

Etude paramétrique de l'influence de la réflectivité et du flux incident sur le rendement d'un récepteur solaire à cavité haute température

Florent LARROUTUROU, Cyril CALIOT, Gilles FLAMANT

Procédés, Matériaux et Energie Solaire, PROMES-CNRS,
7 rue du Four Solaire, 66120 Font-Romeu-Odeillo, France, Tel: (+33) 4 6830 7733

Résumé -La modification des propriétés optiques des récepteurs solaires à cavité afin d'optimiser la sélectivité spectrale et directionnelle des parois est une solution prometteuse pour augmenter le rendement d'absorption. Les principales pertes optiques d'une cavité solaire irradiée par un flux solaire concentré sont dues à la réflexion de la cavité et à l'émission des parois à très haute température. Le but de cette étude est de quantifier l'influence de la réflectivité directionnelle des parois sur le rendement d'absorption d'un récepteur à cavité cubique. La méthode Monte-Carlo Lancers de rayons est utilisée pour le calcul de la puissance sortante de la cavité en fonction du flux incident et de la distribution de la réflectivité bidirectionnelle des parois.

Nomenclature

abs	absorption	s	spéculaire
d	diffus	α	absorptivité
i	incident	ϵ	émissivité
ouv	ouverture	ρ	réflectivité
\vec{p}	vecteur position	\vec{w}	vecteur unité
r	réfléchi	Ω	angle solide

1. Introduction

La technologie solaire à concentration est une source d'énergie prometteuse dans le but de convertir le flux solaire en énergie thermique en vue de la production d'électricité, du dessalage de l'eau de mer et d'utilisations en chimie industrielle. Cette technologie est une alternative fiable aux sources d'énergies fossiles pour la génération d'énergie thermique mais l'optimisation de la conversion du flux solaire en chaleur au niveau du récepteur est une étape clé pour en augmenter la compétitivité. Le solaire à concentration utilise un ensemble d'héliostats pour concentrer le flux solaire au niveau d'un récepteur dans le but de chauffer un fluide de transfert à haute température. Les systèmes de concentration sont divisés en systèmes linéaires comme la technologie Fresnel ou miroir cylindro-parabolique et en systèmes ponctuels comme les centrales à tour ou la technologie dish stirling qui permettent un meilleur taux de concentration (de l'ordre de 1000 à 10 000 pour les centrales à tour contre une centaine pour les systèmes linéaires). Les centrales solaires à tour sont considérées comme optimales pour les installations de grandes échelles du fait des hautes concentrations permettant d'obtenir un fluide de transfert à haute température (supérieure à 1100 K) et de hauts rendements (entre 30 et 40%). Différents concepts de récepteurs ont été développés, comme les absorbeurs volumétriques, les récepteurs à suspension dense de particules ou les

cavités solaires. Le principal avantage des cavités solaires est les faibles pertes thermiques dues aux multiples réflexions à l'intérieur de la cavité, i.e. l'« effet cavité ».

Le rendement global d'une centrale solaire à tour est fonction du rendement des héliostats η_{hel} , du rendement d'absorption de la cavité η_{abs} et du rendement du cycle thermodynamique η_{cyc} . Ce dernier dépendant de la température du fluide de transfert, l'augmentation de la température du récepteur est une solution prometteuse pour maximiser le rendement global de conversion. Par conséquent, les pertes par émission, proportionnelle à la puissance quatrième de la température, augmentent fortement. Un récepteur surfacique est peu coûteux et très simple à élaborer mais les pertes radiatives par réflexion et par émission sont importantes, l'« effet cavité » étant inexistant. Une cavité corps noir absorbe, en théorie, la totalité du rayonnement incident grâce au nombre important de réflexions mais la température du fluide est faible du fait de l'homogénéisation de l'absorption sur une grande surface. Une cavité solaire cubique est un compromis permettant un rendement d'absorption important et de faibles pertes thermiques pour un coût limité. Le rendement d'absorption de la cavité dépend de l'absorption efficace de la cavité α_{eff} , de l'émissivité efficace ε_{eff} , de la surface d'ouverture de la cavité S_{ouv} , de la température des parois T et de la puissance incidente entrante dans la cavité [1] :

$$\eta_{abs} = \frac{\alpha_{eff} P_{inc} - \varepsilon_{eff} S_{ouv} \sigma T^4}{P_{inc}} \quad (1)$$

La taille de l'ouverture de la cavité est un compromis entre la maximisation de la puissance incidente et la minimisation des pertes radiatives sortantes par réflexion et émission. Un récepteur cavité solaire innovant est donc défini par une forte absorption dans le spectre solaire pour limiter les pertes par réflexions et une émissivité faible dans le spectre infrarouge pour diminuer l'émission des surfaces chauffées. Les performances radiatives des récepteurs sont décrites en fonction du rapport entre l'absorptance efficace dans le spectre solaire α_{eff} et l'émissivité dans l'infrarouge ε_{eff} [2]. Cet indice $\alpha_{eff} / \varepsilon_{eff}$ est à maximiser et tend vers l'infini dans le cas idéal. Cette sélectivité spectrale peut être optimisée grâce à des couches minces haute température ou grâce à la microstructuration des surfaces réceptrices.

L'objectif de cette étude est la quantification de l'influence du flux solaire incident et des réflectivités des parois latérales et de la paroi du fond sur le rendement d'absorption de cavités solaires cubiques. La réflectivité directionnelle des parois varie de totalement spéculaire à totalement diffuse et sur une large gamme de valeurs intégrées, de 0 (absorption totale) à 1. Le prochain paragraphe présente les principales hypothèses faites ainsi que les caractéristiques de la cavité. Le modèle est décrit dans le troisième. Les principaux résultats obtenus sont présentés dans la dernière partie.

2. Méthodologie

Le calcul de la puissance sortante du récepteur est réalisé grâce à une méthode Monte Carlo Lancers de Rayons. Cette dernière est fréquemment utilisée dans le domaine des

transferts thermiques pour les centrales solaires spécialement pour des géométries complexes du fait de sa précision et malgré le temps de calcul important nécessaire.

On suppose une cavité cubique composée d'une ouverture S_{ouv} , de quatre parois latérales et de la paroi du fond. Le flux solaire concentré incident entre par l'ouverture. Le milieu à l'intérieur de la cavité est supposé transparent et les cinq parois sont opaques et grises. L'approximation de l'optique géométrique est utilisée pour réduire le temps de calcul. Cette approximation considère que la lumière se déplace en ligne droite et que le principe de Fermat est vérifié. Les interférences et les effets de diffraction n'étant pas pris en compte, il n'est alors pas nécessaire de résoudre de multiples équations couplées intégrales décrivant ces deux phénomènes physiques ce qui permet de diminuer le temps de calcul. Les hypothèses de l'optique géométrique sont supposées valides si la longueur d'onde de l'onde incidente est plus grande que la rugosité.

L'algorithme utilisé dans cette étude est un programme Monte Carlo Lancers de rayons permettant de définir les principaux paramètres à optimiser de la réflectivité des différentes parois qui dépendent du matériau, de la rugosité de surface et des microstructures.

L'influence du flux incident sur le rendement d'absorption est étudiée pour deux configurations. Un premier cas théorique : une incidence purement diffuse (tous les points de l'ouverture diffusent dans le demi-hémisphère entrant à la cavité).

La deuxième configuration, plus réaliste, est une étude de cas de la centrale solaire Thémis, de 5 MW située dans les Pyrénées Orientales, en France. La centrale est composée de 201 héliostats et d'une cavité réceptrice en haut d'une tour de 104 mètres. La cavité est supposée cubique de largeur 1.2 mètres. Le logiciel *Solfast* [3] permet le calcul de la luminance dans un angle solide pour un élément de la surface d'ouverture de la cavité. Pour cette étude, l'ouverture est discrétisée en 100 éléments et le demi-hémisphère en 2025 angles solides. La figure 1 représente une cartographie angulaire du flux incident pour l'étude de cas de Thémis.

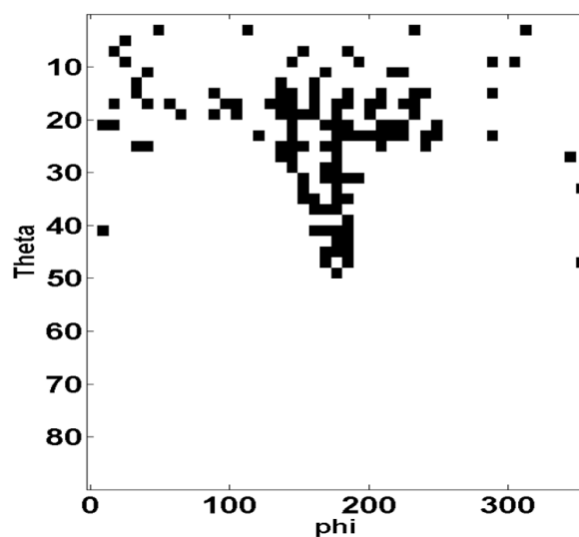


Figure 1 : Configuration angulaire du flux incident à l'entrée de la cavité pour Thémis en coordonnées sphériques

La fonction de distribution de la réflectivité bidirectionnelle (*BRDF*) décrit la distribution angulaire de la lumière réfléchiée en fonction des angles incidents et réfléchis à une longueur d'onde et pour un élément de surface d'un matériau opaque. Pour cette étude, le modèle de *BRDF* est considéré comme conservant l'énergie et respectant le principe de réciprocité d'Helmholtz. Le tableau suivant récapitule les expressions des modèles de *BRDF* théoriques purement spéculaire et purement diffus.

BRDF spéculaire	BRDF diffuse
$f_s(p, \lambda, \vec{w}_i, \vec{w}_r) = \rho_{sur} \frac{\delta(\vec{w}_i - \vec{w}_r)}{\cos(\theta_r)}$	$f_d(p, \lambda, \vec{w}_i, \vec{w}_r) = \rho_{sur} \frac{1}{\pi}$

Tableau 1 : *BRDF* spéculaire et diffuse

Le modèle choisi pour cette étude est la somme de deux parties parfaitement spéculaire et parfaitement diffuse avec a_d la part de diffus.

$$f_r(p, \lambda, \vec{w}_i, \vec{w}_r) = a_d f_d + (1 - a_d) f_s \quad (2)$$

Le rendement d'absorption de la cavité est calculé en fonction de la part de diffus a_d (égal à 0 pour une réflexion spéculaire et à 1 pour une réflexion diffuse) et des réflectivités de la paroi du fond $\rho_{sur} = \rho_f$ et des parois latérales $\rho_{sur} = \rho_l$ (variant de 0 si la surface est totalement absorbante à 1 pour des surfaces réfléchissantes).

3. Algorithme Monte Carlo

La méthode Monte Carlo étant utilisée pour calculer avec précision et simplicité des intégrales de façon stochastique [4], elle permet dans cette étude d'évaluer la puissance sortante de la cavité. La puissance sortante P_{sort} due à la réflexion optique des surfaces est décrite comme le produit de la puissance incidente pour tous les points de l'ouverture dans toutes les directions et d'un terme récursif décrivant la fraction réfléchiée ressortant de la cavité. Chaque rayon est suivi de son entrée jusqu'à son absorption ou sa sortie du récepteur.

$$P_{sort_{ref}} = \int p_{S_{ap}} dS_{ouv}(\vec{r}_0) \int p_{\Omega_{ap}} d\Omega_{ouv}(\vec{w}_0) R_1 \quad (3)$$

La puissance sortante due à l'émission des parois chauffées s'exprime en fonction de l'émissivité ε , de la température des parois et du terme récursif R_i .

$$P_{sort_{em}} = \int p_{S_{cav}} dS_{cav}(\vec{r}_0) \int p_{\Omega_{cav}} d\Omega_{cav}(\vec{w}_0) R_1 \quad (4)$$

Le rendement d'absorption s'exprime finalement :

$$\eta_{abs} = \left(\frac{P_{abs}}{P_{inc}} \right) = \left(1 - \frac{P_{sort}}{P_{inc}} \right) \quad (5)$$

Le terme récursif R_i dans les équations 3 et 4 est composé d'une fonction test ($H(X)$ égal à 1 si X est vrai et 0 sinon) : si le point d'intersection de la direction de réflexion se situe sur les

parois de la cavité, le terme récursif est itéré ; si le point se trouve sur l'ouverture, le poids Monte Carlo du rayon est sauvegardé.

$$R_i = H(\vec{r}_i \in S_{cav}) \int p_{\Omega_i} d\Omega_i(\vec{\omega}_i) f_r(\vec{r}_i, \vec{\omega}_i | \vec{\omega}_{i-1})(\vec{n}_i \cdot \vec{\omega}_{i-1}) (R_{i+1}) + H(\vec{r}_i \in S_{ap}) W \quad (6)$$

Le poids de Monte Carlo calculé par échantillonnage par importance grâce à l'utilisation de fonction densité de probabilités (*pdf*) dépend du nombre de réflexions N et représente une réalisation de la variable aléatoire associée à la puissance sortante.

$$W_{ref} = \frac{I_0(\vec{n}_{ouv} \cdot \vec{\omega}_0)}{p_{S_{ap}} p_{\Omega_{ap}}} \prod_{i=1}^N \frac{f_r(\vec{r}_i, \vec{\omega}_i | \vec{\omega}_{i-1})(\vec{n}_i \cdot \vec{\omega}_{i-1})}{p_{\Omega_i}} \quad (7)$$

$$W_{em} = \frac{\varepsilon \sigma T(\vec{r}_0)^4 (\vec{n}_0 \cdot \vec{\omega}_0)}{p_{S_{cav}}} \prod_{i=1}^N \frac{f_r(\vec{r}_i, \vec{\omega}_i | \vec{\omega}_{i-1})(\vec{n}_i \cdot \vec{\omega}_{i-1})}{p_{\Omega_i}} \quad (8)$$

Les pdf pour les trois cas de références sont exposées dans le tableau suivant. *Solfast* (logiciel de lancer de rayons dans les installations solaires) permet le calcul de la luminance incidente à la cavité pour chaque discrétisation angulaire et spatiale dans le cas de Thémis. Les surfaces étant purement spéculaire ou diffuse, l'émission des parois est considérée totalement diffuse.

	$p_{S_{ap}}$	$p_{\Omega_{ap}}$
Flux collimaté	$\frac{1}{S_{ap}}$	$\delta(\vec{\omega}_0 - \vec{\omega}_s)$
Flux diffus	$\frac{1}{S_{ap}}$	$\frac{\vec{n}_{ap} \cdot \vec{\omega}_0}{\pi}$
Flux focal	$\delta(\vec{p}_0 - \vec{p}_{mid})$	$\frac{2(\vec{n}_{ap} \cdot \vec{\omega}_0)\theta_{op}}{2\pi(1 - (\vec{n}_{ap} \cdot \vec{\omega}_{op}))}$

Tableau 2 : Fonctions densité de probabilités spatiale et angulaire pour les configurations théoriques de flux incident

Le calcul de la direction de réflexion à l'intérieur de la cavité est réalisé à partir de l'expression de la BRDF choisie (spéculaire ou diffuse) (Tab. 3).

	p_{Ω_i}
Réflexion spéculaire	$\delta(\vec{\omega}_0 - \vec{\omega}_s)$
Réflexion diffuse	$\frac{\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i}{\pi}$

Tableau 3 : Fonctions densité de probabilités pour les réflexions dans la cavité

La méthode Monte Carlo est, par nature, coûteuse en temps de calcul puisque la précision du résultat augmente avec le nombre de rayons tracés. Une étude de la convergence de l'algorithme permet de définir le nombre optimal de rayons qui résulte d'un compromis entre temps de calcul et précision du résultat. Le nombre de rayons choisi pour cette étude est $5 \cdot 10^6$ afin d'obtenir un temps de calcul d'environ 10 secondes pour un calcul de Eq. 3 ou 4, avec une machine (type serveur) utilisant 5 processeurs Intel XEON E7350.

4. Résultats

L'étude paramétrique permet de calculer (1) l'influence du flux incident et (2) l'influence des BRDF de la paroi du fond et des parois latérales sur le rendement d'absorption de la cavité afin de déterminer les principaux paramètres influençant le rendement.

4.1 Reflexion spéculaire

La figure 2 montre le rendement d'absorption d'un récepteur cavité cubique dont les parois sont purement spéculaires ($a_d = 0$) soumis à un flux solaire incident concentré diffus et selon la configuration de la centrale Thémis. Le rendement est calculé en supposant des parois non émettrices (Fig. 2, pointillés) ou en prenant en compte l'émission des surfaces (Fig. 2, traits pleins). Dans ce cas, la température des parois est fixée à 1300 K pour la paroi du fond et à 1100 K pour les faces latérales.

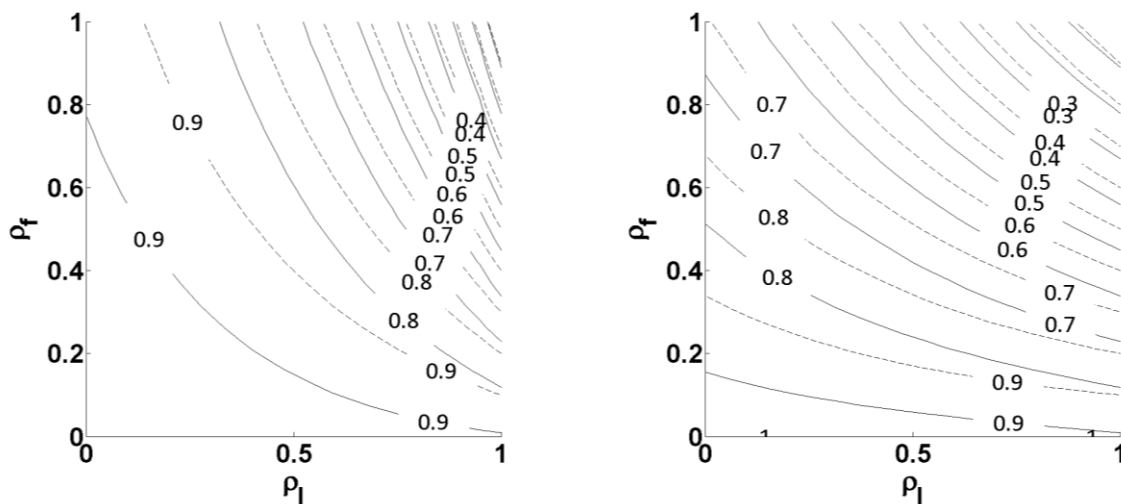


Figure 2 : Rendement d'absorption d'une cavité aux parois spéculaires ($a_d = 0$) pour un flux incident a) diffus et b) de type Thémis ; sans émission (pointillés) et avec (traits pleins)

Pour un flux incident diffus, le paramètre d'influence principal est la réflectivité des parois latérales ρ_l . Si cette dernière est inférieure à 40 %, le rendement d'absorption est supérieur à 80 % en tenant compte de l'émission. Dans le cas de la centrale Thémis, le paramètre d'influence principale est la réflectivité de la paroi du fond. On note que les pertes par émission ont, en particulier pour l'incidence diffuse, d'autant plus d'influence que la réflectivité des parois est importante. Par exemple, pour $\rho_f = \rho_l = 0.7$ et dans le cas d'un flux diffus, le rendement d'absorption est égal à 0.9. Les pertes sont dues pour deux tiers aux réflexions et pour 33 % à l'émission. Pour le flux incident de Thémis et les réflectivités de surfaces identiques, l'émission des parois cause 20 % des pertes radiatives.

4.2 Réflexion diffuse

La figure suivante montre le rendement d'absorption d'un récepteur cavité cubique dont les parois sont purement diffuses ($a_d = 1$) soumis à un flux diffus et selon la configuration de la centrale Thémis. Le rendement est calculé sans émission (pointillés) ou en prenant en compte l'émission des surfaces (traits pleins). La température des parois est fixée à nouveau à 1300 K pour la paroi du fond et à 1100K pour les faces latérales.

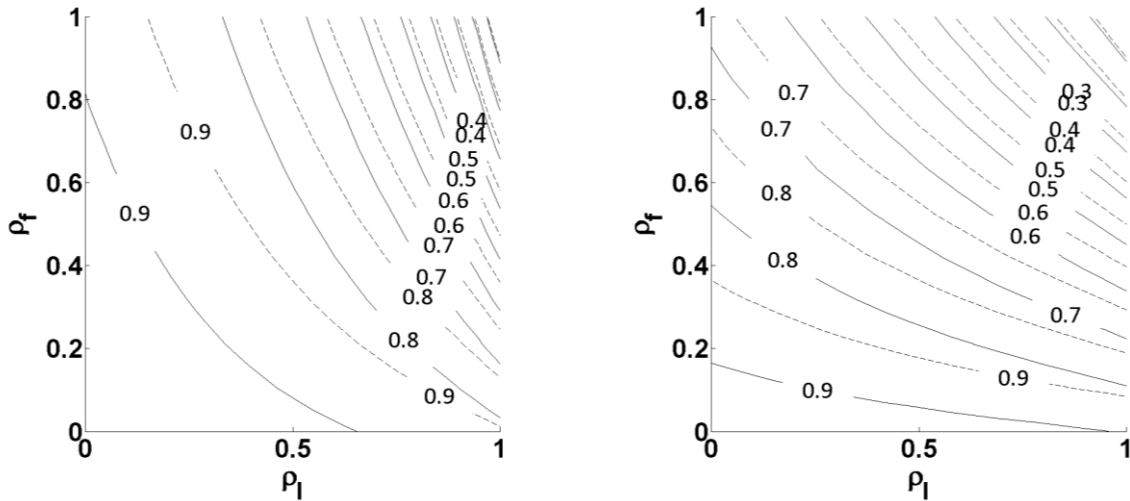


Figure 3 : Rendement d'absorption d'une cavité cubique aux parois diffuses ($a_d = 1$) pour un flux incident a) diffus et b) de type Thémis ; sans émission (pointillés) et avec (traits pleins)

Le paramètre principal pour des surfaces et un flux incident diffus est la réflectivité des parois latérales. Le rendement d'absorption est globalement élevé pour la configuration de type Thémis et maximisé pour le flux diffus pour des parois absorbantes (ρ_f et ρ_l supérieur à 0.5). A l'image des résultats obtenus pour les surfaces spéculaires, les pertes par émission ont plus d'influence sur le rendement d'absorption pour un flux incident diffus que pour le cas de Thémis.

4.3 Effet de la BRDF

La réflectivité d'une surface dépend principalement du matériau, de la température et de la rugosité. Le contrôle de la rugosité est une solution prometteuse pour optimiser la part de diffus a_d pour augmenter le rendement d'absorption à une température donnée. La figure 4 montre l'influence de la part de diffus a_d sur le rendement d'absorption pour les quatre configurations de flux incident et en fixant $\rho_f = \rho_l = 0.5$.

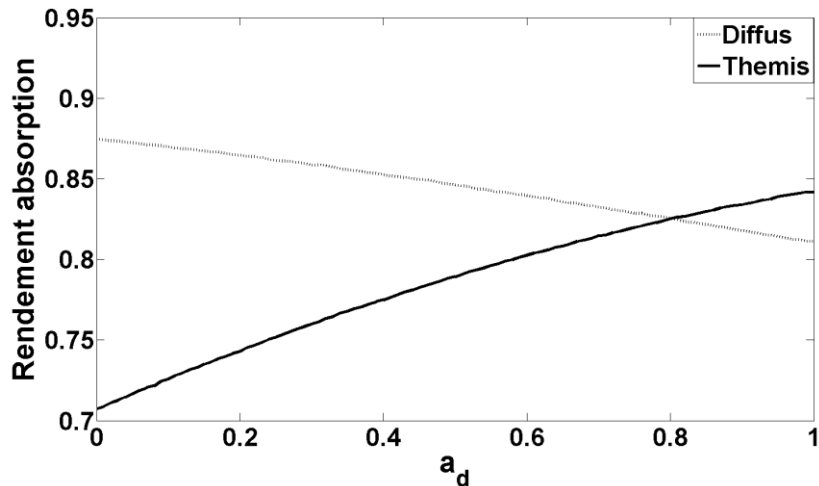


Figure 4 : Influence de la part de diffus de la BRDF sur le rendement d'absorption d'un récepteur cavité pour deux configurations de flux incident et $\rho_f = \rho_l = 0.5$

L'absorption globale augmente légèrement si les parois sont plus diffuses pour l'incidence de type Thémis. Une possibilité pour augmenter le rendement est alors d'augmenter la diffusion des parois en augmentant la rugosité des surfaces. Dans le cas d'un flux incident diffus, le rendement est maximisé pour des parois spéculaires, $a_d = 1$.

Conclusion

Le rendement d'absorption d'un récepteur solaire à cavité a été étudié en fonction de la BRDF et de deux configurations de flux incident. Pour l'incidence de type Thémis, le paramètre d'influence principale est la réflectivité de la paroi du fond de la cavité alors que les parois latérales ont plus d'effet sur le rendement d'absorption dans le cas d'une incidence diffuse. La prise en compte de l'émission des parois permet de démontrer que l'optimisation de la sélectivité spectrale est un enjeu important pour augmenter le rendement de récepteur cavité à parois absorbantes. L'étude de l'influence de la géométrie du récepteur sur l'absorption globale est une étape nécessaire pour compléter cette étude paramétrique.

Références

- [1] Steinfeld, A., Schubnell, M., 1993, Optimum aperture size and operating temperature of a solar cavity-receiver. Solar Energy, Vol 50, No.1, 19-25
- [2] Kennedy, C.E., 2002. Review of mid- to high-temperature solar selective absorber materials, tech. rep., NREL/TP-520-31267
- [3] Rocca, J.P., Piaud, B., Coustet, C., et al., 2012. A ray-tracing Monte Carlo software for solar concentrating facilities, Journal of Physics : Conference series 369, 012029
- [4] Delatorre, J. et al., 2013. Monte Carlo advances and concentrated solar applications, Solar Energy, in press