

# Estimation et comparaison des performances de deux filières de production de l'hydrogène en utilisant l'énergie solaire

Stoian PETRESCU<sup>1</sup>, Monica COSTEA<sup>1\*</sup>, Camelia PETRE<sup>1</sup>, Octavian MALANCIOIU<sup>1</sup>, Nicolae BORIARU<sup>1</sup>, Michel FEIDT<sup>2</sup>, Alexandru DOBROVICESCU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculté de Génie Mécanique, Université Polytechnique de Bucarest  
Splaiul Independentei 313, 060042 Bucarest, Roumanie

<sup>2</sup>LEMETA – GESPE, U.R.A. C.N.R.S. 7563, Université "Henri Poincaré" de Nancy 1  
2, avenue de la Forêt de Haye, B.P.160, 54504 Vandoeuvre Cedex

\* (auteur correspondant : liana5802@yahoo.fr)

**Résumé :** Le travail présente une étude des performances de deux filières de production de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire. La première filière comporte un moteur Stirling solaire placé dans le foyer d'un miroir parabolique et couplé à un générateur électrique suivi par l'électrolyseur. La deuxième filière comporte des cellules photovoltaïques et l'électrolyseur. Un modèle mathématique d'optimisation des performances de l'ensemble concentrateur – récepteur de radiation concentrée – moteur Stirling solaire a été élaboré. Il a mis en évidence des régimes de maximum de puissance délivré par le moteur, ainsi que de maximum du rendement de l'ensemble concentrateur - moteur solaire. La comparaison des performances des deux filières de production de l'hydrogène a visé la quantité d'hydrogène produite, son coût et des aspects de dimensionnement des installations.

## Nomenclature

$A$	surface, $m^2$	$\delta$	épaisseur de paroi du récepteur
$c_v$	chaleur spécifique à $V = ct$ , $J.kg^{-1}.K^{-1}$	$\varepsilon$	taux de compression ou émissivité
$C$	facteur de concentration du rayonnement	$\gamma$	exposant isentropique du gaz parfait
$E$	densité surfacique de flux solaire, $W.m^{-2}$	$\eta$	rendement
$h$	coefficient de convection, $W.m^{-2}.K^{-1}$	$\tau$	rapport des températures extrêmes du gaz
$k$	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$		
$m$	masse du fluide cyclé, $kg$		<i>Indices et exposants</i>
$n_r$	vitesse de rotation, $rot.min^{-1}$	$C$	gaz, côté chaud de la machine
$P$	puissance délivrée, $W$	$cav$	cavité
$PC$	pile à combustible	$conc$	concentrateur
$PV$	cellule photovoltaïque	$D$	gaz, côté froid de la machine
$\dot{Q}$	flux de chaleur, $W$	$disp$	disponible
$R$	constante spécifique du gaz, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	$E$	électrolyseur
$T$	température, $K$	$el$	électrique
$w$	vitesse moléculaire moyenne, $m.s^{-1}$	$ext/int$	externe/interne
$X$	coefficient de régénération imparfaite	$GE$	générateur électrique
$z'$	coefficient d'ajustement	$mir$	miroir
		$MS$	moteur Stirling
		$p$	perte
		$rec$	récepteur
		$II$	second principe de la thermodynamique
<i>Symboles grecs</i>			
$\alpha$	absorbivité		

## 1. Introduction

Les prévisions sombres sur l'épuisement des ressources fossiles de combustibles dans un avenir proche et les effets sans précédent de la pollution sur le climat de notre planète ont

réorienté les efforts récents des chercheurs vers de nouvelles sources d'énergie [1-4]. L'hydrogène apparaît très prometteur dans ce contexte, surtout par les avantages qu'il présente (le plus haut rapport énergie/masse de tous les combustibles, abondance, pas de pollution suite à son utilisation, il peut remplacer les combustibles utilisés présentement), mais aussi par ses utilisations multiples [1, 3, 4]. Par ailleurs, l'hydrogène peut constituer la clé d'utilisation des énergies renouvelables, et surtout de l'énergie solaire. En effet, produit à l'aide de l'énergie solaire, l'hydrogène représente un moyen de stockage pour cette énergie, en vue d'utilisation différée.

On connaît que l'hydrogène est l'élément prépondérant dans l'Univers et le plus répandu sur Terre. Si l'atome d'hydrogène est très stable, il n'est pas de même pour sa molécule, qu'on trouve généralement combinée avec d'autres éléments (dans l'eau, biomasse, combustibles fossiles, etc.). Il en résulte que l'obtention de l'hydrogène en état utilisable (moléculaire) nécessite de l'énergie, matière source, technologie de production, moyens de stockage, éventuellement de transport, respectivement d'utilisation. Tous ces aspects nécessitent des recherches et expérimentations multiples.

Le présent travail porte sur deux filières de production de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire. Il s'agit de transformer l'énergie solaire en énergie électrique, pour l'utiliser ensuite à la séparation de l'eau en ses composants, hydrogène et oxygène, dans un électrolyseur. La première filière comporte un moteur Stirling solaire placé au foyer d'un miroir parabolique et couplé à un générateur électrique suivi par l'électrolyseur. La deuxième filière comporte des cellules photovoltaïques et l'électrolyseur.

Le but de ce travail est de comparer les performances des deux filières de production d'hydrogène du point de vue quantitatif, coût d'investissement et de production et des aspects de dimensionnement des installations.

## 2. Modèle mathématique d'optimisation des performances du moteur Stirling solaire

### 2.1. Présentation de l'ensemble solaire avec concentration

La Fig. 1 présente le schéma de l'ensemble solaire avec concentration qu'on propose d'utiliser pour la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique sur la première filière. Généralement, un tel ensemble est composé par un miroir parabolique, un récepteur de radiation solaire concentrée, un moteur Stirling avec un générateur électrique.

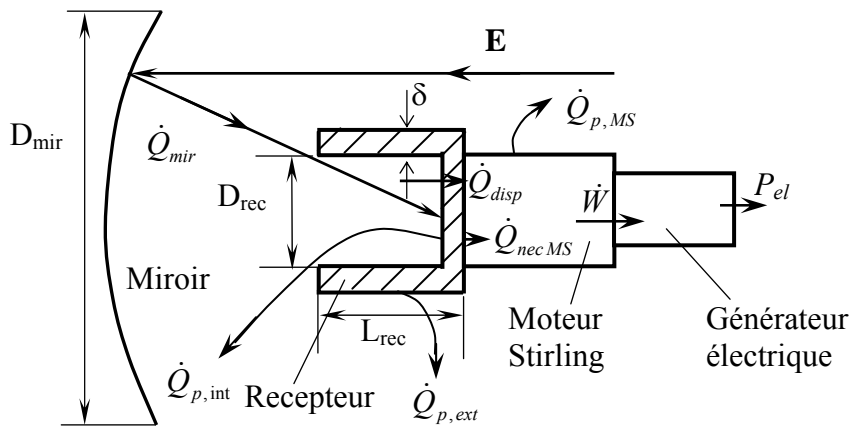


Figure 1. Représentation de l'ensemble solaire avec concentration

Le diamètre du miroir dépend de la puissance électrique à fournir, calculée pour l'insolation maximale ( $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ) et le rendement de conversion de l'énergie solaire de chaque composant. La forme idéale du miroir est celle parabolique, permettant de mieux concentrer la radiation solaire dans le récepteur. Le choix du moteur de Stirling est du à son rendement élevé qui est égal théoriquement à celui du cycle de Carnot entre les mêmes températures. Par ailleurs, le moteur de Stirling solaire semble transformer l'énergie solaire en travail mécanique d'une façon très efficace.

## 2.2. Modélisation mathématique de l'ensemble solaire avec concentration

Un modèle mathématique d'optimisation des performances du moteur Stirling solaire a été élaboré sur la base de l'expression du premier principe de la Thermodynamique pour des processus à vitesse finie [6-8]. Basée sur le bilan thermique du récepteur de radiation concentrée, l'expression du rendement du récepteur résulte sous la forme :

$$\eta_{rec} = \alpha_{cav} \left[ 1 - \frac{\varepsilon_m}{\alpha_{cav}} \frac{\sigma T^4}{\eta_{mir} \cdot E \cdot C} - \frac{A_{ext} h_{ext} (T_{ext} - T_0) + A_{int} h_{int} (T - T_0)}{\alpha_{cav} \cdot \eta_{mir} \cdot E \cdot C \cdot A_{cav}} \right] \quad (1)$$

Cette expression fait apparaître divers paramètres comme : le facteur géométrique de concentration, la surface de la cavité du récepteur, sa surface extérieure isolée, sa surface intérieure, l'absorbivité du matériel dans le spectre visible, l'émissivité du matériel du récepteur, les coefficients de transfert par convection, etc.

Ensuite on déduit les expressions du rendement d'interception (qui intervient entre le miroir et le récepteur compte tenu de la différence de diamètre entre le miroir et la cavité et aussi de l'ombrage), respectivement du rendement de concentration du miroir. Le produit de ces deux rendements représente le rendement du concentrateur et sa valeur est propre à l'ensemble solaire utilisé.

Avec les rendements ci-dessus introduits, on détermine le flux de chaleur disponible dans le moteur en fonction de l'insolation et de la surface du miroir parabolique, tel que :

$$\dot{Q}_{disp} = \eta_{rec} \eta_{conc} E A_{mir} \quad (2)$$

et le flux de chaleur nécessaire au moteur ou disponible pour absorber à une certaine valeur de la vitesse de rotation :

$$\dot{Q}_{nec,MS} = z' m R T_D \ln \varepsilon \frac{n_r}{60} \quad (3)$$

où  $z'$  est un coefficient d'ajustement de la méthode, par lequel on tient compte des pertes internes de chaleur du moteur. La corrélation de la vitesse de rotation avec les données expérimentales disponibles a conduit à une valeur du coefficient  $z'$  de 0,45 [8].

La puissance électrique fournie par le générateur électrique couplé au moteur Stirling solaire résulte :

$$P_{el} = E A_{mir} \eta_{conc} \eta_{rec} \eta_{MS} \eta_{GE} \quad (4)$$

où le produit des quatre rendements représente le rendement global du système.

Cet algorithme est complété par le schéma de calcul du rendement du moteur Stirling développé dans des travaux antérieures [5-8]. L'expression de ce rendement tient compte des irréversibilités internes et externes générées pendant le fonctionnement du moteur, notamment : les pertes de pression  $\Delta p$  dues au laminage du gaz en écoulement dans le régénérateur, la vitesse finie du piston et les frottements mécaniques internes, la régénération

imparfaite de la chaleur dans le régénérateur, le transfert de chaleur à différence finie de température au contact du gaz cyclé à la source et au puits :

$$\eta_{MS} = \eta_{CC,g} \cdot \eta_{II,irev} = \left(1 - \frac{T_C}{T_D}\right) \cdot \eta_{II,irev} \quad , \quad \eta_{II,irev} = \eta_{II,X} \cdot \eta_{II,\Delta p} \quad (3)-(4)$$

$$\eta_{II,X} = \frac{1}{1 + \frac{Xc_v}{R \ln \varepsilon} \left(1 - \frac{T_C}{T_D}\right)} \quad (5)$$

$$\eta_{II,\Delta p}^{(\alpha)} = 1 - \frac{\frac{k}{w_{S,C}} \ln \varepsilon (w_C + w_D \sqrt{\tau}) + 8 \left(\frac{w}{w_{S,D}}\right)^2 N_s + \frac{(0,94 + 0,045w) \cdot 10^5}{P_1}}{\eta_{CC} \eta_{II,X} \tau \ln \varepsilon} \quad (6)$$

Le couplage de cet ensemble avec un système de production d'hydrogène (l'électrolyseur) rend complet le modèle de la première filière visée. Par ailleurs, l'hydrogène produit peut servir comme porteur d'énergie si l'utilisateur demande seulement de l'énergie électrique. Alors, l'excès d'énergie solaire est stockée en hydrogène qui sera ensuite utilisé dans une pile à combustible pendant la nuit (ou quand le ciel est couvert).

### 3. Résultats

Les calculs pour le modèle mathématique de la première filière ont été effectués pour trois modèles différents de moteurs de Stirling en fonctionnement : McDonnell Douglas, Vanguard et SBP 17. Les valeurs des paramètres du modèle utilisées dans les calculs sont:  $E = 1000 \text{ W/m}^2$  ;  $\alpha_{cav} = 0,97$  ;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$  ;  $k = 0,6 \text{ W/(m K)}$  ;  $h_{int} = 6 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$  ;  $h_{ext} = 7 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$  ;  $\delta = 0,05 \text{ m}$  ;  $\gamma = 1,67$  (hélium). On a utilisé la technique de programmation du programme MATLAB 6.0.

Le premier objectif du calcul a été la validation du modèle par la comparaison des résultats analytiques avec ceux expérimentaux rapportés dans la littérature [9]. Les résultats présentés dans le *Tableau 1* font la preuve d'un bon rapprochement entre les prévisions du modèle (valeur calculée) et les résultats expérimentaux (valeur réel). Les *Fig. 2 et 3* illustrent graphiquement la validation des résultats du modèle, ainsi que des régimes de maximum de puissance et du rendement global. On y remarque que le point de fonctionnement est au-dessous de l'optimum par des raisons de température du matériel.

Le deuxième objectif du travail a été la comparaison des performances des deux filières. Dans ce but, pour la filière 2 on a choisi une cellule mono-Si [10], modèle I-150, code LPS00192, dont les caractéristiques sont :  $P = 150 \text{ W}$  ;  $A = 1,27 \text{ m}^2$  ;  $\eta = 12 \%$ . La *Fig. 4* montre que le rendement de la production d'hydrogène sur la filière 1 ( $\eta_{MS+GE+E} = 0,18$ ) est nettement supérieur à celui sur la filière 2 ( $\eta_{PV+E} = 0,08$ ). De ce fait, la surface des panneaux photovoltaïques doit être 2,66 fois plus grande que celle du miroir parabolique, pour fournir la même puissance électrique dans les mêmes conditions ( $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ) d'insolation (voir *Tableau 2*). Il en résulte 164 panneaux photovoltaïques du type mentionné ci-dessus par rapport à 1 miroir parabolique. D'ici apparaît l'avantage de la filière 1 par rapport au problème du terrain d'emplacement des panneaux. On note que pour le rendement de l'électrolyseur on a considéré une valeur moyenne de 0,55. La *Fig. 4* rend aussi compte du rendement total (ensemble solaire-électrolyseur-pile à combustible) sur chaque filière quand l'hydrogène produit est retourné en électricité (si nécessaire) dans une pile à combustible (PC), dont le rendement est 0,60.

Système solaire	$\eta$ récepteur		$\eta$ moteur		$\eta$ global		Puissance électrique		$\epsilon$
	réel	calculé	réel	calculé	réel	calculé	réelle	calculée	
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kW]	[kW]	
Vanguard	90	92	41	41	32.84	33.26	25	25.4	0.87
MDAC	90	92	38-42	40	30-33	32.66	25	24.93	0.87
SBP 17	80	78	42	40	26.44	24.54	50	48.74	0.87

Tableau 1. Comparaison des performances rendement – puissance électrique, réels et calculés pour trois systèmes solaires avec concentration du rayonnement et moteur Stirling

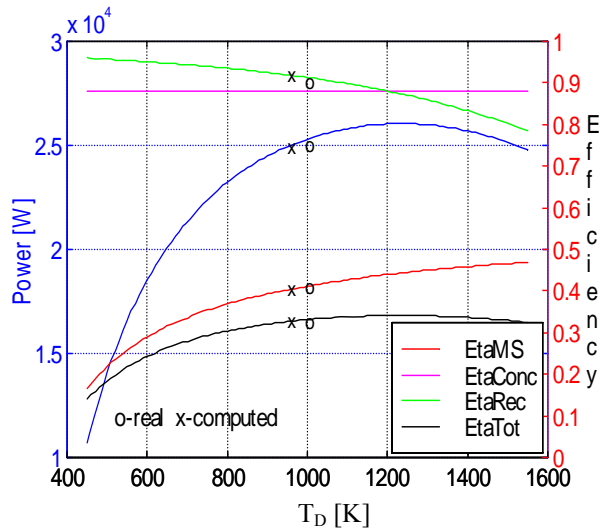


Figure 2. Les performances de l'ensemble miroir parabolique - moteur Stirling solaire – McDonnell Douglas

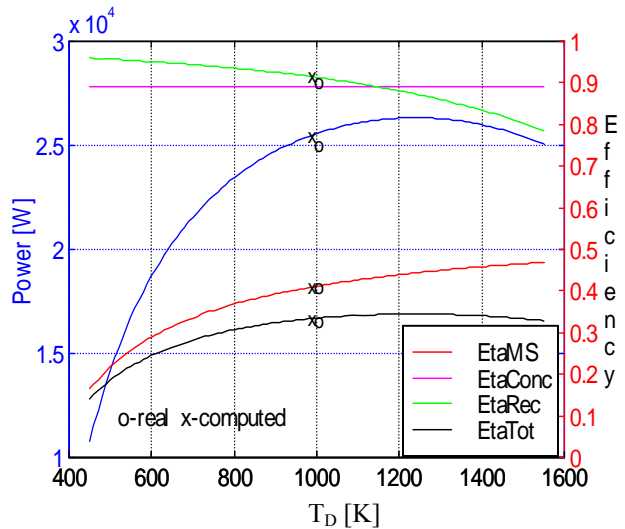


Figure 3. Les performances de l'ensemble miroir parabolique - moteur Stirling solaire – Vanguard

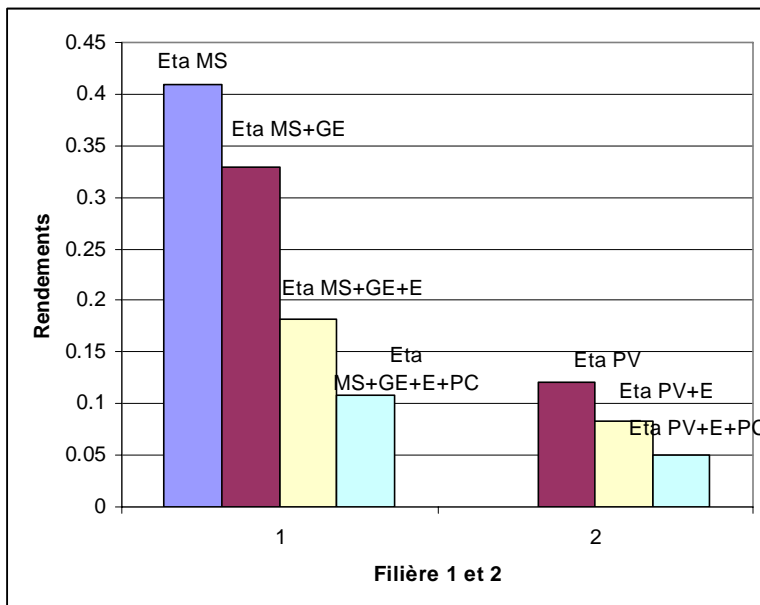


Figure 4. Comparaison des performances des deux filières

	P [kW]	A [m <sup>2</sup> ]	Unit [-]
Filière 1	25	78,125	1
Filière 2	25	208,33	164

Tableau 2. Unités nécessaires (miroir/panneau photovoltaïque) pour fournir la même puissance électrique

	CI \$/GJ	CS \$/kW	P H <sub>2</sub> \$/GJ
Filière 1	288	3800	48,94
Filière 2	242	4170	24,8

Tableau 3. Coût d'investissement (CI), spécifique (CS) et prix de l'hydrogène (P H<sub>2</sub>) [11, 12]

Les aspects relatifs au coût d'investissement, coût spécifique, prix de l'hydrogène viennent compléter l'analyse des deux filières (Tableau 3). Si le coût d'investissement est comparable pour les deux filières, celui spécifique met un léger avantage à la filière 1. Le prix actuel de l'hydrogène rend l'avantage à la filière 2, mais l'évaluation globale doit tenir compte des rendements des deux filières.

#### 4. Conclusion

Le présent travail propose un modèle mathématique d'étude et optimisation d'un ensemble solaire comportant un moteur Stirling solaire couplé à un électrolyseur. L'évaluation de ses performances a visé la puissance électrique produite par le système moteur Stirling solaire – générateur électrique et le rendement global de l'ensemble couplé à un électrolyseur. Ces performances ont été comparé à ceux des panneaux photovoltaïques.

Les résultats obtenus ont montré que la filière avec le moteur Stirling solaire est meilleure sous l'aspect rendement total de production de l'hydrogène, tandis que la filière avec les cellules photovoltaïques produit l'hydrogène à un prix inférieur. Il reste à estimer le rapport performances – prix dans la perspective de l'évolution de la technologie.

#### Références

1. A.J. Appleby, *Characteristics of Fuel Cell Systems*, Fuel Cell Systems, ed. Leo JM Blomen and Michael N. Mugerwa, Plenum Press, New York, (1993), 157-199.
2. D. Fisher (ed), *Options for Reducing Greenhouse Gas Emissions*, The Stockholm Environment Institute, (1990).
3. M. Miyake et al., *J. Marine Biotech.*, No. 4, (1996), 61-63.
4. G. Glanzmaier, D. Blake, S. Showalter, Assessment of Methods for Hydrogen Production Using Concentrated Solar Energy, *National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-570-23629*, (1998).
5. S. Petrescu, J. Zaiser, C. Harman, V. Petrescu, M. Costea, T. Florea, C. Petre, T.V. Florea, E. Florea, *Advanced Energy Conversion – II*, Bucknell University, Lewisburg, PA 17837, USA, (2006).
6. S. Petrescu, M. Costea, C. Harman, T. Florea, Application of the Direct Method to Irreversible Stirling Cycles with Finite Speed, *International Journal of Energy Research*, Vol. 26, (2002), 589-609.
7. Petrescu, S., Harman, C., Costea, M., Popescu, G., Petre, C., Florea, T., "Analysis and Optimization of Solar-Dish/Stirling Engines", *31-st ASES Annual Conference, SOLAR 2002, "Sunrise on the Reliable Energy Economy"*, Reno, Nevada, USA, (2002).
8. Petrescu, S., Harman, C., Costea, M., Florea T, Petre C., Feidt, M., "A scheme of computation, analysis, design and optimization of solar Stirling engines", *Proc. of 16<sup>th</sup> Int. Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy systems, ECOS'2003*, N. Houbak, B. Elmegaard, B. Qvale, M. Moran, eds., Copenhagen, Denmark, Vol. III, (2003), 1255-1262.
9. W.B. Stine and R.B. Diver, *A Compendium of Solar Dish / Stirling Technology*, Sandia Laboratories Report, Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550 for the United States Department of Energy, (1994).
10. M. Thomas, H. Post, R. DeBlasio, Photovoltaic Systems: An End-of-Millennium Review, *Progress in Photovoltaics: Research and Application*, No. 7, (1999), 1-19.
11. C.J. Winter, R.L. Sizmann, L.L. Vant-Hull, *Solar Power Plants – Fundamentals, Technology, Systems, Economics*, Springer-Verlag, Heidelberg (1991).
12. C.E.G. Padro and V. Putsche, Survey of the Economics of Hydrogen Technologies, *National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-570-27079*, (1999).