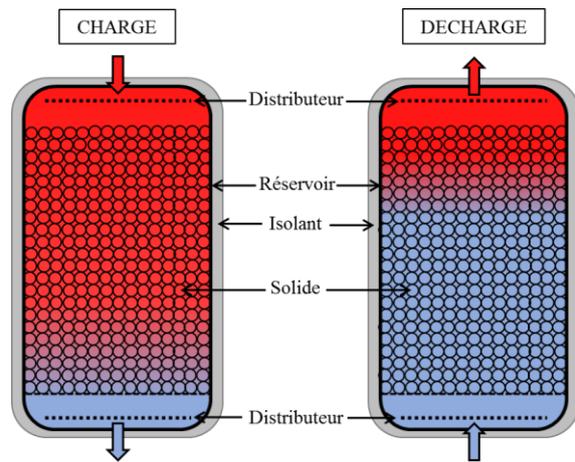


Figure 1 : Schéma de fonctionnement du stockage thermocline dual-media

## 2. Revue bibliographique : le stockage thermocline dual-media et sa modélisation

De nombreux travaux de la littérature portent sur le stockage thermocline dual-media, une majorité étant centrée sur la modélisation et la compréhension des phénomènes mis en jeu dans ce type de stockage [3]–[5]. Deux grands groupes de fluide caloporteur peuvent être utilisés, gaz ou liquide. L'utilisation d'un liquide permet de cumuler les fonctions de fluide caloporteur et de matériau de stockage, ce qui n'est pas le cas avec un gaz, dont la capacité de stockage (produit de la masse volumique et de la chaleur spécifique) est négligeable devant celle du solide. Pour cette raison, l'étude s'est focalisée ici sur les stockages utilisant un liquide, et plus particulièrement l'huile thermique. En effet, ce fluide présente l'avantage d'être utilisable sur une large gamme de température, et n'est pas limité par sa température de solidification, comme les sels fondus, ou un besoin de pressurisation, comme dans le cas de l'eau. Les données expérimentales disponibles pour ce type de système en huile sont relativement peu nombreuses, et très variables, comme en atteste le Tableau 1.

| Référence  | Fluide          | Solide       | $V$<br>$m^{-3}$ | $\rho_s \cdot C_{P,s}$<br>$MJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$ | $\rho_s \cdot C_{P,s} / \rho_f \cdot C_{P,f}$ | $T_{MAX}$<br>$^{\circ}C$ | Années de<br>fonctionnement    |
|------------|-----------------|--------------|-----------------|--|---|--------------------------|--------------------------------|
| [6]        | Caloria® HT43   | Roches/Sable | 100<br>2283     | 2,7  | 1,4   | 302                      | 1976<br>1982 - 1986            |
| [7]        | Therminol® 55   | Fer          | 76              | 4,1  | 2,2   | 180                      | 1985 - ?                       |
| [8]        | Hytherm 500     | Roches       | 7,6             | -  | -   | 250                      | 1989 - ?                       |
| [9]        | Calflo® HTF     | Roches       | 0,02            | 2,1  | 1,1   | 240                      | 2005 - ?                       |
| [10]       | Shell Thermia B | Verre        | 0,0004          | 1,9  | 1,0   | 200                      | 2009 - ?                       |
| [11]       | Xceltherm® 600  | Roches       | 0,03            | 2,1  | 1,1   | 130                      | 2011 - ?                       |
| [12], [13] | Therminol® 66   | Roches/Sable | 2,4<br>29       | 2,3  | 1,1   | 300                      | 2012 - actuel<br>2013 - actuel |
| [14]       | Huile de colza  | Quartzite    | 0,2             | 2,1  | 1,1   | 210                      | 2014 - ?                       |
| [15]       | Jarytherm® DBT  | Alumine      | 3,4             | 2,8  | 1,3   | 300                      | 2015 - actuel                  |

Tableau 1 : Prototypes de stockage thermocline dual-media en huile présentés dans la littérature

En ce qui concerne la modélisation du stockage thermocline dual-media, plusieurs types de modèles existent. Ils peuvent être mono- ou bidimensionnels, à une ou plusieurs équations, et prendre en compte ou non un certain nombre de phénomènes, comme par exemple la conduction à l'intérieur des particules solides [16]–[18].

### 3. Matériaux pour le stockage thermocline dual-media : étude de compatibilité entre l'huile Jarytherm® DBT et deux solides

Parmi les fluides présentés dans le Tableau 1, l'huile Jarytherm® DBT a été choisie pour une première série de tests, notamment car elle permet de couvrir la totalité de la gamme de température visée dans le projet Therm'Stock, soit 150-350°C. Le système à concevoir étant un stockage thermocline dual-media, cette huile doit être associée à un matériau solide. Afin de sélectionner ce couple de matériaux, des études ont été réalisées au laboratoire sur un banc de vieillissement dédié. L'objectif est ici d'évaluer le comportement de l'huile à haute température, entre 300 et 350°C, afin de compléter les données déjà obtenues dans la littérature sur les pilotes présentés dans le Tableau 1.

#### 3.1. Banc de vieillissement et protocole de test

Pour réaliser les tests de compatibilité, le laboratoire LaTEP dispose d'un banc d'essai composé de huit cellules cylindriques en acier inoxydable, de diamètre interne 45mm et de hauteur 88mm, soit un volume total de 140 mL. Pour les tests, ces cellules sont remplies d'environ 40 mL d'huile ou d'un mélange huile-solide, puis chauffées via des colliers chauffants de 620 W, pouvant atteindre 400°C. Le suivi des expériences est réalisé par deux thermocouples de type K, placés à l'intérieur de la cellule et au niveau du collier chauffant. La température cible est la température en cœur de cellule, fixée par l'utilisateur, et la régulation se fait au niveau du collier chauffant, via une centrale d'acquisition et un gradateur. Les tests sont réalisés sous atmosphère d'azote, afin d'éviter toute oxydation de l'huile. Un suivi de la masse d'échantillon introduite est également effectué avant et après les tests, afin de détecter une possible perte de masse lors des purges ou dans les canalisations du circuit d'azote. Le banc de vieillissement est présenté dans la Figure 2.

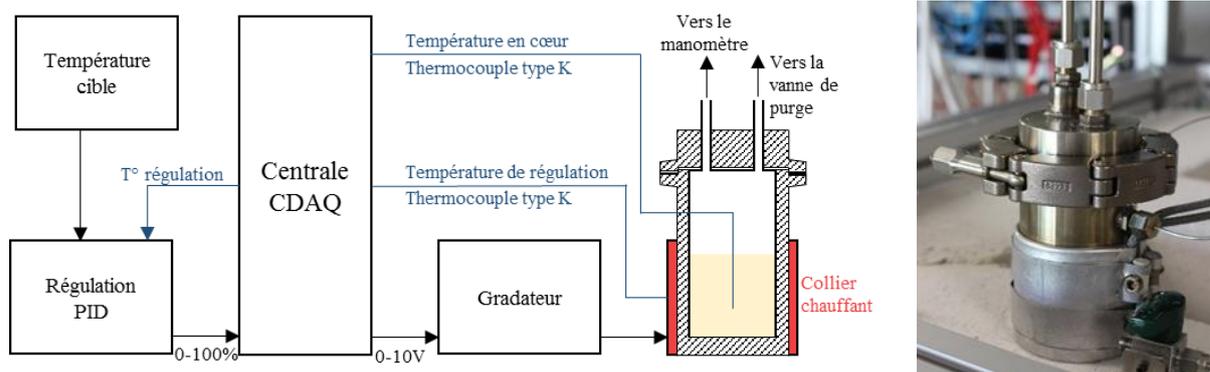


Figure 2 : Banc de vieillissement. Schéma de l'installation et vue d'une cellule

#### 3.2. Résultats obtenus après vieillissement

Une première série de tests a permis d'évaluer la compatibilité de l'huile Jarytherm® DBT et de différents solides (roches naturelles, verre, acier, quartzite et béton). Cette campagne a été réalisée à 340°C, sur une durée de 500h, afin d'avoir une première indication du comportement de l'huile en présence des particules. Cette indication est obtenue en suivant

les propriétés et la composition de l'huile vieillie, et en les comparant aux mesures sur un échantillon de fluide vieilli seul dans les mêmes conditions.

Suite à cette première campagne, deux solides prometteurs ont été identifiés : l'acier et le verre, pour lesquels la dégradation de l'huile est similaire à celle de l'huile seule. Dans le cas des autres matériaux, une accélération plus ou moins significative de la dégradation de l'huile a été observée (90% de DBT restant pour la quartzite et le béton, 80% de DBT pour les roches naturelles, contre 94% pour l'huile seule).

Pour les deux matériaux choisis, le verre et l'acier, une étude de compatibilité longue durée, sur 1500h, a été conduite afin de mieux estimer le comportement de l'huile en présence de ces solides. Les conditions des deux séries de test, 500 et 1500h, ainsi que les résultats obtenus par chromatographie, sont présentés dans le Tableau 2. La chromatographie permet d'évaluer la composition de l'huile au travers du pourcentage de dibenzyltoluène (DBT), qui est le composant majoritaire de la Jarytherm®. Son évolution constitue donc un indicateur fiable de dégradation du fluide.

| Essai | Fluide | Solide | $d_p$ (cm) | Surface d'échange (cm <sup>2</sup> ) | T (°C) | Durée (h) | DBT (%) | Ecart-type (%) |
|-------|--------|--------|------------|--------------------------------------|--------|-----------|---------|----------------|
| Neuve | JDBT   | -      | -          | -                                    | -      | -         | 98,7    | 0,3            |
| C1    | JDBT   | -      | -          | -                                    | 340    | 500       | 94,9    | 0,1            |
| C2    | JDBT   | Verre  | 0,3        | 82                                   | 340    | 500       | 94,2    | 0,8            |
| C3    | JDBT   | Acier  | 0,7        | 83                                   | 340    | 500       | 94,0    | 0,0            |
| C4    | JDBT   | -      | -          | -                                    | 340    | 1500      | 85,7    | 0,3            |
| C5    | JDBT   | Verre  | 1          | 179                                  | 340    | 1500      | 88,1    | 0,1            |
| C6    | JDBT   | Acier  | 0,7        | 257                                  | 340    | 1500      | 84,3    | 0,1            |

Tableau 2 : Conditions opératoires et résultats – Compatibilité Jarytherm® DBT / solide à 340°C

Les pourcentages de DBT restant dans l'huile vieillie seule et vieillie en présence des deux matériaux sont similaires après 500h, de l'ordre de 94-95%. L'absence d'écart significatif permet de valider la compatibilité des matériaux, dans les conditions de température (340°C) et de temps (500h) choisies. Pour le test sur 1500h de vieillissement, une différence apparaît entre l'huile seule et les mélanges huile/solide : dans le cas de l'acier, le pourcentage de DBT est d'environ 1% inférieur au résultat sur l'huile seule, ce qui peut dénoter une légère accélération de la dégradation en présence de ce matériau. A l'inverse, la dégradation avec le verre est plus faible que pour l'huile seule : une caractérisation du banc d'essai est en cours pour identifier un possible artefact de mesure qui expliquerait l'apparition de cet écart. En ce qui concerne les propriétés de l'huile (masse volumique, chaleur spécifique et viscosité), aucune variation significative n'a été observée. Les couples huile/acier et huile/verre sont donc considérés viables pour une étude plus poussée, dans un pilote de stockage thermocline.

## 4. Modèle 1D de stockage thermocline dual-media

### 4.1. Présentation du modèle développé

Le langage de programmation utilisé pour le développement est le C++, qui permet une architecture modulaire, basée sur des sous-programmes. Ainsi, le modèle se compose d'un programme principal, qui gère notamment les initialisations et sorties, soutenu par des sous-programmes réalisant les calculs ou couvrant des fonctions support.

Les équations associées au stockage thermocline, l'évolution des températures du fluide et du solide, sont respectivement codées dans deux sous-programmes nommés « Cuve » et

« Milieu Poreux ». Dans un premier temps, les phénomènes de conduction axiale dans le fluide et le solide et à l'intérieur des particules solides n'ont pas été pris en compte, afin de simplifier l'écriture des équations. De même, hypothèse est faite que l'avancée du fluide caloporteur dans le stockage se fait selon un écoulement piston, ce qui permet l'utilisation d'un modèle monodimensionnel. Enfin, les propriétés du fluide et du solide sont pour l'instant prises constantes, et les pertes thermiques sont considérées au niveau des parois de la cuve. Ces hypothèses donnent les équations (1) et (2) suivantes.

$$\text{Fluide :} \quad \varepsilon \rho_f C_{p,f} \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} + U \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) = h_{vol} (T_s - T_f) + \frac{(T_{ext} - T_f)}{A_{ech} R_{ext}} \quad (1)$$

$$\text{Solide :} \quad (1 - \varepsilon) \rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = h_{vol} (T_f - T_s) \quad (2)$$

Où  $h_{vol}$  correspond au coefficient d'échange volumique entre le fluide et le solide, calculé par une corrélation issue de [19] :

$$h_{vol} = \frac{6(1 - \varepsilon) \lambda_f (2 + 1,1 Re^{0,6} Pr^{1/3})}{d_p^2} \quad (3)$$

## 4.2. Validation du modèle sur le pilote développé par Bertin Technologies

Dans le cadre du projet industriel Therm'Stock, Bertin Technologies a conçu et construit un pilote de stockage (Figure 3). Ce pilote se compose de deux modules en acier P265GH, maintenus par des brides, qui accueillent le mélange huile/solide. La cuve se termine à chaque extrémité par un fond bombé, dans lequel est introduit le distributeur. Afin de suivre la formation de la thermocline dans le stockage, 10 thermocouples ont été répartis sur l'axe vertical (Figure 3). Pour compléter ces mesures, un suivi radial de la température est réalisé sur les sections supérieures et inférieures, afin de vérifier l'homogénéité du front thermique. La précision de ces mesures de température est estimée à +/- 0,4°C. Une jauge de contrainte a également été mise en place afin de détecter toute déformation mécanique de la cuve, par exemple suite à un tassement du lit de solide lors des cycles charge/décharge. Sur ces mesures, la précision est de l'ordre de 0,1 bar. Pour le fonctionnement de l'installation, la charge du stockage est assurée par une chaudière au gaz naturel, et la décharge par un aérotherme, placé à l'extérieur du bâtiment du pilote. Sur ces étapes, le débit du fluide est mesuré avec une précision d'environ 0,04%, et peut varier entre 0,4 et 1,5 m<sup>3</sup>/h.

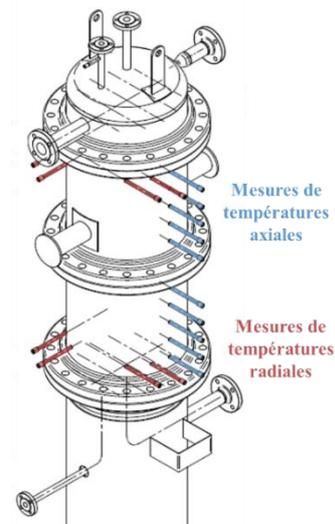


Figure 3 : Installation de stockage thermocline développée par Bertin Technologies. Vue du dispositif et schéma de la cuve de stockage

Suite aux tests de vieillissement présentés dans la partie 3, le pilote a été rempli avec un mélange d'huile Jarytherm® DBT et d'acier, dans un premier temps, puis avec du verre. Pour chacun des solides sélectionnés, les performances du système ont été évaluées sur des conditions de fonctionnement standard (cycles de référence) ou plus complexes (débit faible ou élevé, influence de l'écart  $T_{ch}-T_{dech}$ ).

La validation du modèle développé au LaTEP est effectuée dans un premier temps sur des données de décharge issues de la littérature [20], puis sur le pilote de Bertin Technologies, sur des décharges avec un remplissage en acier ou en verre. Les paramètres utilisés pour les validations sur le pilote de Bertin Technologies sont rassemblés dans le Tableau 3.

| Cas du verre                                      |                |                             |       | Cas de l'acier                                    |                |                             |       |
|---|----------------|-----------------------------|-------|---|----------------|-----------------------------|-------|
| Fluide  | Jarytherm® DBT | $D_i$ (m)                   | 0,498 | Fluide  | Jarytherm® DBT | $D_i$ (m)                   | 0,498 |
| $\rho_f$ (kg.m <sup>-3</sup> )                    | 870            | $H_{lit}$ (m)               | 1,1   | $\rho_f$ (kg.m <sup>-3</sup> )                    | 870            | $H_{lit}$ (m)               | 1,1   |
| $C_{pf}$ (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )   | 2333           | Débit (kg.s <sup>-1</sup> ) | 0,288 | $C_{pf}$ (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )   | 2333           | Débit (kg.s <sup>-1</sup> ) | 0,288 |
| $\mu_f$ (mPa.s)                                   | 0,48           | Durée (h)                   | 0,2   | $\mu_f$ (mPa.s)                                   | 0,48           | Durée (h)                   | 0,33  |
| Solide  | Verre          | $T_{dech}$ (°C)             | 178   | Solide  | Acier          | $T_{dech}$ (°C)             | 179   |
| $\rho_s$ (kg.m <sup>-3</sup> )                    | 2665           | $T_{ch}$ (°C)               | 320   | $\rho_s$ (kg.m <sup>-3</sup> )                    | 8100           | $T_{ch}$ (°C)               | 320   |
| $C_{ps}$ (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )   | 1000           | Porosité                    | 0,44  | $C_{ps}$ (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )   | 565            | Porosité                    | 0,44  |
| $\lambda_s$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) | 1              | $d_p$ (m)                   | 0,007 | $\lambda_s$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) | 49,8           | $d_p$ (m)                   | 0,007 |

Tableau 3 : Paramètres de calcul pour la validation du modèle sur le pilote de Bertin Technologies

Les comparaisons entre les données expérimentales et le modèle développé au LaTEP sont présentées dans la Figure 4. Cette comparaison est basée sur les profils de température du fluide sur la hauteur de la cuve, à différents temps. L'initialisation en température du modèle est réalisée en utilisant le premier profil de température expérimental, tracé en noir sur les graphiques.

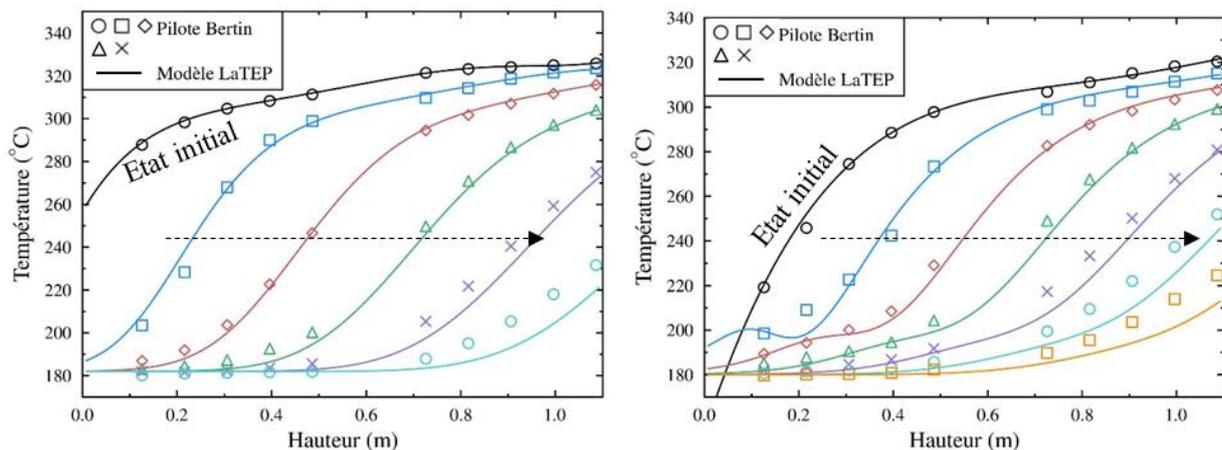


Figure 4 : Validation du modèle développé au LaTEP sur le pilote de Bertin. À gauche, remplissage avec des billes d'acier ; à droite, remplissage avec des billes de verre

L'accord expérimental-numérique est évalué en considérant d'une part la cohérence de la forme des profils expérimentaux et modélisés, et d'autre part en comparant les vitesses d'avancée du front thermique dans la cuve : pour les deux décharges étudiées, le modèle est en très bon accord avec les données expérimentales. En ce qui concerne les matériaux étudiés, le verre et l'acier, un gradient thermique est formé dans les deux cas, validant le potentiel de

ces matériaux pour le stockage thermocline. Quelques différences apparaissent néanmoins, notamment sur les durées de décharge. Cette durée est plus élevée pour l'acier (0,33 contre 0,2h pour le verre), en accord avec une capacité de stockage du matériau supérieure (4,6 contre 2,7 MJ.m<sup>-3</sup>.K<sup>-1</sup> pour le verre). Le coût estimé pour ces matériaux solides est de l'ordre de 800€/t, ce qui confirme l'intérêt économique de les utiliser pour remplacer en partie l'huile thermique (5,5€/litre soit environ 5000€/t).

## 5. Conclusions et perspectives

Le stockage thermocline dual-media constitue une solution prometteuse aux problèmes d'efficacité énergétique, qui a su attirer l'intérêt des chercheurs et des industriels. L'étude des matériaux utilisés au sein du stockage et de leur compatibilité est primordiale pour estimer la performance et la durée de vie du système, notamment dans des gammes de température inexplorées dans la littérature. Les tests de compatibilité conduits au laboratoire LaTEP avec l'huile Jarytherm® DBT et différents solides à 340°C ont permis de sélectionner deux matériaux prometteurs, l'acier et le verre. Ces deux couples huile/solide ont ensuite été étudiés à l'échelle pilote, dans une cuve de stockage développée par Bertin Technologies. Afin de compléter l'étude expérimentale réalisée sur ce pilote par Bertin Technologies, un modèle de stockage monodimensionnel a été développé et validé sur l'installation, pour deux cas de décharge. Le processus de décharge étant validé, les prochaines études porteront sur la modélisation d'une charge, et finalement du cyclage. Ce modèle permettra également une extrapolation des résultats expérimentaux obtenus, en élargissant les conditions opératoires testées. En intégrant au modèle les cinétiques de dégradation observées sur l'huile lors des tests de vieillissement, il deviendra possible de prédire les performances d'un tel système après plusieurs années de fonctionnement.

## Références

- [1] IRENA, « Renewables and Electricity Storage: A technology roadmap for REmap 2030 - IRENA\_REmap\_Electricity\_Storage\_2015.pdf », 2015. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\\_REmap\\_Electricity\\_Storage\\_2015.pdf](https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_REmap_Electricity_Storage_2015.pdf). [Consulté le: 09-janv-2018].
- [2] Birger Lauersen, « Future prospects on CHP/DHC », 26-nov-2013. [En ligne]. Disponible sur: [http://cem-backup.carrespace.fr/cem-ok/www.cleanenergyministerial.org/Portals/2/pdfs/CHP\\_Workshop/Lauersen\\_B\\_Future\\_prospects\\_on\\_CHP-DHC%2c\\_CEM\\_CHP-DHC%2c\\_Helsinki\\_26\\_Nov\\_2013.pdf](http://cem-backup.carrespace.fr/cem-ok/www.cleanenergyministerial.org/Portals/2/pdfs/CHP_Workshop/Lauersen_B_Future_prospects_on_CHP-DHC%2c_CEM_CHP-DHC%2c_Helsinki_26_Nov_2013.pdf).
- [3] K. A. R. Ismail et R. Stuginsky Jr, « A parametric study on possible fixed bed models for pcm and sensible heat storage », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 19, n° 7, p. 757-788, juill. 1999.
- [4] H. Singh, R. P. Saini, et J. S. Saini, « A review on packed bed solar energy storage systems », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, n° 3, p. 1059-1069, avr. 2010.
- [5] T. Esence, A. Bruch, S. Molina, B. Stutz, et J.-F. Fourmigué, « A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems », *Sol. Energy*, vol. 153, p. 628-654, sept. 2017.
- [6] J. Hallet R. W. et R. L. Gervais, « Central receiver solar thermal power system, Phase 1. CDRL Item 2. Pilot plant preliminary design report. Volume V. Thermal storage subsystem. [Sensible heat storage using Caloria HT43 and mixture of gravel and sand] », SAN/1108-8/5, MDC-G-6776(Vol.5), 5266573, oct. 1977.
- [7] M. Geyer, W. Bitterlich, et K. Werner, « The Dual Medium Storage Tank at the IEA/SSPS Project in Almeria (Spain); Part I: Experimental Validation of the Thermodynamic Design Model », *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 109, n° 3, p. 192, 1987.

- [8] V. C. Bhavsar et A. R. Balakrishnan, « Pebble bed-oil thermal energy storage for solar thermo-electric power systems », *Int. J. Energy Res.*, vol. 14, n° 2, p. 233-240, 1990.
- [9] A. Mawire et M. McPherson, « Experimental characterisation of a thermal energy storage system using temperature and power controlled charging », *Renew. Energy*, vol. 33, n° 4, p. 682-693, avr. 2008.
- [10] A. Mawire, M. McPherson, R. R. J. van den Heetkamp, et S. H. Taole, « Experimental volumetric heat transfer characteristics between oil and glass pebbles in a small glass tube storage », *Energy*, vol. 35, n° 3, p. 1256-1263, mars 2010.
- [11] M. M. Valmiki, W. Karaki, P. Li, J. V. Lew, C. Chan, et J. Stephens, « Experimental Investigation of Thermal Storage Processes in a Thermocline Tank », *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 134, n° 4, p. 041003, 2012.
- [12] A. Bruch, J. F. Fourmigué, et R. Couturier, « Experimental and numerical investigation of a pilot-scale thermal oil packed bed thermal storage system for CSP power plant », *Sol. Energy*, vol. 105, p. 116-125, juill. 2014.
- [13] S. Rodat, A. Bruch, N. Dupassieux, et N. E. Mourchid, « Unique Fresnel Demonstrator Including ORC and Thermocline Direct Thermal Storage: Operating Experience », *Energy Procedia*, vol. 69, p. 1667-1675, mai 2015.
- [14] J.-F. Hoffmann, « Stockage thermique pour centrale solaire thermodynamique à concentration mettant en oeuvre des matériaux naturels ou recyclés », Thèse de l'université de Perpignan Via Domitia, Perpignan, 2015.
- [15] T. Fasquelle, Q. Falcoz, P. Neveu, F. Lecat, N. Bouillet, et G. Flamant, « Operating results of a thermocline thermal energy storage included in a parabolic trough mini power plant », *AIP Conf. Proc.*, vol. 1850, n° 1, p. 080010, juin 2017.
- [16] P. Wen, J. Van, W. Karaki, C. Lik, J. Stephens, et J. E., « Transient Heat Transfer and Energy Transport in Packed Bed Thermal Storage Systems », in *Developments in Heat Transfer*, M. A. Dos Santos Bernardes, Éd. InTech, 2011.
- [17] R. Bayón et E. Rojas, « Simulation of thermocline storage for solar thermal power plants: From dimensionless results to prototypes and real-size tanks », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 60, p. 713-721, mai 2013.
- [18] S. M. Flueckiger, B. D. Iverson, S. V. Garimella, et J. E. Pacheco, « System-level simulation of a solar power tower plant with thermocline thermal energy storage », *Appl. Energy*, vol. 113, p. 86-96, janv. 2014.
- [19] C. Xu, Z. Wang, Y. He, X. Li, et F. Bai, « Sensitivity analysis of the numerical study on the thermal performance of a packed-bed molten salt thermocline thermal storage system », *Appl. Energy*, vol. 92, p. 65-75, avr. 2012.
- [20] Pacheco, James E., Showalter, Steven K., et Kolb, William J., « Development of a Molten-Salt Thermocline Thermal Storage System for Parabolic Trough Plants », 2001.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à l'ADEME et au programme « Investissements d'Avenir », dont bénéficie le projet Therm'Stock. Ils remercient également CNIM, à l'initiative du projet, et Babcock Wanson et ARKEMA, qui ont fourni gracieusement les matériaux utilisés pour les essais de compatibilité. Les remerciements vont également à Bertin Technologies pour la mise à disposition des données du pilote, pour la validation du modèle de stockage développé.