

Etude du comportement thermo-mécanique des réservoirs de stockage thermique de type thermocline solide/liquide.

Nahia SASSINE¹, Arnaud BRUCH¹, Barthélemy HARTHONG², Frédéric-Victor DONZE²

¹Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)
17 avenue des Martyrs – 38000 Grenoble.

²Université Grenoble Alpes (UGA), laboratoire 3SR,
Saint Martin d'Hères – 38000 Grenoble

Résumé – Les régénérateurs de type solide/fluide constituent une solution pertinente pour le stockage de chaleur dans les centrales solaires à concentration. Un tel dispositif est constitué d'un réservoir rempli d'un lit granulaire à travers lequel circule un fluide caloporteur. Cependant, dans de tels dispositifs, le réservoir peut être soumis à des défaillances catastrophiques induites par des phénomènes thermo-mécaniques alors que les contraintes thermiques s'accumulent successivement pendant les cycles de chargement et de déchargement. Cet article vise à étudier l'évolution des contraintes appliquées sur la paroi du réservoir rempli d'un milieu granulaire de type lit de rochers au fur et à mesure des cycles thermiques, à l'aide d'un modèle numérique basé sur la méthode des éléments discrets (DEM). Deux configurations thermiques différentes ont été étudiées: (i) un chauffage/refroidissement homogène du réservoir sur sa hauteur et (ii) une configuration plus réaliste caractérisée par l'existence d'un gradient de température vertical mobile. Les contraintes appliquées sur le réservoir dans les deux cas sont comparées ainsi que la réponse cinématique du matériau granulaire interne.

Nomenclature

K	rigidité du ressort, Pa	ϕ	angle de friction, $^\circ$
F	force de contact, N	$\vec{\omega}$	vitesse de rotation, s^{-1}
H	hauteur du lit de roches, m	<i>Indices et exposants</i>	
r	rayon, m	i	particule i
u	déplacement, m	j	particule j
T	température, K	n	direction normale
\vec{x}	vecteur position, m	t	direction tangentielle
\vec{v}	vecteur vitesse, m/s	g	granulats
<i>Symboles grecs</i>		max	maximal
α	coefficient de dilatation thermique, K^{-1}	min	minimal
δ	longueur d'interpénétration, m	z	direction verticale

1. Introduction

Les systèmes de stockage d'énergie thermique sont des éléments centraux dans les centrales solaires à concentration car ils peuvent atténuer l'effet de la variabilité et de l'intermittence du rayonnement solaire pour assurer une exploitation continue. Le stockage de chaleur de type thermocline solide/liquide, dans lequel le stockage de chaleur est réalisé dans une seule cuve, est considérée comme une alternative moins coûteuse à l'installation standard à deux cuves. L'utilisation d'un matériau de remplissage solide peu coûteux, tel que du sable et du gravier, permet une réduction de coût pouvant atteindre 33% par rapport à une approche traditionnelle. Cependant, de tels dispositifs peuvent subir une défaillance structurelle, due à

un phénomène connu sous le nom de cliquet thermique (« thermal ratcheting ») [1]. La rupture prématurée du réservoir est provoquée à la suite de l'accumulation de contraintes d'un cycle thermique à l'autre. A titre d'exemple, lorsqu'un lit de roches et de l'acier sont utilisés respectivement comme matériau de stockage et comme matériau de réservoir, la paroi du réservoir se dilate plus que le lit de roches pendant le processus de charge. Il se crée alors un espace entre le lit de roches et les parois du réservoir qui est aussitôt rempli par le lit de roches qui s'affaisse sous son propre poids. Pendant la phase de décharge, le réservoir se contracte contre le lit, ce qui entraîne des contraintes thermiques supplémentaires. Ce phénomène est répété jusqu'à ce que la limite d'élasticité du matériau du réservoir soit dépassée, puis le réservoir se plastifie lentement jusqu'à sa rupture. Jusqu'à présent, ce phénomène a été peu étudié malgré son importance dans la conception des réservoirs et dans l'estimation de leur durée de vie.

Deux approches sont généralement envisagées pour modéliser le comportement thermo-mécanique du milieu granulaire dans les réservoirs de stockage. La première approche consiste à considérer le lit de roches comme un milieu continu en supposant que sa microstructure est petite par rapport à la taille du conteneur. Pour des raisons de simplicité, des propriétés homogènes et isotropes sont généralement attribuées au matériau de remplissage. Cependant, les phénomènes de réarrangement des particules lors de cycles en température ne sont pas pris en compte par une modélisation de type milieu continu, de sorte que la densification au cours des cycles ne peut pas être explicitement reproduite en utilisant les modèles constitutifs communément disponibles. La plupart des études utilisant cette approche sont basées sur la réponse structurale expérimentale de la cuve de stockage de 170 MWh (de 9,1 m de diamètre intérieur et 14 m de hauteur) intégrée dans la centrale solaire Solar One [2, 3]. Cependant, ces données expérimentales souffrent d'une grande incertitude qui limite leur utilisation à des fins de compréhension et de validation. En outre, le réservoir a connu une défaillance (non liée au phénomène de thermal ratcheting) au bout de quelques cycles, ce qui réduit, l'illustration d'effets possible du thermal ratcheting à long terme.

A l'opposé, une approche plus explicite, basée sur la «méthode des éléments discrets» (DEM) qui reproduit la nature granulaire du solide, peut être utilisée. Dans cette approche, la nature discontinue des matériaux granulaires est représentée par un ensemble d'éléments discrets et les forces entre les éléments en contact (également dénommés "particules") ainsi qu'entre les éléments et les parois, sont calculées sur la base d'une relation force-déplacement linéaire associée à un frottement de Coulomb; les déplacements résultants des particules sont déterminés en intégrant la deuxième loi de Newton. Seules quelques études ont été réalisées à l'aide de l'approche DEM pour étudier le comportement du milieu granulaire dans ce type de réservoirs. Un exemple est celui de l'étude de Dreißigacker et al. [4] dans laquelle la DEM est utilisée pour étudier le comportement thermo-mécanique d'un empilement de sphères. Les résultats numériques ont été comparés aux données expérimentales d'un banc d'essai constitué d'un réservoir à section carrée (volume de remplissage de $0,9 \text{ m}^3$). Les murs de confinement sont considérés comme des murs fixes. Les résultats calculés et mesurés ont montré une bonne correspondance.

Dans le présent article, la réponse structurale d'un réservoir de stockage de type thermocline soumis à des cycles thermiques est étudiée, en considérant un réservoir à parois rigides. Outre la contrainte appliquée sur les parois, l'analyse de la cinématique du lit granulaire soumis aux cycles thermiques est étudiée. Deux cas de figure sont envisagés: (i) un chauffage/refroidissement homogène et (ii) un chauffage/refroidissement avec gradient mobile de température. Les contraintes résultantes appliquées sur la paroi du réservoir sont calculées dans les deux cas, et les déplacements des particules sont également analysés.

2. Modèle thermo-mécanique

Dans la méthode des éléments discrets utilisée, le contact entre les particules est représenté par des ressorts linéaires dans les directions normales et tangentielles [5]. Chaque particule est définie par son rayon r , sa position \vec{x} , sa vitesse \vec{v} et sa vitesse de rotation $\vec{\omega}$. Lorsque les particules sont en contact, les forces normales et les forces de cisaillement résultantes sont déterminées en en basant sur les équations de loi de contact linéaire suivantes:

Lorsque $\delta_n < 0$ (les particules s'interpénètrent):

$$F_n^{ij} = K_n \delta_n$$

$$\Delta F_t^{ij} = K_t \Delta \delta_t$$

Autrement,

$$F_n^{ij} = F_t^{ij} = 0 \quad (1)$$

Où K_n et K_t sont respectivement la rigidité normale et tangentielle du contact entre deux particules, δ_n représente le l'interpénétration normale et $\Delta \delta_t$ est l'incrément de déplacement tangentiel entre deux éléments chevauchants.

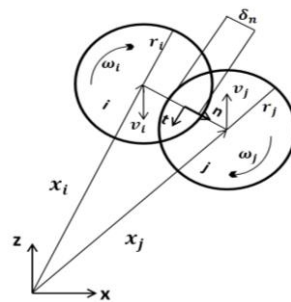


Figure 1 : Illustration du concept des éléments discrets (en 2D)[6]

Les composantes normale et tangentielle de la force décrivant le contact entre deux particules sont additionnées aux autres forces extérieures (la force de pesanteur dans notre cas) pour intégrer la seconde loi du mouvement afin d'obtenir la position des particules à des pas de temps suivant. La force gravitationnelle est prise en compte. Afin de mettre en œuvre l'effet des charges thermiques, le modèle mécanique est couplé à la dilatation thermique des particules en utilisant la relation donnée par:

$$d(T) = d_0 [1 + \alpha_g (T - T_0)] \quad (2)$$

Où d est le diamètre de la particule et α_g est le coefficient de dilatation thermique du milieu granulaire. La dilatation thermique des particules sphériques est proportionnelle à la différence de température. Finalement, la procédure de calcul consiste à déterminer d'abord la taille des particules, puis à calculer les forces de contact, puis à calculer le déplacement des particules en intégrant l'équation de Newton. Le chargement ou le déchargement thermique est appliqué en augmentant ou diminuant la température par petits incréments et la simulation est exécutée jusqu'à ce que l'échantillon se stabilise. Ensuite, la température est augmentée/diminuée à nouveau, et ainsi de suite. Toutes les simulations sont réalisées à l'aide du logiciel Yade [7, 8]. La deuxième loi de Newton est intégrée de façon implicite en utilisant l'algorithme de Verlet où la position au pas de temps suivant est calculée à partir des positions courante et précédente [9].

3. Etude numérique

Le cas d'étude considéré ici est un réservoir cylindrique de 2 m de hauteur et 1 m de diamètre rempli avec environ 8000 particules sphériques de rayon moyen égal à 29 mm. La distribution de taille est proche d'une distribution mono-disperse avec un rapport $\frac{r_{\max}}{r_{\min}} = 1.1$

où r_{\max} et r_{\min} correspondent respectivement aux rayons maximal et minimal des particules. Le réservoir est rempli par pluviation et les parois du réservoir sont des parois fixes. En raison du comportement stochastique des positions initiales des particules, quatre simulations sont réalisées afin d'obtenir des conditions initiales indépendantes des positions des particules et les résultats moyennés sont présentés ci-dessous.

Les propriétés mécaniques et thermiques des particules utilisées dans toutes les simulations sont résumées dans le tableau 1.

Rayon moyen des particules (mm)	K_n (Pa)	K_t (Pa)	α_g (K^{-1})	Angle de friction $\phi_{particules}$ ($^\circ$)	Angle de friction ϕ_{paroi} ($^\circ$)
29	1×10^8	3.5×10^7	4×10^{-6}	45	45

Tableau 1 : Propriétés mécaniques et thermiques utilisées

Le réservoir est soumis à des cycles de température entre 100 et 175 °C de deux façons différentes: soit en chargeant et en déchargeant le réservoir de façon homogène (la température varie en fonction du temps mais reste constante sur l'intégralité de la hauteur du réservoir), soit en considérant un gradient thermique mobile caractéristique du stockage de chaleur de type thermocline. A noter qu'un chargement homogène reste un chargement théorique qui permet de comparer le comportement du milieu granulaire avec le chargement le plus réaliste où un gradient thermique circule dans le réservoir. Les profils de températures expérimentaux utilisés pour les charges thermiques sont semblables à ceux mesurés sur l'installation STONE développé au CEA de Grenoble, France [10]. Pour ces 2 approches, l'évolution de la température dans le réservoir pendant un cycle est représentée sur la figure 2.

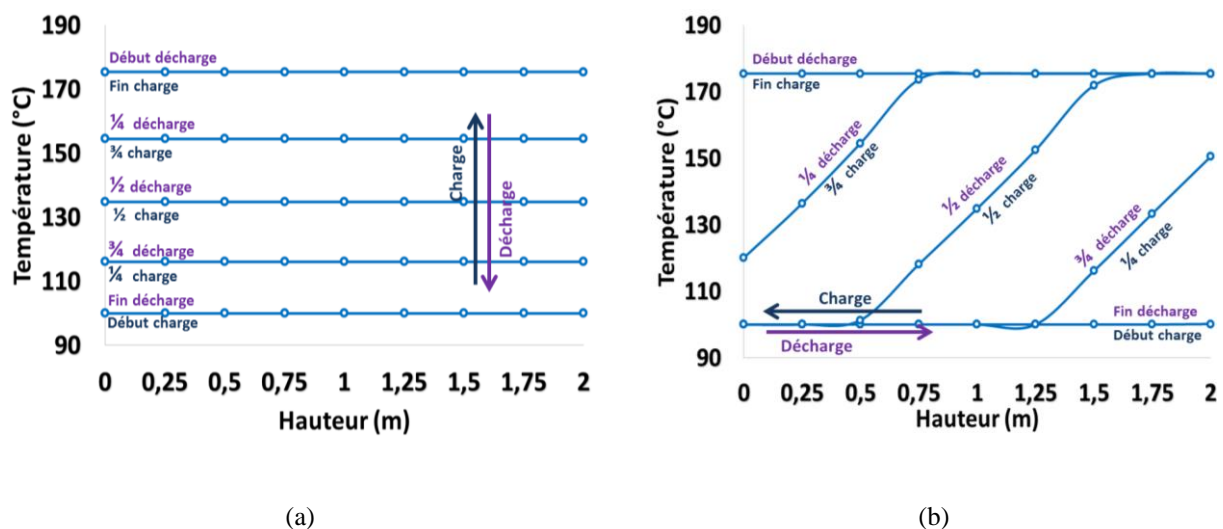


Figure 2 : Evolution de température durant les phases de charge et de décharge: (a) configuration homogène, (b) configuration avec gradient thermique

La figure 3 montre l'évolution dans le modèle numérique, de la contrainte normale radiale appliquée aux parois du réservoir à différents moments d'un cycle de charge/décharge. Les contraintes résultantes sont normalisées par la pression hydrostatique du milieu granulaire et du fluide en bas de cuve. Les courbes de la figure 3 sont accompagnées d'un schéma indiquant l'état du chargement/déchargement du réservoir.

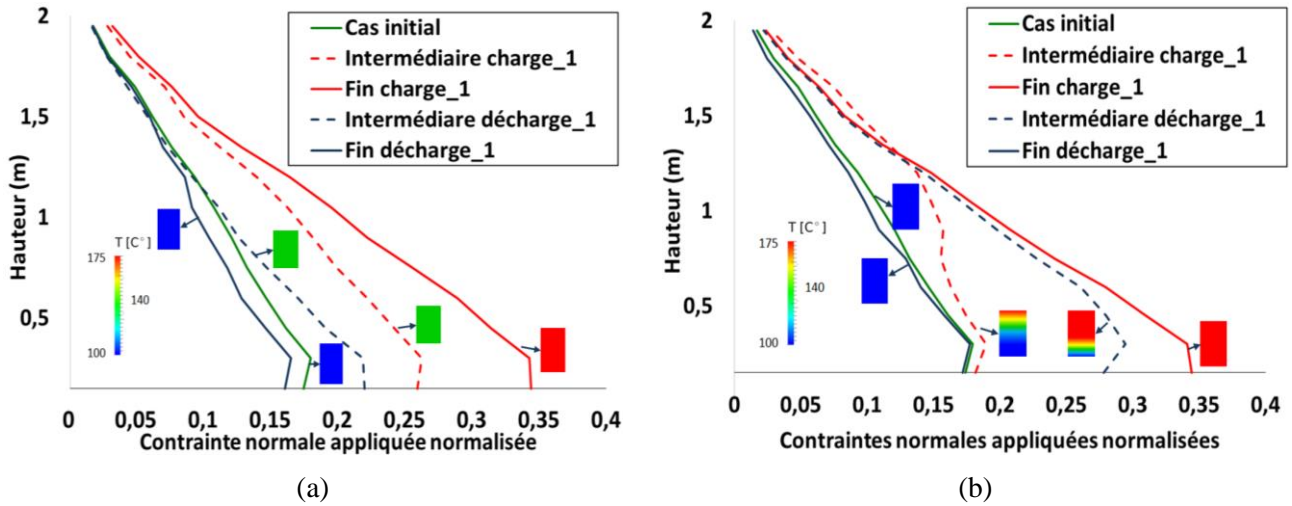


Figure 3 : Evolution des contraintes normales durant un cycle de charge et de décharge: (a) configuration homogène, (b) configuration avec gradient thermique

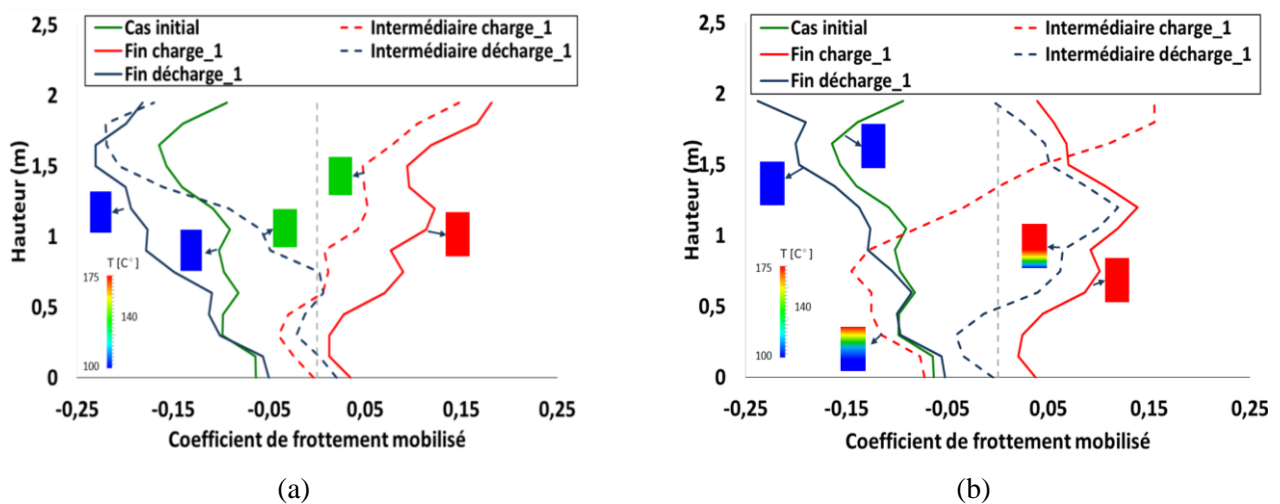


Figure 4 : Evolution des contraintes tangentielles durant un cycle de charge et de décharge: (a) configuration homogène, (b) configuration avec gradient thermique

Pendant les phases de chargement, les contraintes augmentent en raison de la dilatation thermique des particules et diminuent pendant la décharge. En outre, les résultats montrent des contraintes croissantes pendant le chargement avec la profondeur du lit, révélant la capacité du lit à réduire les contraintes thermiques générées par réarrangements de particules. En effet, les particules proches de la surface libre sont libres de se déplacer alors que dans la partie inférieure du lit, les déplacements de particules sont fortement limités par l'augmentation des forces de contact due au poids des particules situées au-dessus. Par ailleurs, comme illustré en Figure 3 et Figure 4, les contraintes radiales tendent à légèrement diminuer en bas de cuve. Ceci a été interprété comme un effet des forces de frottement existant entre les particules et la paroi du fond du réservoir.

Lorsque le conteneur est chargé et déchargé de manière homogène, les contraintes appliquées évoluent de manière homogène dans le temps le long de la hauteur du réservoir (figure 3a), tandis que dans le second cas, l'évolution des contraintes suit l'évolution du gradient thermique (figure 3b). Par exemple, au milieu du processus de chargement, les contraintes restent constantes dans la partie inférieure tandis qu'elles augmentent au sommet du réservoir, suivant le champ de température (courbe en pointillé rouge sur la figure 3b).

Le frottement entre les particules et la paroi génère des contraintes tangentielles se déplaçant avec la circulation du gradient. Le coefficient de frottement mobilisé (rapport des contraintes tangentielles aux contraintes normales) est présenté dans la figure 4 pour les deux cas. La courbe en tirets rouge de la figure 4b correspondant à une phase intermédiaire du processus de charge montre que les contraintes tangentielles changent de signe en suivant la position du fluide chaud: positif au sommet où les particules sont chauffées et négatives dans le fond. Ce changement de signe indique à quel niveau le gradient thermique est arrivé. Il est à noter que les résultats moyennés des figures 3 et 4 présentent un écart-type moyen faible (< 5%) par rapport aux valeurs moyennes.

Une séquence de 9 cycles est exécutée pour mettre en évidence l'influence des cycles répétés sur l'évolution des contraintes dans le réservoir. Les valeurs moyennes des contraintes normales maximales appliquées (normalisées par rapport à la pression hydrostatique du milieu granulaire et du fluide en bas de cuve) avec la barre d'erreur correspondante sont présentées à la figure 5. Le cycle 0 se réfère à l'état initial, les demi-cycles correspondent à la fin de la phase de chargement et les cycles entiers correspondent à la fin de la phase de déchargement.

La différence de contraintes entre les deux configurations devient visible à partir de la fin de la première décharge (figure 5). En effet, dans le cas d'un cycle homogène, les contraintes sont plus faibles que dans le cas du gradient thermique: pendant la décharge, les particules se contractent simultanément sur l'intégralité de la hauteur du réservoir conduisant à des contraintes normales plus faibles. Ensuite, cette différence se répercute à la fin de charge des cycles suivants. Au cours des cycles thermiques, les contraintes maximales augmentent plus rapidement dans le cas d'un gradient thermique que par un chargement homogène.

Afin de mieux comprendre les raisons d'une telle différence entre les deux configurations, le comportement cinématique du matériau granulaire est évalué. Pour cela, le réservoir est divisé en cinq bandes et le déplacement vertical moyen des particules u_z est calculé. Ensuite, le rapport $\frac{u_z}{H}$ est tracé sur la figure 6 pour les deux configurations. Les courbes noires représentent le déplacement moyen de toutes les particules dans le réservoir.

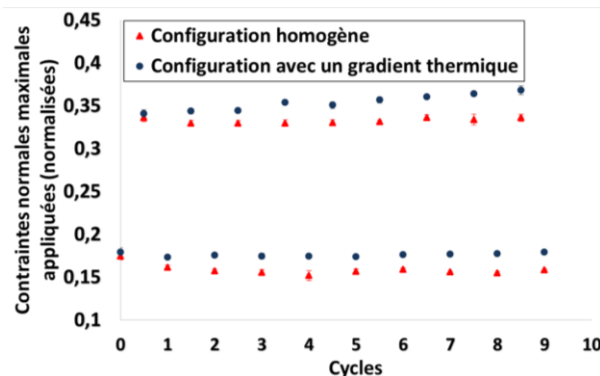


Figure 5: Evolution des contraintes normales maximales au fur de 9 cycles thermiques

De la figure 6, il apparaît que les particules se déplacent vers le haut lorsqu'elles sont chauffées, ce qui est attendu puisque la surface supérieure est une surface libre, avant de se tasser pendant le déchargement. En outre, les déplacements (normalisés par la hauteur du lit de roches) des particules en bas de cuve sont faibles (courbes bleues) en regard de celles proches de la surface (courbes violettes). Ce résultat peut être expliqué par la restriction de leur mouvement due à une forte pression statique corrélée avec des forces de frottement importantes dans la partie inférieure du réservoir. En outre, le déplacement vertical moyen des particules est plus important lorsque le gradient thermique existe et le déplacement vertical des particules est plus important, ce qui s'interprète par un réarrangement plus rapide des particules à l'intérieur du réservoir. Par conséquent, la stabilisation ainsi que la densification du milieu solide sont plus importantes et conduisent à des contraintes induites plus élevées par rapport à un chargement/déchargement homogène.

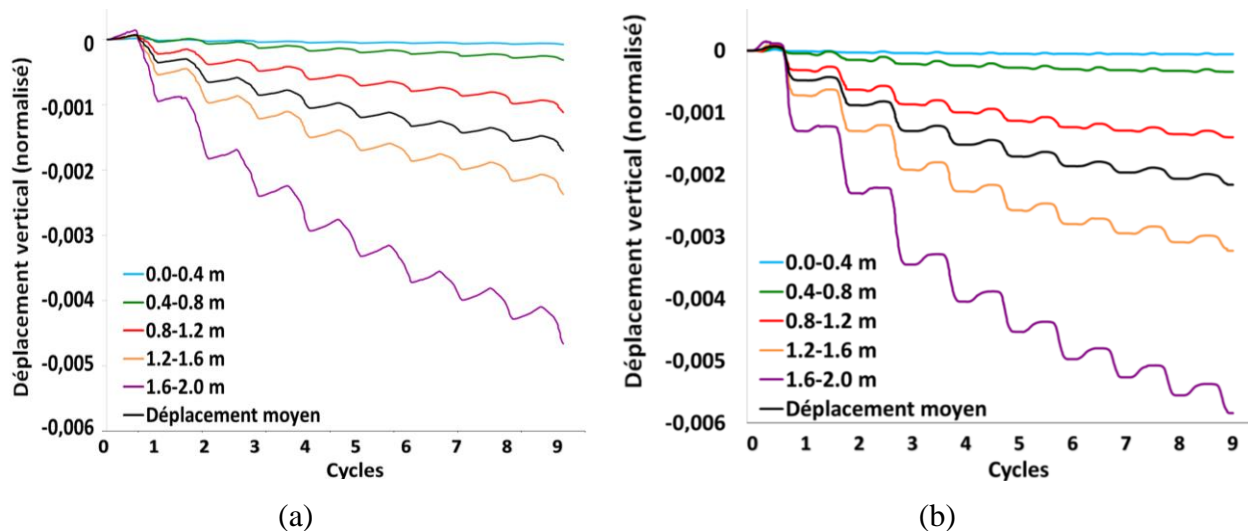


Figure 6 : Configuration homogène: évolution du déplacement vertical durant les 9 cycles thermiques: (a) configuration homogène, (b) configuration avec gradient thermique

4. Conclusion

L'étude des contraintes thermiques induites d'un réservoir de type thermocline est présentée à l'aide de la méthode des éléments discrets (DEM). Toutes les simulations sont réalisées à l'aide du logiciel Yade. Les parois des réservoirs sont modélisées comme des parois rigides. Pendant les phases de chargement, les contraintes augmentent en raison de la dilatation thermique des particules et diminuent pendant les phases de déchargement. Les contraintes augmentent avec l'augmentation de la profondeur du lit, puisque le déplacement des éléments les plus profonds est restreint, générant des contraintes thermiques plus élevées dans le réservoir.

De plus, deux configurations cycliques différentes ont été comparées: charges thermiques homogènes par rapport à un gradient thermique. Les résultats montrent que les valeurs de contraintes se développant sous un fonctionnement cyclique avec un gradient thermique sont plus élevées que dans le cas des charges thermiquement homogènes. Ceci conduit à une densification plus élevée du milieu lorsqu'il s'agit d'une configuration avec un gradient thermique par rapport à l'homogène, donc à un réarrangement plus élevé des particules. Pendant 9 cycles séquencés, les contraintes radiales semblent se stabiliser dans le cas homogène alors qu'elles continuent à augmenter avec des charges avec gradient.

L'évolution des forces dues à la dilatation thermique des particules ainsi que les effets de densification peuvent être bien décrits avec le présent modèle.

Pour de plus amples études, un plus grand nombre de cycles devraient être effectués pour mieux comprendre l'évolution des contraintes ainsi que la réponse du lit comprimé dans les deux cas. De plus, l'intégration de parois de réservoir capables de se dilater et de se contracter avec des températures croissantes ou décroissantes devrait être envisagée dans les simulations futures.

Références

- [1] S. E. Faas, L. R. Thorne, E. A. Fuchs, N. D. Gilbertsen, 10 MWe Solar Thermal Central Receiver Pilot Plant: Thermal Storage Subsystem Evaluation - Final Report. *Sandia National Laboratories* (1986), USA.
- [2] I. González, O. Lehmkuhl, C. D. Pérez-Segarra, A. Oliva, Dynamic thermoelastic analysis of thermocline-like storage tanks, *International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*, SolarPACES (2014).
- [3] S. Flueckiger, Z. Yang, S. V. Garimella, Thermocline Energy Storage in the Solar One Power Plant: An Experimentally Validated Thermomechanical Investigation, *International Conference on Energy Sustainability* (2011), USA.
- [4] V. Dreißigacker, S. Zunft, H. Müller-Steinhagen, A thermo-mechanical model of packed-bed storage and experimental validation, *Applied Energy* (2013), Germany.
- [5] P.A. Cundall, O.D.L. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique* (1979).
- [6] V. Dreißigacker, H. Müller-Steinhagen, S. Zunft, Thermo-mechanical analysis of packed beds for large-scale storage of high temperature heat, *Heat Mass Transfer* (2010).
- [7] YADE open source GNU-GPL software: <https://yade-dem.org>.
- [8] J. Kozicki, F.V. Donzé, a new open-source software developed for numerical simulations using discrete modeling methods, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* (2008).
- [9] H. Klein, <http://www.cinam.univ-mrs.fr/klein/teach/mip/numeriq/node44.html>, 2009
- [10] A. Bruch, J.F. Fourmigue, R. Couturier, *Solar Energy* (2014).

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à l'ADEME qui soutient financièrement cette recherche.