Récents Progrès en Génie des Procédés, Numéro 104 - 2013
ISSN: 1775-335X ; ISBN: 978-2-910239-78-7, Ed. SFGP, Paris, France

Une suspension dense de particules utilisée comme fluide de transfert pour les centrales solaires thermiques à concentration

GAUTHIER Daniel[a], SANS Jean-Louis[a], FLAMANT Gilles[a], REYES URRUTIA Andrés[b], MAZZA Germán[b], BOISSIERE Benjamin[c], ANSART Renaud[c], HEMATI Mehrdji[c] et BENOIT Hadrien[a*]

[a] PROMES-CNRS
7 rue du Four Solaire, 66120 Font Romeu Odeillo, France

[b] IDEPA-CONICET
Univ. Nacional del Comahue, 1400 Calle Buenos Aires, 8300 Neuquén, Argentina

[c] LGC-CNRS-INPT
4 Allée Emile Monso BP 84234, 31432 Toulouse cedex 4, France

Résumé

Cet article démontre la capacité des suspensions denses de particules solides (DPS) à transporter la puissance solaire concentrée depuis un récepteur tubulaire jusqu'à un système de transformation d'énergie (stockage, échangeur de chaleur …). Au contraire des lits fluidisés circulants (CFB), l'écoulement d'une DSP se fait à une vitesse de gaz très faible et à une forte fraction volumique de solide. Un récepteur solaire mono-tubulaire a été testé, avec des particules de carbure de silicium (SiC) de diamètre moyen 64µm, à des densités de flux solaire dans la gamme 200-250 kW/m². Des augmentations de température du solide allant de 50 à 150°C ont été obtenues. Le coefficient moyen de transfert de chaleur entre la paroi et la suspension (*h*) a été calculé à partir des résultats expérimentaux. Il est sensible à la fois à la fraction volumique de solide, que l'on a faite varier de 26 à 35%, et à la vitesse moyenne des particules. Des coefficients de transfert de chaleur allant de 140 à 500 W/m².K ont été obtenus, ce qui correspond à une valeur moyenne de 400 W/m².K pour les conditions opératoires standard (forte fraction de solide) à faible température. Des coefficients plus importants peuvent donc être attendus à haute température car *h* augmente fortement avec la température. La suspension sert de fluide de transfert (HTF) avec une capacité thermique proche des HTF liquides, et sans température limite d'utilisation si ce n'est celle du tube absorbeur. Des températures de suspension allant jusqu'à 750°C sont attendues pour les tubes métalliques, offrant ainsi de nouvelles opportunités pour les cycles thermodynamiques à haut rendement comme ceux à vapeur d'eau ou dioxyde de carbone supercritique.

Mots-clés : suspension dense de particules, coefficient d'échange de chaleur, récepteur solaire, fluide de transfert de chaleur

1. Introduction

Les particules solides peuvent être utilisées comme fluide de transfert de chaleur (HTF) dans les systèmes à concentration d'énergie solaire thermique avec un récepteur à absorption directe ou indirecte. Dans le premier cas les particules solides reçoivent directement le rayonnement solaire concentré, alors que dans le second une paroi est utilisée, qui absorbe le rayonnement et le transmet à un fluide circulant. Les absorbeurs tubulaires sont ceux principalement utilisés dans les centrales solaires thermiques. L'association de récepteurs à particules solides avec des tours solaires à concentration offre des possibilités très intéressantes pour les cycles thermodynamiques à haute température et haut rendement, pour l'intégration de stockage de chaleur (en utilisant les particules à la fois comme HTF et milieu de stockage) et pour les applications chimiques de l'énergie solaire concentrée (dissociation thermochimique d'eau pour production d'hydrogène, préparation de ciment …).

[*] Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : hadrien.benoit@promes.cnrs.fr

Les premières études sur l'absorption directe ont commencé au début des années 1980 avec deux concepts : le lit fluidisé récepteur étudié par Flamant (1982 a) et le récepteur à rideau de particules en chute libre de Martin et al (1982). Dans le premier concept, les particules sont fluidisées dans un tube transparent et ne s'écoulent pas en dehors. Ce système est utilisé en fonctionnement discontinu, pour chauffer de l'air ou faire réagir des particules, comme l'indiquent Flamant et al (1980 b). Dans le second concept, le solide est lâché depuis le haut du récepteur dans un faisceau solaire concentré et chauffé par le rayonnement concentré pendant son passage. Des choix de particules et des modèles de transfert de chaleur par radiation ont été proposés par Falcone et al (1985) ainsi que par Evans et al (1987). Laissé de côté pendant vingt ans, ce concept a ressurgi comme une possibilité prometteuse pour une nouvelle génération de centrales solaires thermiques à concentration. Des modèles améliorés ont été développés par Chen et al (2007) et validés par les expérimentations au soleil à l'échelle pilote de Siegel et al (2010).
Les systèmes d'absorption directe à particules sont très attractifs car ils supportent de hautes densités de flux solaire (de l'ordre de 1MW/m²) et ne nécessitent pas de fenêtre laissant entrer le rayonnement dans le récepteur. Mais du point de vue pratique, la stabilité du flux de particules est difficile à contrôler et les pertes par convection peuvent être importantes. Les récepteur à particules solides avec absorption indirecte tolèrent des densités de flux moindres (dans la gamme 200-400 kW/m²) mais permettent un meilleur contrôle de la circulation des particules dans le récepteur et la possibilité de maîtrisé la pression de fonctionnement et la composition du gaz. De nombreuses options sont envisagées, par exemple, un réacteur à lit fluidisé annulaire a été étudié par Badie et al (1980), un réacteur cyclone est considéré pour la conversion de biomasse dans les travaux de Lédé et al (1986), une boucle de chauffage utilisant du sable comme HTF a été développée par Bataille et al (1986) pour le CNRS. Le montage proposé combinait un four alimentant en sable chaud un système de stockage et de récupération de chaleur comprenant un réservoir chaud, un autre froid, et un échangeur à lit fluidisé multi-étages.
Un point primordial à considérer pour l'utilisation de particules comme HTF pour les systèmes solaires à concentration de forte puissance est l'importance du débit de solide que l'on peut faire circuler dans le récepteur solaire. Dans l'industrie, les lits fluidisés circulants sont largement développés à grande échelle dans les raffineries de pétrole et les centrales thermiques. Par exemple, dans les systèmes de craquage catalytique, des flux de solide catalyseur de l'ordre de 2000 tonnes/h pour un réacteur sont courants. En général dans de tels systèmes, le réacteur (riser) fonctionne à de fortes vitesses de gaz (plusieurs m/s) et de faibles fractions volumiques de solide (moins de 5%). Par conséquent cela entraîne une forte consommation d'énergie mécanique pour la compression et de faibles coefficients d'échange de chaleur paroi-particules. Nous avons proposé un nouveau concept permettant de surmonter ces inconvénients ; il fonctionne avec une suspension dense de microparticules et a été breveté par Flamant et al (2010 c). Cette innovation est actuellement développée dans le cadre d'un projet national et d'un projet européen (FP7 EC project CSP2, http://www.csp2-project.eu/). Le principe du récepteur à suspension dense de particules (DSPR : Dense Suspension Particle Receiver) est de mettre en circulation un mélange air-particules, à forte fraction volumique de solide (entre 30 et 40%), dans des tubes verticaux exposés au rayonnement solaire concentré. La suspension sert de HTF avec une capacité thermique comparable à celle des HTF liquides mais sans température maximale d'utilisation si ce n'est celle du tube récepteur. Des températures allant jusqu'à 750°C sont attendues pour les tubes métalliques, ce qui offre de nouvelles opportunités avec les cycles thermodynamiques à haut rendement comme les cycles à vapeur d'eau et CO_2 supercritiques, ce que soulignent Pitz-Paal et al (2012).
Cet article présente les résultats expérimentaux qui ont été obtenus lors de tests au four solaire du CNRS sur un DSPR mono-tubulaire à basse température (température de sortie inférieure à 300°C). Après l'explication du principe de fonctionnement, le dispositif expérimental et les conditions opératoires sont décrits. Les résultats bruts concernant la distribution et l'élévation des températures pendant les essais sont présentés, puis le coefficient d'échange de chaleur paroi-suspension est déduit et analysé en fonction de paramètres pertinents. Finalement les perspectives de travail sont discutées.

2. Principes de mise en circulation d'une suspension dense de particules dans un récepteur solaire

La vitesse superficielle du gaz injecté à travers la plaque de fluidisation (vitesse de fluidisation) doit être choisie avec attention pour obtenir une fluidisation dense car elle définit le régime de fluidisation :

- Quand la vitesse superficielle du gaz est inférieure au minimum de fluidisation, le solide se comporte comme un milieu poreux et la perte de charge linéaire suit la loi d'Ergun. La force de traînée augmente avec la vitesse du gaz et commence à contrebalancer la gravité, provoquant l'expansion du lit en même temps que les particules s'éloignent les unes des autres. Cet état s'appelle « lit fixe ».
- A la fluidisation, la baisse de pression linéaire devient égale au poids apparent de la suspension :

$$\Delta P/L = (\alpha_p \rho_s + \varepsilon \rho_g) g - \rho_g g = \alpha_p (\rho_s - \rho_g) g \quad (1)$$

  où ρ_s est la masse volumique du solide et g l'accélération de gravité.
- Quand la vitesse du gaz est comprise entre la vitesse minimale de fluidisation (U_{mf}) et la vitesse minimale de bullage (U_{mb}), le lit fluidisé est homogène. Lorsqu'on atteint U_{mb}, la fluidisation devient hétérogène avec formation de bulles de gaz, presque vides de particules, dont le passage crée une importante agitation radiale des particules. L'agitation étant favorable à l'échange de chaleur paroi-particules, c'est le régime de bullage qui est choisi pour le fonctionnement du procédé.

Pour mettre la suspension dense en circulation ascendante dans un tube vertical plongeant dans le lit, on fait augmenter la pression du ciel du lit (P_{ciel}) grâce à une vanne de régulation placée sur la sortie d'air. La pression à la sortie du tube est la pression atmosphérique (P_{atm}). Le flux est généré par la pression motrice ($\Delta P_{mot} = P_{ciel} - P_{atm}$). La pression hydrostatique de la suspension (ΔP_{hydro}), qui est la somme de la perte de charge du gaz lors de son passage à travers le lit et de sa la pression hydrostatique, maintiens l'équilibre avec ΔP_{mot}, conduisant ainsi le niveau de la suspension dans le tube à s'élever.

$$\Delta P_{hydro} = (\Delta P/L + \rho_g g)(h_{tube} - h_{caisson}) = (\alpha_p \rho_s + \varepsilon \rho_g) g (h_{tube} - h_{caisson}) \quad (2)$$

où h_{tube} and h_{lit} sont les niveaux respectifs de la suspension dans le tube et dans le caisson de fluidisation. Quand ΔP_{hydro} devient égale à ΔP_{mot}, le niveau se stabilise. Pour établir un flux continu, la pression de consigne est réglée à une valeur supérieure à la valeur de la pression hydrostatique lorsque le niveau de la suspension atteint la sortie du tube. Le débit de solide augmente avec la différence $\Delta P_{mot} - \Delta P_{hydro}$. À une faible distance au-dessus du caisson, il est nécessaire d'injecter un flux de gaz secondaire dans le tube (aération) pour stabiliser l'écoulement et évite le tassement de la suspension.

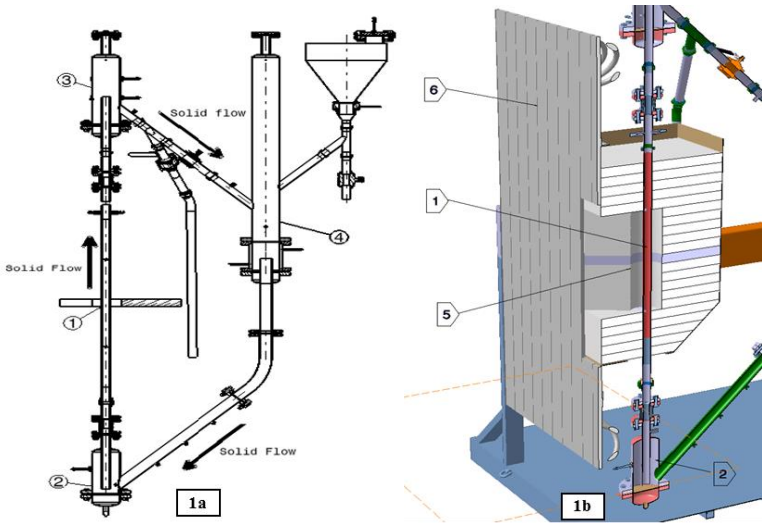
Contrôle du débit de solide

Le débit de solide est contrôlé par l'intermédiaire de deux paramètres : la pression dans le ciel du caisson de fluidisation et le débit d'aération. En augmentant P_{ciel}, on augmente ΔP_{mot} et le débit de solide augmente tandis que l'état de la suspension (taux de vide) reste inchangé. L'aération, en plus de son rôle stabilisateur, permet d'influer sur la densité de la suspension. En augmentant le débit d'aération, on augmente ε (et on diminue donc α_p le taux de présence des particules) ce qui diminue la densité de la suspension, mais cela diminue également ΔP_{hydro} ce qui fait augmenter le débit.

3. Dispositif expérimental

Le fonctionnement global du récepteur solaire, utilisant une suspension dense de particules comme fluide de transfert, et qui a été installé au foyer du four solaire du CNRS de 1MW est schématisé sur la Figure 1a. Sur cette installation pilote, l'absorbeur solaire est un tube métallique opaque ① situé à l'intérieur d'une cavité réceptrice ⑤ constituée de silicate alcalino-terreux (Insulfrax®) et soumise au rayonnement solaire concentré. Le personnel et le dispositif expérimental sont protégés derrière un écran en aluminium refroidi à l'eau ⑥ (Figure 1b). La DPS est composée de 30-40% de particules et de 60-70% d'air environ. Elle s'écoule depuis le lit émetteur ②, en passant par le tube ①, vers le lit récepteur ③ grâce à la différence de pression entre ces deux lits. Le lit réservoir ④ alimente le lit ② par gravité. A la sortie du lit ③ le solide peut revenir au lit ④ ou sortir de la boucle. En théorie il est possible d'établir une circulation en boucle fermée : la suspension étant moins dense du côté ascendant et les pressions des lits ③ et ④ étant les mêmes, le niveau du lit ③ est supérieur à celui du lit ④ et la gravité fait redescendre le solide de

③ vers ④. Mais en pratique l'air en provenance du lit ② a tendance à passer alternativement par le tube ① ou vers le lit ④ sans atteindre d'équilibre permettant la stabilisation du débit de solide. Nous avons donc fonctionné en ouvrant la boucle après le lit ③ et en pressurisant le lit ④ pour forcer le passage de l'air du lit ② vers le tube ①. Le système a donc fonctionné en discontinu et le solide récupéré à la sortie était pesé en continu afin d'en connaître le débit.



Figures 1a et 1b. Vue schématique de la boucle réceptrice. ① tube absorbeur métallique ; ② lit fluidisé émetteur ; ③ lit fluidisé récepteur ; ④ lit fluidisé réservoir ; ⑤ cavité réceptrice; ⑥ protection thermique en aluminium

Le solide utilisé était du carbure de silicium (SiC), choisi pour ses propriétés thermiques mais aussi sa disponibilité et son faible coût. Un diamètre de Sauter de 63,9 µm pour les particules permet une fluidisation homogène à de faibles vitesses d'air car elles font partie des particules de classe A dans la classification de Geldart (1973). Le Tableau 1 donne les propriétés physiques des particules utilisées.

Tableau 1 Propriétés physiques des particules de carbure de silicium (SiC)

$\rho.C_{ps}$ [kJ/m^3.K]	$T_{frittage}$ [°C]	λ [W/m.K]	ε_{mb}	ε_{mf}	U_{mf} 10^{-3} [m.s^{-1}]	U_{mb} 10^{-3} [m.s^{-1}]	d_{32} [µm]
3000	1620	18	0,59	0,57	5,5	6,6	63,9

4. Résultats Bruts

Les essais ont été effectués dans plusieurs gammes de paramètres opératoires : débit massique surfacique de solide ($Q_{m,s}/S$), aération, et densité de flux solaire à l'entrée du récepteur. Le système fonctionnant en discontinu, le débit de solide fixait la durée de chaque essai, qui a varié de 20 à 40 min. La vitesse de glissement entre le gaz et le solide à l'entrée du tube est toujours proche de la vitesse minimale de fluidisation quelles que soient les conditions opératoires. Ceci a été mis en évidence par un dispositif de traçage à l'hélium mis en place sur une maquette froide par Boissière et al (2012). Connaissant le débit de solide, on déduit la vitesse superficielle du gaz à l'entrée du tube. La densité de flux solaire est mesurée à l'entrée de la cavité réceptrice. Ses variations sont trop faibles pour affecter les résultats de manière significative. Le Tableau 2 résume les gammes de paramètres opératoires explorées.

Tableau 2 Gammes de paramètres opératoires

$Q_{m,s}/S$ [kg.m^{-2}.s^{-1}]	U_g *entrée tube* [10^{-3} m.s^{-1}]	*Aération* [Nm^3.s^{-1}.m^{-2}]	*Densité de flux solaire* [kW.m^{-2}]
7,4 - 24,6	8,8 - 13,2	0,011 - 0,109	200 - 245

Logiquement, les paramètres opératoires ont influencé les températures de solide à l'entrée et la sortie de la partie irradiée du tube absorbeur ($T_{s,i}$ et $T_{s,o}$), les températures de paroi extérieure du tube à l'entrée, au

milieu, et à la sortie de la cavité irradiée ($T_{w,i}$, $T_{w,m}$ et $T_{w,o}$), la perte de charge dans le tube ($\Delta P/L$) et la puissance transmise au solide (Φ). Le Tableau 3 liste les gammes de résultats bruts obtenus. Les valeurs de température sont les moyennes de plusieurs températures mesurées à une position.

Tableau 3 Gammes de résultats bruts obtenus

$T_{s,i}$ [°C]	$T_{s,o}$ [°C]	$T_{w,i}$ [°C]	$T_{w,m}$ [°C]	$T_{w,o}$ [°C]	$\Delta P/L$ [Pa/m]	Φ [W]
41 - 248	164 - 317	144 - 344	204 - 378	229 - 379	8500 - 11200	443 - 2724

5. Résultats et discussion

5.1 Calcul du coefficient d'échange de chaleur

L'objectif principal de cette première série d'essais était la détermination du coefficient d'échange de chaleur entre la paroi du tube et la suspension, et des paramètres l'affectant. En négligeant la capacité thermique de l'air par rapport à celle du solide, la puissance transmise à la suspension devient :

$$\Phi = Q_{m,s} \int_{T_{s,i}}^{T_{s,o}} C_{p,s} dT \approx Q_{m,s}.C_{p,s}\left(\frac{T_{s,i}+T_{s,o}}{2}\right)\left(T_{s,o}-T_{s,i}\right) \quad (3)$$

où $Q_{m,s}$ est le débit massique de solide et T_s la température du solide (indices *o* et *i* pour sortie (outlet) et entrée (inlet) respectivement).

La température de la paroi intérieure est calculée à partir de celle de la paroi extérieure, de la conductivité de l'acier et de la densité de flux de chaleur traversant la paroi qui est supposée uniforme sur l'ensemble du tube.

Un *DTLM* est calculé à partir des températures de la paroi intérieure et du solide :

$$DTLM = \frac{\left[T_W^{int}-T_s\right]_o^i}{\ln\left(\frac{T_{W,i}^{int}-T_{s,i}}{T_{W,o}^{int}-T_{s,o}}\right)} \quad (4)$$

Avec *A* l'aire de la surface interne du tube, le coefficient d'échange de chaleur *h* est déduit de la formule :

$$\Phi = h.A.DTLM \quad (5)$$

Le débit solide étant irrégulier au cours d'un essai, des périodes de temps sur lequel le débit est stable ont été sélectionnées. Leurs durées varient de 36 à 200 s. Chaque donnée mesurée a été moyennée sur chacune des périodes de débit stable.

5.2 Paramètres pertinents pour l'analyse du coefficient d'échange de chaleur

Alors que P_{ciel} n'affecte que le débit de solide, augmenter l'aération fait augmenter le taux de vide de la suspension. Ainsi, pour un débit surfacique de solide donné, différentes valeurs de *h* sont obtenues car il est influencé par le taux de vide. En négligeant la masse volumique de l'air devant celle du solide, le taux de vide et la fraction volumique de solide peuvent être déterminés au moyen de l'équation suivante :

$$\alpha_p = 1 - \varepsilon = \frac{\Delta P}{\rho_s.g.L} \quad (6)$$

La puissance transmise au solide peut être définie de deux manières : en fonction de *h* et du *DTLM*, ou en fonction de $Q_{m,s}$ et $T_{s,i/o}$. Le débit de solide dépend de α_p et de la vitesse verticale moyenne des particules $U_{s,z}$, ou du temps de séjour moyen dans la partie irradiée du tube τ ($U_{s,z} = L_{tube}/\tau$). Ainsi

$$h.DTLM = \frac{\rho_s.r}{2}.\alpha_p.\frac{1}{\tau}.C_{p,s}\left(\frac{T_{s,i}+T_{s,o}}{2}\right)\left(T_{s,o}-T_{s,i}\right) = \frac{\rho_s.r}{2.L_{tube}}.\alpha_p.U_{s,z}.C_{p,s}\left(\frac{T_{s,i}+T_{s,o}}{2}\right)\left(T_{s,o}-T_{s,i}\right) \quad (7)$$

où *r* est le rayon intérieur du tube, L_{tube} la longueur de la partie irradiée du tube.

La Figure 2 montre les variations de *h* en fonction de $U_{s,z}$, pour 3 gammes de α_p. Les gammes de α_p sont : $0,26 < \alpha_p < 0,29$ (gamme basse), $0,29 < \alpha_p < 0,32$ (gamme intermédiaire), $0,32 < \alpha_p < 0,35$ (gamme haute). On obtient le *h* le plus faible (=106 $W.m^{-2}.K^{-1}$) pour la gamme basse, à une vitesse moyenne des particules de 9,1 $mm.s^{-1}$, ce qui correspond à un débit surfacique de solide de 7,4 $kg.m^{-2}.s^{-1}$. Le *h* le plus élevé (=506 $W.m^{-2}.K^{-1}$) est obtenu pour la gamme haute, à une vitesse moyenne des particules de 23,4$mm.s^{-1}$, ce qui correspond à un débit surfacique de solide de 24,6 $kg.m^{-2}.s^{-1}$. Plus les particules se

déplacent vite, plus *h* est élevé ; cela vient directement du fait que le mélange des particules est intensifié, ce qui augmente le mouvement des particules entre la paroi et le centre du tube.

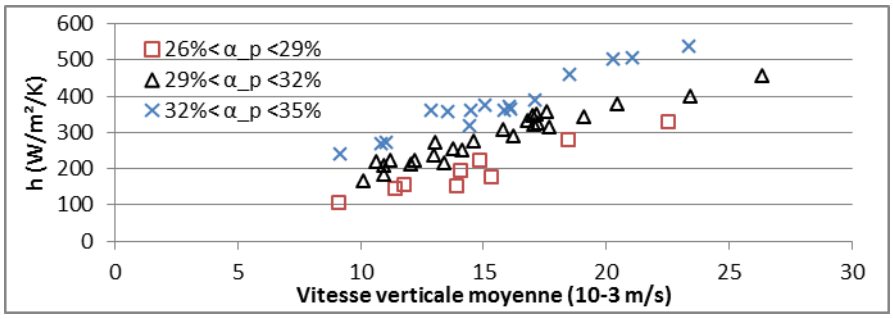


Figure 2. Coefficient d'échange de chaleur moyen en fonction de la vitesse verticale moyenne des particules

La Figure 3 présente *h* en fonction de α_p, pour 3 gammes de τ. Les gammes de τ sont : 23 s < τ < 30 s (gamme de temps court), 31 s < τ < 36 s (gamme de temps intermédiaire), 41 s < τ < 48 s (gamme de temps long). Le *h* le plus faible (=145 W.m^{-2}.K^{-1}) est obtenu pour la gamme de temps long, à une fraction volumique de particules moyenne de 0,271, ce qui correspond à un débit surfacique de solide de 9,8 kg.m^{-2}.s^{-1}. Le *h* le plus élevé (=505 W.m^{-2}.K^{-1}) est obtenu pour la gamme de temps court, à une fraction volumique de particules moyenne de 0,343, ce qui correspond à un débit surfacique de solide de 23,2 kg.m^{-2}.s^{-1}. Plus α_p est importante, plus *h* est élevé ; la raison en est que la surface de contact entre les particules et la paroi est plus grande lorsque les particules occupent un volume plus important.

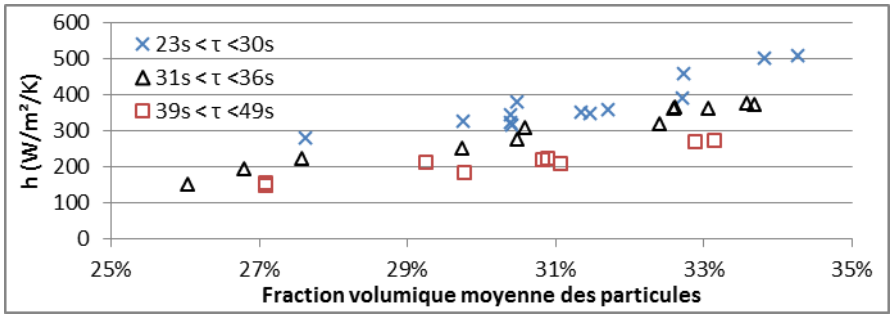


Figure 3. Coefficient d'échange de chaleur moyen en fonction de la fraction volumique moyenne des particules

6. Conclusions et perspectives

Le but de l'étude était de tester un nouveau procédé de récepteur solaire utilisant comme fluide de transfert de chaleur (HTF) une suspension dense de particules en circulation ascendante dans un tube opaque exposé au rayonnement solaire concentré.

Contrairement aux des lits fluidisés circulants (CFB), l'écoulement de la suspension dense de particules (DPS) se fait à faible vitesse superficielle de gaz et forte fraction volumique de solide. Typiquement, pour des particules de classe A, les valeurs sont de l'ordre du mètre par seconde et de moins de 1% pour les CFB, et 0,01 m/s et 35% pour les DPS.

Il a été montré que ce procédé innovant mène à des coefficients d'échange de chaleur *h* allant jusqu'à 500 W/m².K dans les conditions considérées, pour des vitesses moyennes de particules inférieures à 2,5 cm/s. La vitesse $U_{s,z}$ et la fraction volumique des particules α_p ont une forte influence sur *h*. Plus $U_{s,z}$ est élevée, plus *h* est élevé car l'échange de particules entre paroi et centre du tube se trouve amélioré. Plus α_p est élevée, plus *h* est élevé car la surface de contact entre les particules et la paroi est alors plus grande.

En se basant sur une valeur moyenne de *h* de 400 W/m².K obtenue à faible température (environ 250°C), on peut s'attendre à des valeurs plus élevées à 700°C et plus car il a été prouvé précédemment par Flamant et al (1987 d) que *h* augmente avec la température. Ainsi l'usage des DPS pourra augmenter drastiquement la gamme de températures de fonctionnement des HTF pour le solaire, limitée à environ 560°C actuellement, tout en pouvant en plus servir de moyen de stockage. Des températures de

suspensions atteignant 750°C sont attendues pour les tubes métalliques offrant ainsi de nouvelles opportunités pour les cycles thermodynamiques à haut rendement comme ceux à vapeur d'eau ou dioxyde de carbone supercritique. L'usage de tubes en céramique permettrait même de dépasser les 1000°C (cycles de Brayton et mixtes).
La prochaine étape de cette étude sera de faire fonctionner le procédé dans la gamme de températures de solide 500-700°C.

Nomenclature

A	Aire de la surface intérieure du tube	P_{ciel}	Pression dans le ciel du lit émetteur
$C_{p,s}$	Capacité thermique du solide	r	Rayon du tube
$DTLM$	Différence de températures logarithmique moyenne	S	Section du tube
d_{32}	Diamètre de Sauter	$T_{s,i/o}$	Température du solide à l'entrée/sortie de la partie irradiée du tube
g	Accélération de la gravité	$T^{int}_{w,i/o}$	Température de paroi intérieure à l'entrée/sortie de la partie irradiée du tube
h	Coefficient d'échange de chaleur paroi-suspension moyen	$T_{w,i/m/o}$	Température paroi extérieure à l'entrée /milieu/sortie du tube
h_{lit}	Niveau de la suspension dans le lit émetteur	U_g	Vitesse superficielle du gaz
h_{tube}	Niveau de la suspension dans le tube	U_{mf}	Vitesse minimale de fluidisation
L_{tube}	Longueur de la partie irradiée du tube	U_{mb}	Vitesse minimale de bullage
$Q_{m,s}$	Débit massique de solide	$U_{s,z}$,	Vitesse verticale moyenne des particules

Greek letters

α_p	Fraction volumique des particules	Φ	Puissance transmise à la suspension
$\Delta P/L$	Perte de charge linéaire	μ_g	Viscosité dynamique du gaz
ΔP_{mot}	Pression motrice de l'écoulement	ρ_g	Masse volumique du gaz
ΔP_{hydro}	Pression hydrostatique de la suspension	ρ_s	Masse volumique du solide
Δt	Intervalle de temps pour le calcul du débit	τ	Temps de séjour moyen des particules dans la partie irradiée du tube

Remerciements

Ce travail a été partiellement soutenu par le CNRS-Energie dans le cadre du projet PARTISUN, par la CE dans le cadre du projet CSP2 - Concentrated Solar Power in Particles - FP7 Project N° 282 932, et dans le cadre du projet franco-argentin ECOS Sud N° 11E01.

Références

Badie J-M., Bonet C., Faure M., Flamant G., Foro R., Hernandez D., Chemical Engineering Science, 1980, 35, 413.
Bataille D., Laguerie C., Royere C., Gauthier D., Entropie 1989, 146-147, 113.
Boissière B., Ansart R. , Hemati M., Gauthier D., Flamant G., 7ème Colloque Science et Technologie des Poudres, STP2012, Toulouse, FRANCE, 4-6 Juillet (2012)
Chen H., Chen Y., Hsieh H.T., Siegel N., ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2007, 129, 160.
Evans G., Houf W., Grief R., Crowe C., ASME Journal of Solar Energy Engineering, 1987, 109, 134.
Falcone P.K., Noring J.E., Hruby J.M., Sandia National Laboratories, Report SAND85-8208 1985
Flamant G., Hernandez D., Bonet C., Traverse J-P. Solar Energy, 1980, 24, 385.
Flamant G., AIChE Journal, 1982, 18/4, 529.
Flamant G. and Ménigault T., International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987, 30/9, 1803-1812.
Flamant G., Hemati M. , French Patent N° 1058565 (20 October 2010). PCT extension, 26 april 2012, N° WO 2012/052661 A2.
Geldart D. Powder Technology, 1973, 7, 285.
Giuliano S., Buck R., Eguigen S., ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2011, 133, 031007.
Lédé J., Verzaro F., Antoine B., Villermaux J., Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 1986, 20/6, 309.
Martin J., Vitko J., Sandia National Laboratories, Report SAND82-8203 1982.
Siegel N, Ho C.K, Khalsaz S.S., Kolb G.J., ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2010, 132, 021008.
Pitz-Paal R., Amin A, Bettzuge M.O., Eames P., Flamant G., Fabrizzi F., Homes J., Kribus A., Van der Lan H., Lopez C., Garcia Novo F., Papagiannakopoulos P., Pihl E., Smith P., Wagner H-J., ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2012, 134, 024501.

Récents Progrès en Génie des Procédés, Numéro 104 - 2013
ISSN: 1775-335X ; ISBN: 978-2-910239-78-7, Ed. SFGP, Paris, France

A dense suspension of particles used as a new heat transfer fluid for concentrated solar thermal plants

GAUTHIER Daniel[a], SANS Jean-Louis[a], FLAMANT Gilles[a], REYES URRUTIA Andrés[b], MAZZA Germán[b], BOISSIERE Benjamin[c], ANSART Renaud[c], HEMATI Mehrdji[c] et BENOIT Hadrien[a*]

[a] PROMES-CNRS
7 rue du Four Solaire, 66120 Font Romeu Odeillo, France

[b] IDEPA-CONICET
Univ. Nacional del Comahue, 1400 Calle Buenos Aires, 8300 Neuquén, Argentina

[c] LGC-CNRS-INPT
4 Allée Emile Monso BP 84234, 31432 Toulouse cedex 4, France

Abstract

This paper demonstrates the capacity of dense suspensions of solid particles (DPS) to transfer concentrated solar power from a tubular receiver to an energy conversion process (storage, heat exchanger…). Contrarily to circulating fluidized bed (CFB), DSP flows operate at low gas velocity and large solid fraction. A single-tube solar receiver was tested with 64 µm mean diameter silicon carbide particles for solar flux densities in the range 200-250 kW/m^2, resulting in a solid particles temperature increase ranging between 50°C and 150°C. The mean wall-to-suspension heat transfer coefficient (*h*) was calculated from experimental data. It is very sensitive to the particle volume fraction of the suspension, which was varied from 27% to 36% and to the mean particle velocity. Heat transfer coefficients ranging from 140 W/m^2.K to 500 W/m^2.K have been obtained, thus corresponding to a 400 W/m^2.K mean value for standard operating conditions (high solid fraction) at low temperature. This means that higher heat transfer coefficients may be expected at high temperature, because *h* increases drastically with temperature. So the suspension acts as a heat transfer fluid (HTF) with a heat capacity similar to a liquid HTF, with no temperature limitation but the working temperature limit of the receiver tube. Suspension temperatures up to 750°C are expected for metallic tubes, thus opening new opportunities for high efficiency thermodynamic cycles such as supercritical steam and supercritical carbon dioxide.

Keywords: dense particle suspension, heat transfer coefficient, solar receiver, heat transfer fluid

[*] Authors(s) to whom the correspondence should be sent : hadrien.benoit@promes.cnrs.fr