

# Modélisation énergétique du système Parabole/Stirling EURODISH de production d'électricité

François NEPVEU<sup>1\*</sup>, Alain FERRIERE<sup>1</sup>, Françoise DAUMAS-BATAILLE<sup>2</sup>, Isabelle VERDIER<sup>3</sup>, Philippe LEFEVRE<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire PROMES, UPR CNRS 8521, 7 rue du Four Solaire - 66120 Font-Romeu

<sup>2</sup>Laboratoire PROMES, UPR CNRS 8521, Tecnosud - 66100 Perpignan

<sup>3</sup>CREED, zone portuaire de Limay, 291 avenue Dreyfous Ducas - 78520 Limay

<sup>4</sup>EDF R&D, 1 avenue du Général de Gaulle - 92141 Clamart Cedex

\*(auteur correspondant : [francois.nepveu@promes.cnrs.fr](mailto:francois.nepveu@promes.cnrs.fr))

**Résumé** – Dans le cadre du projet européen Envirodish, un système Parabole/Stirling de 10 kW<sub>elec</sub> est en fonctionnement depuis Juin 2004 à Font-Romeu au laboratoire PROMES. Afin d'évaluer et d'étudier les pertes optiques et thermiques du système, une modélisation de la conversion énergétique solaire-électricité a été réalisée. Les premiers résultats montrent un bon accord avec les mesures expérimentales dans la gamme des hauts flux solaires. Les travaux en cours portent sur l'évolution des pertes thermiques en fonction de différentes propriétés géométriques ou physiques du système.

## Nomenclature

$C_p$	chaleur massique à P constant, $J.kg^{-1}$	$r$	réflectivité
$C_v$	chaleur massique à V constant, $J.kg^{-1}$	$r_m$	masse volumique, $kg.m^{-3}$
$Diss$	dissipation thermique par frottement visqueux, $J$	$S$	constante de Stefan – Boltzman, $W.m^{-2}.K^{-4}$
$DNI$	ensoleillement normal direct, $W.m^{-2}$	$\lambda$	longueur d'onde, $mm$
$F$	facteur de forme	$I_t$	conductivité thermique, $W.K^{-1}.m^{-1}$
$h$	coefficient de convection, $W.m^{-2}.K^{-1}$	$\Theta$	puissance, $W$
$J$	radiosité, $W.m^{-2}$	<i>indices</i>	
$m$	masse de fluide de travail, $kg$	$a$	air ambiant
$\dot{m}$	débit massique, $kg.s^{-1}$	$C$	sous volume de compression
$\overline{M}$	masse molaire, $g.mol^{-1}$	$D$	sous volume de détente
$P$	pression, $Pa$	$H$	sous volume récepteur solaire
$Pu$	puissance thermique, $W$	$K$	sous volume refroidisseur
$Q$	énergie thermique, $W$	$R1$	sous volume régénérateur
$R$	constantes des gaz parfaits, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	$R2$	sous volume régénérateur
$Rt$	résistance thermique, $K.W^{-1}$	$rec$	récepteur
$r_g$	rendement solaire – électricité	$par$	parabole
$S$	surface, $m^2$	$w$	paroi
$t$	temps, $s$	$T$	température, $K$
$V$	volume, $m^3$	<i>exposants</i>	
$W$	travail, $J$	$BT$	bande spectrale basse température
<i>symboles grecs</i>		$Cv$	convection
$e$	émissivité totale hémisphérique	$Cd$	conduction
$j$	flux solaire, $W.m^{-2}$	$elec$	électrique
		$S$	bande spectrale rayonnement solaire

## 1. Introduction

Dans le cadre du projet Envirodish du ministère Allemand de l'environnement, le laboratoire PROMES du CNRS à Font-Romeu a installé un prototype Eurodish d'une puissance de 10 kW<sub>élec</sub> en 2004. L'objectif de ce projet était d'implanter sur plusieurs sites de pays différents (France, Espagne, Italie, Allemagne) des unités Eurodish et de mener une campagne de comparaison des performances de ces unités.

Aujourd'hui, les recherches du laboratoire se sont focalisées sur les améliorations futures du système Eurodish. Une modélisation de la chaîne de conversion énergétique solaire-électricité de l'ensemble concentrateur, cavité-récepteur solaire et moteur Stirling a donc été réalisée afin d'évaluer dans un premier temps, les différentes pertes thermiques du système puis dans un second temps, d'améliorer le rendement solaire-électricité et d'étudier différentes évolutions du système telles la cogénération ou l'hybridation.

## 2. Modélisation

Le système Parabole/Stirling a été divisé en trois parties principales (figure 1) : la partie thermo-optique comprenant le concentrateur (parabole) et la cavité, et la partie cycle comprenant le bloc moteur Stirling et la génératrice électrique. Le récepteur solaire, placé en fond de cavité, est à l'interface entre ces deux parties. Le système comprenant les auxiliaires de suivi et les organes de commande constitue la dernière partie.

La partie thermo-optique a été modélisée en s'appuyant sur des mesures expérimentales et sur un modèle simple permettant d'estimer les pertes thermiques de l'ensemble cavité-récepteur solaire et la puissance transmise au gaz de travail du moteur Stirling.

La modélisation du bloc moteur Stirling s'appuie sur une méthode nodale décrite par Urieli et al [1] et reprise par Lemrani [2].

De plus, le rendement énergétique de la génératrice est connu et des mesures électriques ont permis de connaître l'auto-consommation du système.

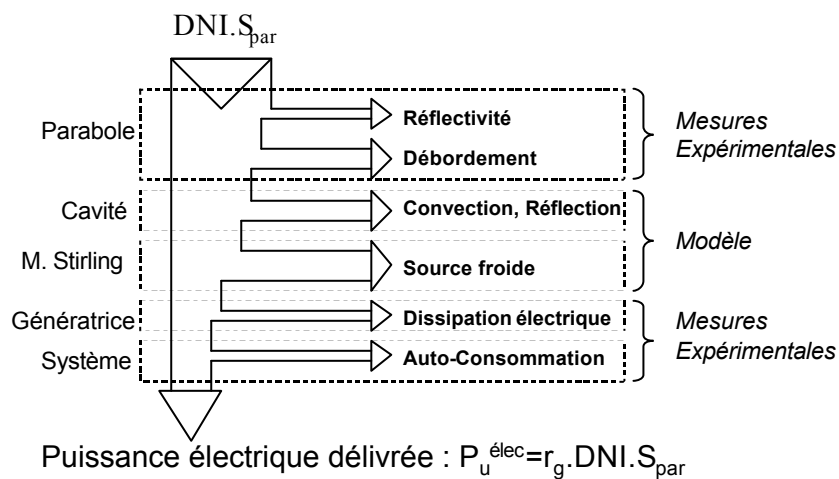


Figure 1 : Modélisation du système Parabole/Stirling Eurodish

### 2.1. Modélisation de la partie thermo-optique

Le concentrateur est une parabole d'un diamètre de 8.5 m et d'une distance focale de 4.5 m. Des mesures effectuées en juillet 2005 ont permis d'estimer la surface utile de cette parabole à 52.9 m<sup>2</sup> pour une réflectivité  $r_{par}$  de 92.5 % [3].

Le récepteur solaire est l'un des éléments clef du système. Celui ci doit être capable de convertir efficacement en chaleur le rayonnement solaire concentré par la parabole.

Ce récepteur est composé de 78 tubes d'Inconel de 1.6 mm de diamètre interne dans lesquels circule le fluide de travail du moteur Stirling (hydrogène).

Pour augmenter l'efficacité du récepteur, celui ci est placé au fond d'une cavité cylindrique composée d'une céramique en fibres d'alumine. Cette cavité est décrite par Keck et al. [4].

Des mesures de flux ont montré que 85 % du flux réfléchi par la parabole entre dans la cavité : 80 % de cette puissance frappe directement le récepteur solaire et 5 % éclaire une partie des parois de la cavité.

A partir de ces mesures, on effectue un bilan de radiosités en décomposant la cavité en 4 surfaces considérées diffuses et opaques : l'ouverture, le récepteur solaire, la paroi en céramique éclairée et celle non éclairée.

Les propriétés radiatives moyennes des surfaces 'récepteur' et 'céramique' sont connus pour deux bandes spectrales : celle du rayonnement solaire,  $\lambda < 2.5 \mu\text{m}$  et celle du rayonnement de « basse température »,  $\lambda > 2 \mu\text{m}$ . Les émissivités de ces trois surfaces sont considérées constantes et sont données pour une température de 800 °C. Le tableau 1 indique ces données. L'ouverture est une surface imaginaire considérée noire et à la température extérieure  $T_a$ .

	$I_i$	$C_p$	$r_m$	$e$	$r$	
	$W.K^{-1}.m^{-1}$	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	$kg.m^{-3}$		$r^S (\lambda < 2.5 \mu\text{m})$	$r^{BT} (\lambda > 2 \mu\text{m})$
Inconel	21	570	8440	0,88	0,07	0,14
Céramique	10	1000	200	0,9	0,15	0,12

Tableau 1 : Propriétés thermo-physiques des matériaux constituant la cavité et le récepteur

Dans la bande spectrale du rayonnement solaire, on obtient pour la surface i, l'équation (1), et dans celle du rayonnement de basse température, l'équation (2) :

$$J_i^S = r_i^S \cdot (j_i + \sum_{j=1}^4 F_{ij} J_j^S) \quad (1)$$

$$J_i^{BT} = e_i S T_i^4 + r_i^{BT} \cdot (\sum_{j=1}^4 F_{ij} J_j^{BT}) \quad (2)$$

La puissance radiative gagnée ou perdue pour chaque surface i est donnée par les équations (3) et (4) :

$$\Theta_i = S(j_i - j_i - \sum_{j=1}^4 F_{ij} J_j) \quad (3)$$

$$\text{ou } J_i = J_i^S + J_i^{BT} \quad (4)$$

On prend également en compte des pertes par conduction à travers les parois en céramique et à l'arrière du récepteur solaire (5), et par convection à l'intérieur de la cavité (6). Les coefficients de convection h sont estimés à partir de corrélations données par Taumoeofalau et al. [5].

$$Pu_i^{Cd} = \frac{T_i - T_a}{Rt_i} \text{ pour } i \neq 1 \quad (5)$$

$$Pu_i^{Cv} = S h (T_i - T_a) \text{ pour } i \neq 1 \quad (6)$$

L'évolution de la température moyenne du récepteur  $T_{rec}$  est alors donnée par l'équation (7) :

$$(\mathbf{r}_m C_p V)_{\text{réc}} \frac{dT_{\text{réc}}}{dt} = -\Theta_{\text{réc}} - Pu_{\text{réc}}^{\text{Cd}} - Pu_{\text{réc}}^{\text{Cy}} - P_H \quad (7)$$

où  $P_H$  est la puissance thermique fournie au fluide de travail du moteur Stirling circulant dans le récepteur.

## 2.2. Modélisation énergétique du moteur Stirling

Le moteur Stirling est basé sur un cycle thermodynamique à processus de régénération, dans lequel un fluide, alternativement détendu et comprimé circule dans trois échangeurs, le réchauffeur, le régénérateur et le refroidisseur.

Le moteur Stirling utilisé par le système EURODISH est le SOLO 161. Ce moteur, développé et vendu par l'industrie allemande SOLO est de type alpha cinématique tournant à 1500 tr.min<sup>-1</sup> à deux cylindres et deux pistons déphasés de 90° et dont les mouvements sont engendrés par un système de bielle-manivelle.

La modélisation du cycle Stirling s'appuie sur une méthode nodale. Le moteur est divisé en 6 sous-volumes  $i$ , décrits sur la figure 2 auxquels on applique une équation d'état (8) et les équations de bilan de masse (9) et d'énergie (10) sous certaines hypothèses :

- le gaz de travail, ici de l'hydrogène, vérifie la loi des gaz parfaits
- il n'y a pas de fuites
- les variations de volumes sont sinusoïdales
- l'écoulement est unidimensionnel et quasi-stationnaire
- la pression est constante dans tout le moteur.
- les espaces de compression et de détente sont adiabatiques
- le profil de température est linéaire dans le régénérateur
- la température de paroi du refroidisseur est constante

$$PV_i = m_i \frac{R}{M} T_i \quad (8)$$

$$\frac{dm_i}{dt} = (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out})_i \quad (9)$$

$$dQ_i + (C_{p(T_{in})} T_{in} \dot{m}_{in} - C_{p(T_{out})} T_{out} \dot{m}_{out})_i = dW_i + C_{v(T_i)} \frac{d(mT)_i}{dt} \quad (10)$$

Dans les 4 volumes 'échangeur'  $i=K, R1, R2$  et  $H$ , le terme d'énergie thermique  $dQ$  est donné par l'équation (11) :

$$dQ_i = h_i S_i (T_{wi} - T_i) - Diss_i \quad (11)$$

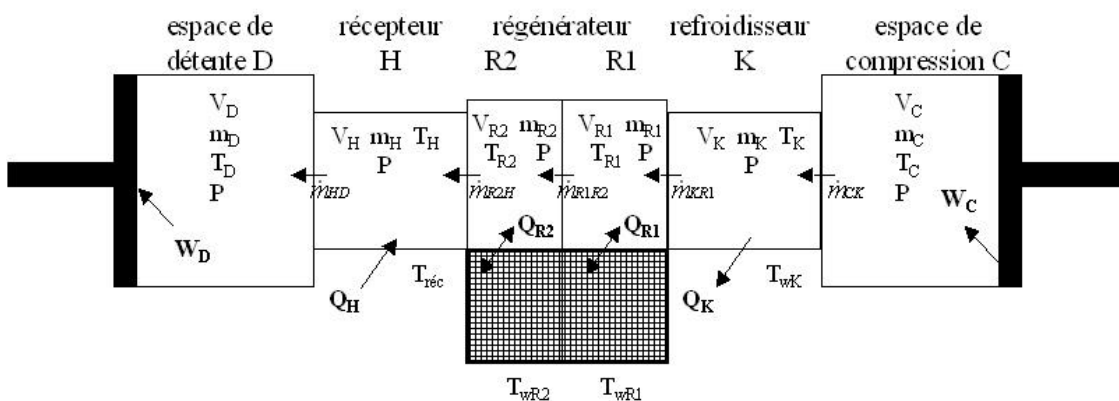


Figure 2 : Schéma de la modélisation du moteur Stirling par une méthode nodale

A ces quatre équations, on ajoute l'équation de la conservation de la masse d'hydrogène dans le moteur, l'évolution sinusoïdale des volumes de détente et de compression et les échanges de chaleur dans les 4 sous-volumes « échangeur » où les coefficients de convection  $h$  sont calculés à partir de corrélations valables en régime d'écoulement quasi-stationnaire.

On obtient alors un système algèbro-différentiel que l'on résout numériquement.

### 2.3. Résolution numérique

Le couplage des deux modèles se fait au niveau du récepteur en utilisant l'équation (7) dans laquelle on calcule du côté cavité la puissance solaire absorbée et du côté moteur Stirling la puissance fournie au fluide de travail du moteur Stirling.

Le principe de résolution du système consiste à fixer les valeurs initiales de température à  $t=0$ , puis d'intégrer sur des pas de temps faibles, jusqu'à obtention d'un état cyclique. Urieli et al [1] précise que le critère de convergence le plus pertinent est la chaleur fournie au régénérateur au bout d'un cycle. Celle-ci doit en effet être nulle pour ne pas accumuler ou extraire de la chaleur à cet élément au cours du temps.

Au final, on obtient à chaque pas de temps du cycle, l'état du gaz dans les différents sous-volumes, les échanges de masse entre sous-volumes, les échanges d'énergie thermique dans les échangeurs et mécanique dans les deux cylindres, et les pertes thermiques dans la cavité.

## 3. Résultats

L'équation (11) suppose, dans les sous-volumes « échangeur » la connaissance d'un coefficient de transfert de chaleur et d'un coefficient de frottement visqueux. Ces coefficients sont évalués à partir de corrélations classiques données par Lemrani [2], valables dans le cas où l'écoulement est permanent. Nous ne disposons pas de corrélations simples pour les écoulements oscillants. C'est actuellement la principale limite des modélisations des moteurs Stirling. Pour remédier à ce problème, on ajoute un coefficient correcteur aux corrélations utilisées dans les trois échangeurs pour s'approcher des performances expérimentales du moteur.

Dans le cas du système Parabole/Stirling, la méthode utilisée est d'ajuster ces coefficients correcteurs sur des mesures expérimentales données par Reinalter et al [3] dans des conditions de fonctionnement spécifiques.

Les prédictions du modèle 'ajusté' de la distribution énergétique, et les mesures expérimentales sont données dans la figure 3. Cette figure montre l'importance des pertes énergétiques dans la cavité notamment par débordement de la tâche focale au niveau de l'ouverture de la cavité, et par émission et réflexion des parois de la cavité vers l'air ambiant. Les pertes de la cavité sont évaluées à 13 kW, soit 29% de la puissance solaire de 48 kW arrivant sur la parabole.

La figure 4 donne les estimations du modèle pour le rendement optique et le rendement moteur en fonction de l'ensoleillement (DNI). Le rendement global de conversion solaire-électricité issu du modèle est comparé à des résultats de mesures de DNI et de puissance électrique effectuées sur le système. On remarque un bon accord entre le modèle et les mesures pour des flux supérieurs à  $750 \text{ kW.m}^{-2}$ , mais les résultats s'écartent de plus de 20 % (DNI= $500 \text{ W.m}^{-2}$ ) lorsque le flux diminue. On peut attribuer cet écart au bilan thermique modélisé dans les échangeurs : les coefficients d'échange 'ajustés' ne sont validés que pour des flux solaires voisins de la valeur d'ensoleillement nominale ( $850 \text{ W.m}^{-2}$ ).

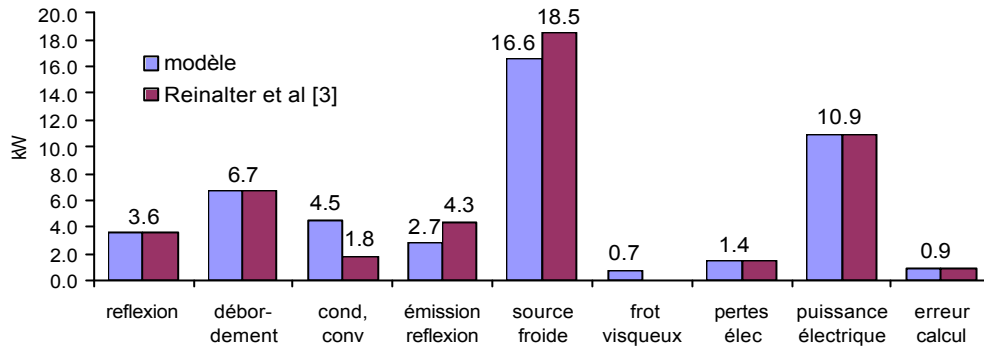


Figure 3 : Distribution des puissances du système Parabole/Stirling prédite par le modèle et donnée par [3].  $DNI=906 \text{ W.m}^{-2}$ ,  $T_a=268 \text{ K}$ , gaz :  $H_2$ ,  $T_{rec}=1053 \text{ K}$

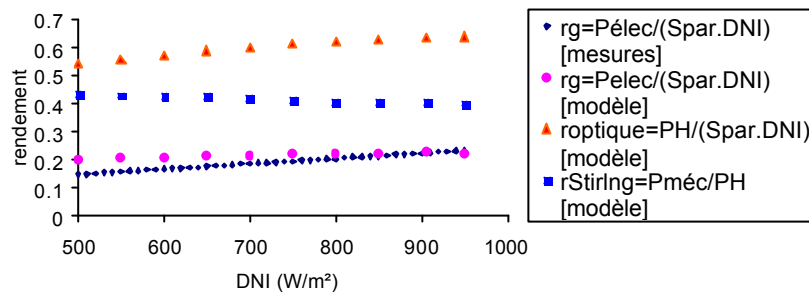


Figure 4 : Evolution du rendement global en fonction de la DNI

## 4. Conclusion

En s'appuyant sur des résultats expérimentaux et sur une modélisation de l'ensemble cavité-récepteur solaire et moteur Stirling, un modèle de la conversion énergétique solaire-électrique a été construit. Les prédictions des performances du modèle concordent avec les mesures expérimentales observées sous haut flux solaire direct. Les travaux en cours visent à optimiser la conception de certains composants. On effectue des analyses paramétriques des performances de la cavité où les pertes énergétiques sont importantes. Des recherches sur la modélisation de la partie optique parabole-cavité par le logiciel de lancer de rayons SOLTRACE développé par le NREL, et sur les transferts thermiques dans les écoulements oscillants ont également débuté afin d'améliorer la précision et la fiabilité du modèle pour une large gamme d'ensoleillement.

## Références

- [1] I. Urieli, D.M. Berchowitz, Stirling cycle analysis, Published by Adam Hilger Ltd, Bristol, 1984
- [2] H. Lemrani, Modélisation énergétique des moteurs Stirling, Thèse de doctorat, école des mines de Nantes, 1995
- [3] W. Reinalter, S. Ulmer, P. Heller, T. Rauch, J.M. Gineste, A. Ferriere, F. Nepveu, *Detailed performances analysis of the 10 kW CNRS-PROMES Dish/Stirling*, Proceeding of the 13<sup>th</sup> SolarPACES International Symposium, Seville, Spain, 2006
- [4] T. KECK, P. HELLER, W. REINALTER, *Eurodish-continuous operation, system improvement and reference units*, Proceeding of the 13<sup>th</sup> SolarPACES International Symposium, Seville, Spain, 2006
- [5] T. Taumoefolau, S. Paitoonsurikarn, G. Hughes, K. Lovegrove, *Experimental Investigation of natural convection heat losses from a model solar concentrator cavity receiver*, Journal of Solar Energy Engineering, May 2004, Vol 126-2, 801-807