

Etudes de vieillissement et compatibilité de couples huile thermique - solide pour une application en stockage thermocline.

Sophie MOLINA^{1*}, Didier HAILLOT¹, Jean-Pierre BEDECARRATS¹, Alexandre DEYDIER²

¹ Univ Pau & Pays Adour, Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés-IPRA, EA1932, 64000, Pau, France

²CNIM (Constructions Industrielles de la Méditerranée), Siège social, Direction Générale, 35, rue de Bassano, 75008 Paris, France

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

Résumé - Parmi les systèmes de stockage d'énergie thermique développés à ce jour, le stockage thermocline dual-media est une option économique et démontrée à plusieurs échelles, fonctionnant avec un mélange d'un fluide et d'un solide peu coûteux. La mise en présence de ces matériaux pose la question de leur compatibilité, et de la performance de ces systèmes sur le long terme. Des tests de compatibilité ont été réalisés en laboratoire entre l'huile Jarytherm® DBT et plusieurs solides. Ces tests sur 500h à 330 et 340°C ont montré une forte incompatibilité de l'huile et des roches choisies, avec une dégradation accélérée du fluide, et des résultats prometteurs avec l'acier et l'alumine.

Nomenclature

| | | | |
|-----------------------|---|----------------|------------------------------|
| C_p | chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$ | μ | viscosité dynamique, $Pa.s$ |
| d_p | diamètre de particule, mm | ρ | masse volumique, $kg.m^{-3}$ |
| T | température, $^{\circ}C$ | <i>Indices</i> | |
| <i>Symboles grecs</i> | | f | fluide |
| λ | conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$ | s | solide |

1. Introduction

La croissance de la consommation énergétique mondiale s'accompagne de contraintes toujours plus fortes sur la production et l'utilisation de l'énergie. Parmi les solutions technologiques envisagées en réponse à ces problématiques, le stockage d'énergie thermique a été récemment reconnu par l'IRENA (International Renewable ENergy Agency) comme l'une des voies les plus pertinentes pour l'intégration des sources renouvelables dans la production d'énergie [1].

Le stockage thermique se décline en trois groupes principaux : les technologies sensible, latente et thermochimique [2]. Le stockage sensible, qui emmagasine l'énergie au travers de l'élévation de température d'un matériau de stockage, compte plusieurs installations de taille industrielle en fonctionnement, notamment en association avec des centrales solaires à concentration [3]. Le système à deux cuves, une pour le stockage du fluide chaud et une pour le fluide froid, a notamment fait ses preuves sur plusieurs années d'exploitation, et constitue à ce jour la référence en matière de technologie sensible [4]. Le stockage latent met en jeu des densités de stockage plus élevées que le système sensible, car il utilise le changement d'état du matériau. Cette technologie est prometteuse, mais ne bénéficie pour l'instant que d'un nombre très réduit de démonstrateurs industriels [5]. Le stockage thermochimique est à ce jour le moins mature, mais il est également très prometteur, car basé sur des réactions chimiques réversibles permettant un stockage de l'énergie thermique avec une densité énergétique encore plus importante et sur de longues durées [2].

Au vu des degrés de maturité des technologies de stockage présentées précédemment, le stockage sensible semble à ce jour le plus cohérent dans une optique de développement à court terme. Parmi les systèmes de stockage existants, la solution thermocline dual-media, qui consiste à utiliser un seul réservoir de stockage pour les fluides chaud et froid [4], [6], a été sélectionnée. Cette alternative à la solution plus répandue du stockage à deux réservoirs permet de réduire notablement les coûts associés en utilisant un seul réservoir et en remplaçant une partie du fluide coûteux par un solide bien moins onéreux [7].

Le principe de fonctionnement de ce type de stockage est schématisé dans la *Figure 1*. En charge, le fluide chaud est introduit par le haut du réservoir, et cède son énergie au 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.

L'étude d'un système thermocline dual-media passe dans une première phase par la sélection des matériaux de stockage, suivie de tests de compatibilité de ces matériaux, réalisés ici sur un banc expérimental disponible au laboratoire.

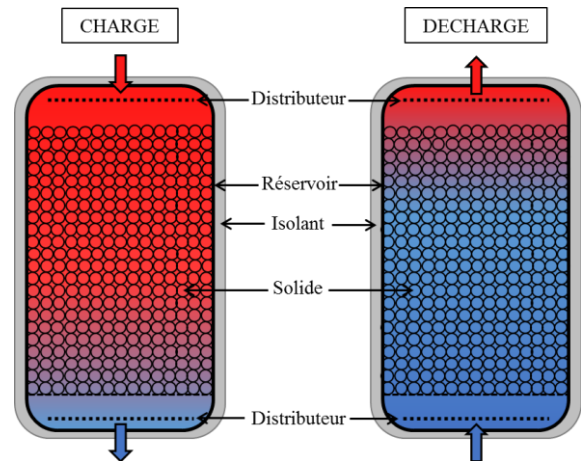


Figure 1 : Schéma de fonctionnement du stockage thermocline

2. Revue bibliographique : sélection des matériaux de stockage

La gamme de température visée se situe entre 100 et 350°C, afin de répondre notamment aux problématiques de récupération de chaleur fatale en milieu industriel. Dans la littérature, les principaux fluides rencontrés pour le stockage sensible sont l'eau, l'air, les huiles thermiques et les sels fondus [2]. Au vu de la gamme de température envisagée, les huiles thermiques semblent ici la meilleure alternative. Plusieurs prototypes de stockage thermocline dual-media en huile ont été étudiés dans la littérature : quelques-unes de leurs caractéristiques sont rassemblées dans le *Tableau 1*.

| Référence | Fluide | Solide | $C_{P,s}$ J.kg ⁻¹ .K ⁻¹ | $\rho_s \cdot C_{P,s}$ MJ.m ⁻³ .K ⁻¹ | $\rho_s \cdot C_{P,s} / \rho_f \cdot C_{P,f}$ | T_{MAX} °C | Années de fonctionnement |
|------------|--------------------|--------------|--|---|---|-----------------|--------------------------------|
| [8] | Caloria® HT43 | Roches/Sable | 1035 | 2,7 | 1,4 | 302 | 1976 1982 - 1986 |
| [9] | Therminol® 55 | Fer | 565 | 4,1 | 2,2 | 180 | 1985 - ? |
| [10] | Hytherm 500 | Roches | - | - | - | 250 | 1989 - ? |
| [11] | Calflo® HTF | Roches | 745 | 2,1 | 1,1 | 240 | 2005 - ? |
| [12] | Shell Thermia B | Verre | 789 | 1,9 | 1,0 | 200 | 2009 - ? |
| [13] | Xceltherm® 600 | Roches | 790 | 2,1 | 1,1 | 130 | 2011 - ? |
| [6], [14] | Therminol® 66 | Roches/Sable | 900 | 2,3 | 1,1 | 300 | 2012 - actuel 2013 - actuel |
| [15], [16] | Huile de colza | Quartzite | 830 | 2,1 | 1,1 | 210 | 2014 - ? |
| [17], [18] | Jarytherm® DBT | Alumine | 750 | 2,8 | 1,3 | 300 | 2015 - actuel |

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

Aucun des stockages présentés dans le *Tableau 1* ne fonctionne à une température supérieure à 300°C, contrairement à ce qui est envisagé dans l'étude présentée ici. Cependant, les retours d'expérience accumulés sur ces systèmes permettent de valider la technologie thermocline dual-media, à leurs températures de fonctionnement respectives. Ces retours ont également apportés des réponses à la mise en pratique de ces stockages, en termes de construction, de tenue mécanique ou de gestion des pertes thermiques [4], [8].

Parmi les huiles thermiques apparaissant dans le *Tableau 1*, seules deux sont garanties par leurs fournisseurs jusqu'à 350°C : les huiles Therminol® 66 et Jarytherm® DBT. Cependant, d'autres huiles aux propriétés similaires sont disponibles. Une comparaison de ces fluides est présentée dans le *Tableau 2*, basée sur les données issues de la documentation fournisseur et des fiches de sécurité des produits [19]–[24].

| | <i>Jarytherm® DBT</i> | <i>Diphyl® THT</i> | <i>Dowtherm® G</i> | <i>Dynalene® HT</i> | <i>Marlotherm® SH</i> | <i>Therminol® 66</i> | <i>Therminol® 68</i> |
|--|---------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $\rho \cdot C_P$ 350°C (MJ.m ⁻³ .K ⁻¹) | 2,11 | 2,11 | 2,14 | 2,25 | 2,26 | 2,12 | 2,12 |
| λ 350°C (W.m ⁻¹ .K ⁻¹) | 0,101 | 0,101 | 0,088 | 0,087 | 0,086 | 0,088 | 0,097 |
| μ 20°C (mPa.s) | 52,3 | 101 | 15,7 | 49 | 49,1 | 123,5 | 35,7 |
| T _{Auto-inflammation} (°C) | 500 | - | 432 | 450 | 450 | 374 | 400 |
| Composés majoritaires | 1 | 2 | 2 | - | 1 | 3 | 4 |

Tableau 2 : Comparaison des huiles thermiques commerciales

Une première sélection a été réalisée sur la base du *Tableau 2*, qui comprend à la fois des critères de performance énergétique ($\rho \cdot C_P$, λ), de sécurité (T_{auto-inflammation}) et de mise en œuvre technique (μ , composition). Cette sélection sera ensuite confirmée par une étude de compatibilité en laboratoire.

En ce qui concerne la capacité de stockage des huiles ($\rho \cdot C_P$), un avantage apparaît pour les huiles Dynalene® HT et Marlotherm® SH, avec un résultat à 350°C supérieur de 7% à la capacité de la Jarytherm® DBT. Cependant, la technologie choisie étant une thermocline dual-media, une part importante du stockage sera réalisée dans le solide, et ce paramètre ne peut donc à lui seul conditionner le choix du fluide utilisé. La conclusion est identique pour la conductivité thermique, qui présente des valeurs similaires pour toutes les huiles.

En terme de fonctionnement du stockage, les viscosités des huiles Dowtherm® G et Therminol® 68 sont intéressantes car faibles à température ambiante, ce qui facilitera la mise en circulation du fluide. Du point de vue sécurité, ce sont les huiles Jarytherm® DBT, Dynalene® HT et Marlotherm® SH qui présentent les températures d'auto-inflammation les plus éloignées des conditions normales de fonctionnement du stockage. Au contraire, l'huile Therminol® 66 est limitée à 374°C, ce qui est très proche de la température maximale envisagée pour la thermocline (350°C). Pour finir, le nombre de composants majoritaires est considéré afin d'estimer la facilité d'analyse des fluides par chromatographie, utilisée pour le suivi de la dégradation de l'huile thermique. Comme pour le critère sécurité, ce sont les huiles Jarytherm® DBT et Marlotherm® SH qui ressortent, avec un seul composant majoritaire, qui sera donc facilement détectable et suivi sur le chromatogramme.

Au vu des comparaisons effectuées, et du faible impact de la capacité de stockage, c'est l'huile Jarytherm® DBT (abrégée par la suite en JDBT), fournie par la société française

ARKEMA, qui a été sélectionnée pour la suite des études en laboratoire. Les autres huiles évaluées ne sont pas pour autant écartées de l'étude, et feront également l'objet de tests.

3. Etude de compatibilité huile-solides

3.1. Présentation du banc de test

Pour réaliser les tests de compatibilité, le laboratoire LaTEP dispose d'un banc d'essai dédié, initialement développé par A. Lomonaco lors de sa thèse [5]. Le banc se compose de huit cellules cylindriques en acier inoxydable de diamètre interne 45mm et de hauteur 88mm, soit un volume total de 140 mL. Ces cellules remplies de 40 mL d'huile ou d'un mélange huile-solide sont chauffées de manière indépendante via des colliers chauffants de 620 W pouvant atteindre 400°C. Chaque cellule est étanche et alimentée en azote, afin de garantir l'absence d'oxygène dans le ciel gazeux lors des tests de compatibilité. Le suivi des expériences est réalisé par la mesure de la température, avec deux thermocouples de type K placés à l'intérieur de la cellule et au niveau du collier chauffant. La précision de la mesure de la température est évaluée à $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Un suivi de la masse d'échantillon introduite est également effectué avant et après vieillissement, afin de détecter une possible perte de masse lors des purges ou dans les canalisations du circuit d'azote. L'installation expérimentale est présentée sur les *Figure 2* et *Figure 3*.



Figure 2 : *Vue du banc d'essai*



Figure 3 : *Vue d'une cellule de test*

3.2. Essais de compatibilité

Au vu de la diversité de matériaux solides utilisés dans la littérature (*Tableau 1*), il semble intéressant de tester chaque grande famille de matériau avec l'huile JDBT. Dans un premier temps, le mélange roches/sable utilisé dans [6] a été étudié, en séparant chacun des composés afin d'évaluer leur contribution au vieillissement de l'huile. Cette première campagne d'essai a été réalisée en maintenant chaque échantillon à 330°C (température à l'intérieur de la cellule) sur des durées de 500 et 700h. Les essais suivants ont fonctionné à 340°C sur 500h, afin d'accélérer les phénomènes de dégradation de l'huile : selon les données fournisseur, une augmentation de 10°C divise la durée de vie du fluide par deux. Tous les tests sont récapitulés dans le *Tableau 3*. La surface d'échange est calculée en considérant que les matériaux solides sont sphériques et non poreux, donc que seule la surface extérieure est en contact avec l'huile (pas ou peu d'imprégnation). Chaque essai est identifié par le numéro de campagne d'essai suivi du numéro de la cellule utilisée.

| Essai | Fluide | Solide | d_p (cm) | Surface d'échange (cm ²) | Masse huile / Masse solide | T (°C) | Durée (h) |
|-------|--------|--------------|------------|--------------------------------------|----------------------------|--------|-----------|
| C1-1 | JDBT | Roches | 3 | 57 | 0,96 | 330 | 500 |
| C1-2 | JDBT | Roches/Sable | 3/0,3 | 395 | 0,37 | 330 | 500 |
| C1-3 | JDBT | Sable | 0,3 | 541 | 0,56 | 330 | 500 |
| C1-4 | JDBT | - | - | - | - | 330 | 500 |
| C1-5 | JDBT | - | - | - | - | 330 | 700 |
| C1-7 | JDBT | Roches/Sable | 3/0,3 | 493 | 0,27 | 330 | 700 |
| C3-2 | JDBT | Béton | 2 | 50 | 0,86 | 340 | 500 |
| C3-4 | JDBT | - | - | - | - | 340 | 500 |
| C3-6 | JDBT | Quartzite | 0,4 | 49 | 3,55 | 340 | 500 |
| C3-7 | JDBT | Alumine | 1,9 | 34 | 0,82 | 340 | 500 |
| C3-8 | JDBT | Acier | 0,7 | 83 | 0,50 | 340 | 500 |

Tableau 3 : Essais de compatibilité réalisés avec les différents solides

3.3. Résultats obtenus

Chaque échantillon d'huile récupéré après test de compatibilité est analysé afin de détecter une possible évolution du fluide et de ses propriétés lors du vieillissement. La composition de l'huile, mesurée par chromatographie, est un bon indicateur de dégradation, à travers le suivi du pourcentage de dibenzyltoluène (DBT), le composant majoritaire de l'huile JDBT. Les propriétés thermo-physiques du fluide sont également suivies, et des mesures de chaleur spécifique, masse volumique et viscosité sont en cours au laboratoire. Les résultats de l'analyse chromatographique sont listés dans le *Tableau 4*, et permettent de mettre en évidence de manière quantitative l'influence des solides, en évaluant le pourcentage de DBT restant dans l'huile vieillie. Pour chaque échantillon, trois mesures sont réalisées et la moyenne et son écart-type sont présentés.

| Essai | Neuve | C1-1 | C1-2 | C1-3 | C1-4 | C1-5 | C1-7 | C3-2 | C3-4 | C3-6 | C3-7 | C3-8 |
|----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| DBT (%) | 98,7 | 77,5 | 71,2 | 67,7 | 96,1 | 95,6 | 37,1 | 90,8 | 94,9 | 89,4 | 93,8 | 94,0 |
| Ecart-type (%) | 0,3 | 0,1 | 0,6 | 0,7 | 0,2 | 0,4 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0 |

Tableau 4 : Résultats des analyses chromatographiques

Les analyses conduites sur la Jarytherm® DBT neuve servent de référence pour l'évaluation de la dégradation de l'huile. Les huiles vieillies seules (C1-4, C1-5 et C3-4) contiennent toujours un fort pourcentage de DBT, de l'ordre de 95-96%, et la dégradation dans ces cas est considérée minime. En ce qui concerne la compatibilité de la Jarytherm® DBT avec les différents matériaux solides, de très bons résultats sont obtenus pour l'alumine (C3-7) et l'acier (C3-8), avec des teneurs en DBT de l'ordre de 94%. Le béton et la quartzite sont également intéressants, même si la dégradation de l'huile est plus marquée. Enfin, une forte incompatibilité de l'huile avec les roches et le sable est mise en évidence, malgré une température de vieillissement plus faible que pour les autres tests (330°C contre 340°C). La dégradation de l'huile est notamment très élevée pour l'échantillon C1-7, avec un pourcentage restant de DBT de seulement 37,1%. Plusieurs produits de dégradation ont été identifiés par chromatographie, avec notamment le toluène, le benzyltoluène ou le diphenylméthane. Dans le cas de l'échantillon fortement dégradé (C1-7), ces produits représentent un pourcentage non négligeable de l'huile, avec 7% de toluène et 17% de benzyltoluène. Ces dégradations

importantes de l'huile mise en contact avec les roches et/ou le sable semblent indiquer une catalyse des réactions de dégradation de l'huile, d'autant plus forte que les surfaces d'échange sont très élevées pour les essais avec le sable. Une analyse par ICP (Inductively Coupled Plasma) des solides utilisés pour les tests de compatibilité est en cours, afin de connaître leur composition chimique et ainsi identifier un possible catalyseur.

D'après les résultats obtenus pour ces premiers essais, une diminution du pourcentage de DBT traduit donc une dégradation du fluide de transfert.

Cependant, les premières mesures de chaleur spécifique montrent que seule une dégradation très marquée de l'huile, telle que celle observée pour l'échantillon C1-7, conduit à une modification de cette propriété (*Figure 4*). Les mesures sont réalisées par calorimétrie différentielle à balayage (Diamond DSC, Perkin-Elmer), jusqu'à 280°C (la température est limitée par le type de capsules utilisé).

L'écart observé avec l'huile neuve reste cependant faible, de l'ordre de 6% à 260°C.

Il faut également ramener les résultats de ces essais à un fonctionnement réel de stockage thermocline. Avec une hypothèse de 300 cycles par an, et 4h par cycle à la température haute, les tests de 500h effectués au LaTEP couvrent 125 jours, soit moins d'une demi-année de fonctionnement. Des essais longue durée sont donc nécessaires afin de confirmer les tendances de dégradation de l'huile, en particulier pour les matériaux avec lesquels la compatibilité est satisfaisante (alumine ou acier par exemple). A l'inverse, les résultats obtenus sur 500 et 700h avec le mélange de roches et sable contre-indiquent fortement l'utilisation de ces matériaux dans les conditions de fonctionnement envisagées (température haute de 350°C). En complément, des tests en cyclage vont être réalisés pour les comparer aux résultats obtenus en isotherme. Le fait que les essais soient réalisés en statique engendre également un écart au fonctionnement réel du stockage. Cependant, en l'absence de circulation, l'huile est en permanence au contact de la paroi de la cellule de test, qui est à une température supérieure à celle mesurée au centre (l'écart peut atteindre une vingtaine de degrés). Une portion de l'huile voit donc sur la durée du test une température supérieure à la température de vieillissement visée (par exemple 340°C) et sera donc davantage dégradée que l'huile au centre de la cellule. Ce phénomène n'est pas visible pour un fluide en mouvement, et le vieillissement devrait donc être plus limité. Un autre aspect du fonctionnement dans un système de stockage est que l'huile n'est pas entièrement stockée dans le réservoir, au contact du solide, mais se répartit également dans les canalisations. Ainsi, un volume d'huile donné sera moins fréquemment en contact avec le solide que dans les tests en statique, ce qui devrait là aussi réduire la dégradation.

4. Conclusion

Le stockage thermocline dual-media constitue une alternative économique au stockage à deux cuves, dans une optique de développement commercial à court terme. La première étape

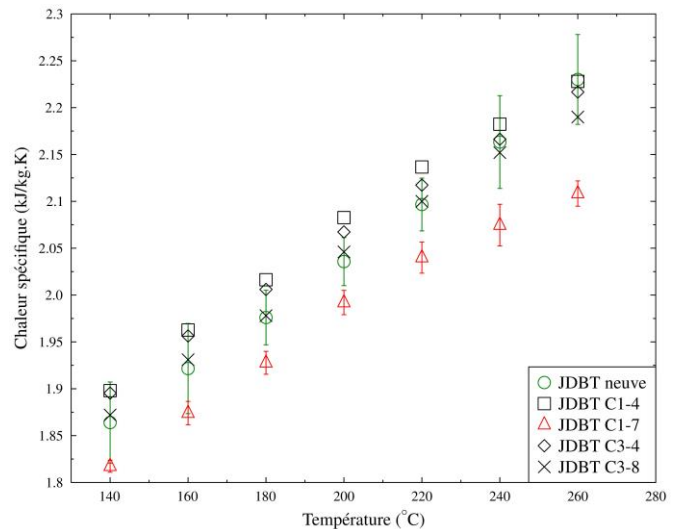


Figure 4 : Mesures de chaleur spécifique de l'huile réalisées au LaTEP (Diamond DSC, Perkin-Elmer)

de définition de ce type de stockage correspond à la sélection et la caractérisation des matériaux. Une étude de la littérature et des fluides disponibles dans le commerce a permis de sélectionner l'huile Jarytherm® DBT comme fluide de transfert, et de tester sa compatibilité avec plusieurs solides, afin de choisir la combinaison la mieux adaptée au système visé. Les tests ont été réalisés sur un banc d'essai disponible au laboratoire, sur 500 et 700h avec des roches et du sable à 330°C, et sur 500h avec de l'acier, de l'alumine, du béton et de la quartzite à 340°C. La compatibilité de l'huile avec ces différents matériaux a été évaluée par analyse chromatographique, au travers du suivi du pourcentage de dibenzyltoluène, le composant majoritaire de l'huile. La mise en présence de l'huile avec des solides a dans tous les cas conduit à une accélération de la dégradation de l'huile, qui reste cependant minime pour l'alumine ou l'acier. À l'opposé, une incompatibilité forte entre l'huile et le mélange roches/sable a été mise en évidence, avec une possible catalyse de l'huile par certains composants du solide. Une analyse ICP est en cours, afin de connaître les compositions chimiques de ces matériaux. En parallèle, des tests longue durée ont été lancés, pour déterminer les cinétiques de dégradation de l'huile. Enfin, un modèle de stockage 1D est en cours de développement pour quantifier l'influence des matériaux choisis et de leurs propriétés sur les performances du stockage thermocline.

Références

- [1] “Renewables and Electricity Storage: A technology roadmap for REmap 2030 - IRENA_REmap_Electricity_Storage_2015.pdf.” [Online]. Available: https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_REmap_Electricity_Storage_2015.pdf. [Accessed: 06-Jan-2017].
- [2] A. Gil *et al.*, “State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 31–55, Jan. 2010.
- [3] M. Medrano, A. Gil, I. Martorell, X. Potau, and L. F. Cabeza, “State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 56–72, Jan. 2010.
- [4] EPRI, “Solar Thermocline Storage Systems: Preliminary Design Study.” Palo Alto, CA, 2010.
- [5] A. Lomonaco, “Stockage d'énergie thermique par matériaux à changements de phase adapté aux centrales solaires thermodynamiques,” Thèse de l'université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, 2015.
- [6] A. Bruch, J. F. Fourmigué, and 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, pp. 116–125, Jul. 2014.
- [7] Pacheco, J. E., Showalter, S. K., and Kolb, W. J., “Development of a Molten-Salt Thermocline Thermal Storage System for Parabolic Trough Plants,” 2001.
- [8] J. Hallet R. W. and 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.
- [9] M. Geyer, W. Bitterlich, and 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, no. 3, p. 192, 1987.
- [10] V. C. Bhavsar and A. R. Balakrishnan, “Pebble bed-oil thermal energy storage for solar thermo-electric power systems,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 14, no. 2, pp. 233–240, 1990.

- [11] A. Mawire and M. McPherson, “Experimental characterisation of a thermal energy storage system using temperature and power controlled charging,” *Renew. Energy*, vol. 33, no. 4, pp. 682–693, Apr. 2008.
- [12] A. Mawire, M. McPherson, R. R. J. van den Heetkamp, and S. H. Taole, “Experimental volumetric heat transfer characteristics between oil and glass pebbles in a small glass tube storage,” *Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 1256–1263, Mar. 2010.
- [13] M. M. Valmiki, W. Karaki, P. Li, J. V. Lew, C. Chan, and J. Stephens, “Experimental Investigation of Thermal Storage Processes in a Thermocline Tank,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 134, no. 4, p. 041003, 2012.
- [14] S. Rodat, A. Bruch, N. Dupassieux, and N. E. Mourchid, “Unique Fresnel Demonstrator Including ORC and Thermocline Direct Thermal Storage: Operating Experience,” *Energy Procedia*, vol. 69, pp. 1667–1675, May 2015.
- [15] J.-F. Hoffmann, “Stockage thermique pour centrale solaire thermodynamique à concentration mettant en œuvre des matériaux naturels ou recyclés,” Thèse de l’université de Perpignan Via Domitia, Perpignan, 2015.
- [16] J.-F. Hoffmann, T. Fasquelle, V. Goetz, and X. Py, “A thermocline thermal energy storage system with filler materials for concentrated solar power plants: Experimental data and numerical model sensitivity to different experimental tank scales,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 100, pp. 753–761, May 2016.
- [17] PROMES CNRS, “Equipex SOCRATE (Solaire Concentré: Recherches Avancées et Technologies Energétiques) - Microcentrale solaire « MicroSol-R ».” [Online]. Available: <http://www.equipex-socrate.fr/equipements/microsol-r.html>. [Accessed: 22-Nov-2016].
- [18] T. Fasquelle, Q. Falcoz, P. Neveu, J. Walker, and G. Flamant, “Compatibility Study Between Synthetic Oil and Vitrified Wastes for Direct Thermal Energy Storage,” *Waste Biomass Valorization*, Jun. 2016.
- [19] “Produits - Fluides caloporteurs Jarytherm® par Arkema.” [Online]. Available: <http://www.arkema.fr/fr/produits/product-finder/range/Fluides-caloporteurs-Jarytherm/2/>. [Accessed: 06-Jan-2017].
- [20] “AII | Diphyl®.” [Online]. Available: [en/products-applications/applications-aii-brands/diphylR/](http://www.arkema.fr/en/products-applications/applications-aii-brands/diphylR/). [Accessed: 06-Jan-2017].
- [21] “DOWTHERM™ | Heat Transfer Fluids | The Dow Chemical Company.” [Online]. Available: <http://www.dow.com/heattrans/products/synthetic/dowtherm.htm>. [Accessed: 06-Jan-2017].
- [22] “High temperature synthetic oil heat transfer fluid - Dynalene HT.” [Online]. Available: <https://www.dynalene.com/High-Temperature-Heat-Transfer-Fluid-Dynalene-HT-s/1838.htm>. [Accessed: 06-Jan-2017].
- [23] “Organics.” [Online]. Available: <http://www.sasolgermany.de/index.php?id=135&L=1>. [Accessed: 06-Jan-2017].
- [24] “French | Therminol.” [Online]. Available: <https://www.therminol.com/french>. [Accessed: 06-Jan-2017].

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 les entreprises suivantes, qui ont fourni gracieusement les matériaux utilisés pour les essais de compatibilité : Babcock Wanson (Jarytherm® DBT, acier, béton), ARKEMA (mélange de roches et sable), Saint-Gobain (alumine) et Carayon (quartzite).