

Microcentrale solaire à moteur de Stirling et miroir de Fresnel, stockage thermique en huile et électrochimique en hydrogène

Monica COSTEA^{1*}, Stoian PETRESCU¹, Michel FEIDT², Iosif DURA¹, Nicolae BORIARU¹

¹Département de Thermodynamique, Moteurs, Equipements Thermiques et Frigorifiques, UP Bucarest Splaiul Independentei 313, 060042 Bucarest, Roumanie

²Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée
2, avenue de la Forêt de Haye – 54516 Vandœuvre les Cedex

* (auteur correspondant : liana5802@yahoo.fr)

Résumé - L'étude vise à la faisabilité d'une microcentrale solaire à moteur de Stirling et miroirs de Fresnel avec un concept original de positionnement assurant une position stationnaire du moteur. Le stockage thermique est prévu en huile végétale qui devient très convenable due à l'implantation des échangeurs de chaleur au sol, complété par un stockage en hydrogène produit par électrolyse et stocké en réservoirs sous pression. Les performances de la microcentrale opérant en cogénération sont pré-évaluées, ainsi que la surface nécessaire de captage du miroir Fresnel pour différents types d'utilisateurs.

Nomenclature

b	distance entre les fils du régénérateur, m
c	chaleur spécifique du gaz, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
d	épaisseur des fils du régénérateur, m
D	diamètre, m
m	masse, kg
n_r	vitesse de rotation, $rot.min^{-1}$
p	pression, Pa
\dot{Q}	flux de chaleur, W
Pr	nombre de Prandtl
R	constante spécifique du gaz, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
S	courses du piston, m
T	température, K
X	coefficient de pertes régénératives
\dot{W}	puissance mécanique, W
w	vitesse moyenne du piston, $m.s^{-1}$

Symboles grecs

ε_v	rapport volumétrique de compression
γ	rapport des chaleurs spécifique du gaz
η	rendement
ν	viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$
τ	rapport de températures

Indices et exposants

CC	relatif au cycle de Carnot
int	interception
H,g	relatif au gaz à la source
L,g	relatif au gaz au puits
R	régénérateur
SE	moteur de Stirling
S,L	relatif au son à la température du puits
II	relatif au second principe

1. Introduction

Le présent travail met en commun les avantages de l'énergie solaire, qui est une source d'énergie propre et inépuisable et de la cogénération, qui assure une efficacité supérieure à l'usage de la source primaire, ainsi qu'une meilleure protection de l'environnement, en intégrant aussi ceux du moteur de Stirling.

L'utilisation de l'énergie solaire concentrée devient de plus en plus commerciale. Des améliorations ont été apportées dans la conception et les matériaux du réflecteur et du collecteur, l'absorption de la chaleur et le transport, la production d'électricité et le stockage thermique [1, 2]. De nombreuses études ont été dédiées à l'innovation dans l'énergie solaire concentrée [3] ou au fonctionnement optimal des centrales solaires à concentration [4, 5].

L'application de la technologie de cogénération aux résidences et bâtiments commerciaux à petite échelle est une option attirante en raison du grand potentiel du marché. Par ailleurs, la micro-cogénération suppose une unité individuelle de production d'électricité et de chaleur dans chaque maison. Une vue d'ensemble des technologies actuelles de cogénération à partir de sources d'énergie renouvelables met à disposition des études de nouvelles méthodes, des analyses théoriques et expérimentales, la modélisation et la simulation et le débat sur des aspects environnementaux et économiques [6].

Basé sur l'approche de la thermodynamique à vitesse finie et la Méthode Directe [7], un schéma de calcul des performances (rendement ou COP et puissance) des machines de Stirling (moteur, réfrigérateur, pompe à chaleur) a été élaboré et validé par comparaison avec des données expérimentales disponibles pour 12 types de moteur classiques et 16 régimes de fonctionnement [8], ainsi que pour 3 moteurs de Stirling solaires les plus performants [8-11]. Ce schéma de calcul a constitué ultérieurement le noyau de la conception de systèmes complexes [12-14] utilisant l'énergie solaire, ainsi que la cogénération et le stockage thermique sous forme liquide (eau, huile, sels et métaux fondus) et/ou en hydrogène produit par électrolyse [9, 14].

Ces résultats nous permettent de proposer ici une méthodologie pour estimer les performances globales et le pré-dimensionnement d'un système de cogénération à moteur de Stirling solaire et stockage d'énergie en huile et hydrogène, en utilisant des miroirs avec focalisation linéaire de type cylindro-paraboliques ou des miroirs Fresnel. Il s'agit de l'élaboration d'un schéma de projet, préliminaire à l'évaluation des performances en termes de rendement, puissance et flux de chaleur fourni, temps de stockage, surface de captage, etc.

2. Expérience acquise – base de départ

Les recherches dans le département de génie thermique de l'UPB ont menées à la construction d'un miroir cylindro-parabolique de 4m d'ouverture et 25m de long (Figure 1) vers la fin des années '80. Il a servi au séchage des préfabriqués en béton et ensuite à la fabrication solaire de glace dans une ferme près de Bucarest. Par ailleurs, ce type de miroir a été utilisé par l'entreprise Lutz [15] dans les centrales solaires mises en fonction aux Etats-Unis dans la période 1985-1990, et continue à se développer actuellement par plusieurs projets financés et poursuivis par le Département de l'Energie (DOE) des E-U [16].



Contrairement aux centrales mentionnées ci-dessus, le récepteur de rayonnement solaire concentré du miroir que nous proposons est différent. Ce type de récepteur est très bien adapté au stockage en huile et aussi aux miroirs de Fresnel linéaires. En plus, ses performances antérieurement obtenues (vapeur à 200°C) peuvent être améliorées par les technologies actuelles (tube sous vide) pour atteindre des températures de stockage de l'huile d'environ 300°C.

Figure 1 : Miroir cylindro-parabolique réalisé à l'UPB

Celle-ci sera la température haute du moteur de Stirling solaire et aussi dans le système de stockage conçus pour fonctionner entre deux réservoirs, solution similaire à celle de la première centrale américaine Solar I [15]. Fabriqué en série et comme unité « indépendante », de tels modules de 100m², soit (4mx25m) ou (5mx20m), pourraient atteindre des coûts acceptables et devenir compétitifs avec d'autres systèmes pour l'utilisation dans des microcentrales solaires à cogénération. Le couplage de plusieurs modules permettra de couvrir les besoins énergétiques

des maisons isolées (5 kW) ou des immeubles (10 appartements, soit 30 kW). L'emplacement des modules se ferait dans les cours des maisons ou sur le toit de l'immeuble, donc sans désaffectation supplémentaire de terrain.

Aussi, ces modules cylindro-paraboliques peuvent être remplacés par des modules Fresnel linéaires en préservant le concept de récepteur du rayonnement solaire concentré comme dans la Figure 1. Par ailleurs, les miroirs linéaires Fresnel ont tendance à remplacer actuellement les miroirs cylindro-paraboliques des centrales solaires construites par l'entreprise Lutz [15] dans les années 1980-1990, à cause du prix inférieur de fabrication.

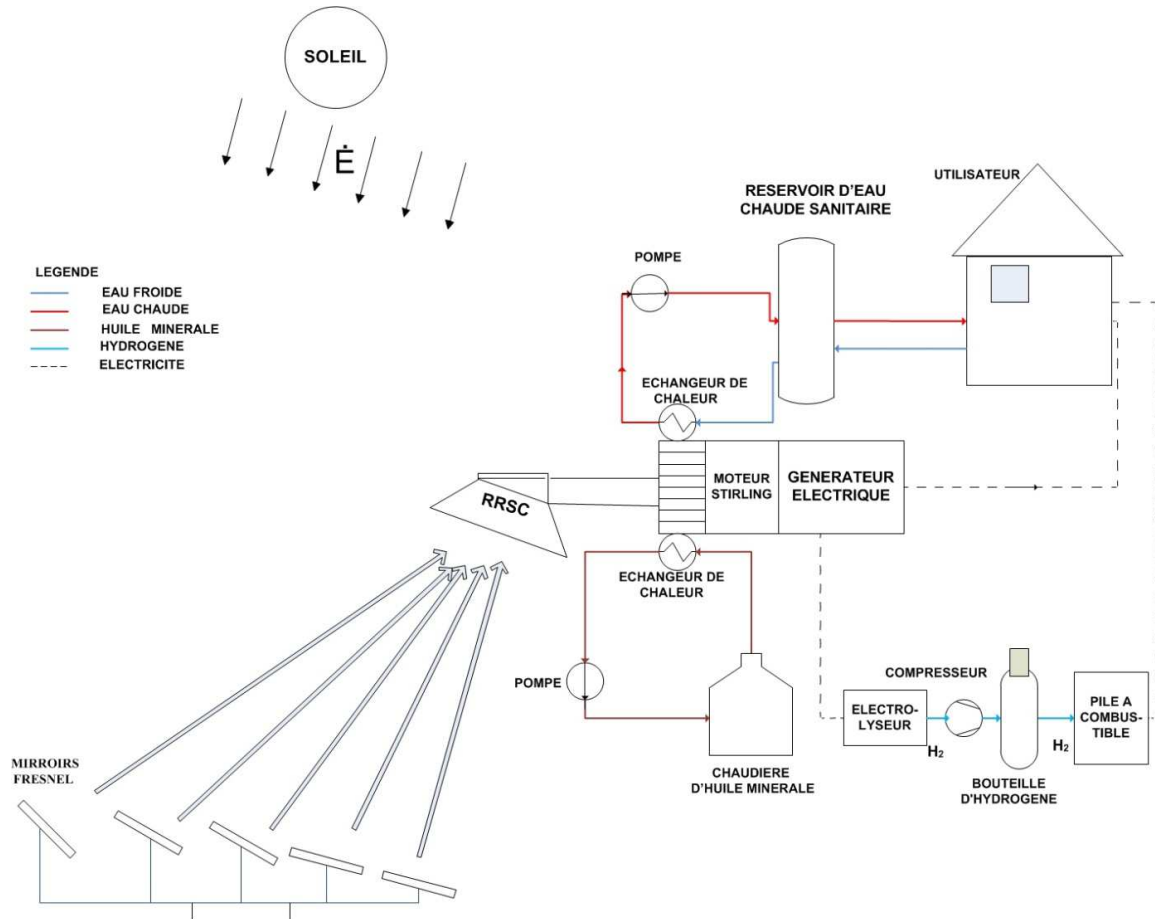


Figure 2 : Schéma de la microcentrale solaire à moteur de Stirling et stockage en huile et hydrogène

Le calcul d'avant-projet d'une telle microcentrale Stirling solaire (Figure 2) sera basé sur le schéma de calcul présentés et développés successivement [7], dont nous présentons le résumé dans la section 3.

3. Les calculs de performances du moteur de Stirling basés sur la Méthode Directe

Le rendement thermique du moteur Stirling est exprimé comme un produit du rendement du cycle de Carnot et un rendement relatif au second principe de la thermodynamique [7-9, 15, 17], comme cela a été suggéré par Bejan [18]:

$$\eta_{SE} = \eta_{CC,g} \cdot \eta_{II,irrev} = \left(1 - \frac{T_{L,g}}{T_{H,g}}\right) \cdot \eta_{II,irrev} \quad (1)$$

où le rendement relatif au second principe est exprimé sous la forme [19]:

$$\eta_{II,irrev} = \eta_{II,X} \cdot \eta_{II,\Delta p} \quad (2)$$

Les pertes prises en compte dans l'expression ci-dessus sont celles dues à la régénération incomplète de la chaleur dans le régénérateur et les pertes de pression, respectivement.

La régénération incomplète représente une perte importante dans les moteurs de Stirling, celle-ci étant exprimée par un coefficient de pertes régénératives, X. L'analyse quantitative de ces pertes a conduit à l'expression [7-9, 15,17, 20] :

$$\eta_{II,X} = \frac{1}{1 + \frac{X \cdot c_v}{R \ln \varepsilon_v} \left(1 - \frac{T_{L,g}}{T_{H,g}} \right)} \quad (3)$$

avec

$$X = X_1 \cdot y + X_2 \cdot (1 - y) \quad (4)$$

où y est le coefficient d'ajustement du modèle. La valeur de y est déterminé à partir de données expérimentales de 4 moteurs de Stirling solaire [21]. La valeur $y = 0,27$ a fourni la meilleure concordance entre les résultats analytiques et expérimentaux, ce qui a conduit à l'utilisation de cette valeur comme coefficient d'ajustement dans l'analyse théorique. Les termes qui interviennent dans la relation ci-dessus sont exprimés comme [7-9, 15, 17]:

$$X_1 = \frac{1 + 2M + e^{-B}}{2(1 + M)} \quad X_2 = \frac{M + e^{-B}}{1 + M} \quad (5)-(6)$$

$$M = \frac{m_g c_{v,g}}{m_R c_R} \quad B = (1 + M) \frac{h A_R}{m_g c_{v,g}} \cdot \frac{S}{w} \quad (7)-(8)$$

où le coefficient de transfert thermique par convection est représenté par l'expression :

$$h = \frac{0.395(4p_m / RT_L) w^{0.424} c_P(T_m) \cdot \nu(T_m)^{0.576}}{(1 + \tau) \left[1 - \frac{\pi}{4[(b/d) + 1]} \right] D_R^{0.576} \cdot \text{Pr}^{2/3}} \quad (9)$$

L'expression du rendement relatif au second principe de la thermodynamique qui tient compte des pertes de pression est [7-9, 15, 17] :

$$\eta_{II,\Delta p} = 1 - \frac{\frac{w}{w_{S,L}} \gamma (1 + \tau^{1/2}) \ln \varepsilon_v + 5 \left(\frac{w}{w_{S,L}} \right)^2 N_S}{\tau \cdot \eta_{CC} \cdot \eta_{II,X} \ln \varepsilon_v} - \frac{3(0.94 + 0.045 w) 10^5}{4 p_1 \tau \cdot \eta_{CC} \cdot \eta_{II,X} \ln \varepsilon_v} \quad (10)$$

où la célérité du son est donnée par :

$$w_{S,L} = \sqrt{\gamma R T_{S,L}} \quad (11)$$

et la pression dans l'état 1 est exprimée en fonction de la pression moyenne du gaz, p_m :

$$p_1 = \frac{4 p_m}{(\varepsilon_v + 1)(\tau + 1)} \quad (12)$$

où

$$\tau = \frac{T_{H,g}}{T_{L,g}} \quad \varepsilon_v = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (13)-(14)$$

En exprimant tous ces paramètres en fonction de la vitesse moyenne du piston w , on introduit en fait la vitesse de rotation n_r [rpm] :

$$w = 2 \cdot S \cdot n_r / 60 \quad (15)$$

L'analyse ci-dessus montre que les pertes de charge et leur effet sur le rendement et la puissance fournie par le moteur dépendent de la vitesse moyenne du piston et donc de la vitesse de rotation du moteur, n_r .

Ce modèle a été utilisé pour l'optimisation d'un module solaire et a été validé à l'aide des données expérimentales [21] pour 4 moteurs solaires [10, 11] (voir aussi la figure 3 et tableau 1). Ensuite, il a été complété par des calculs de l'électrolyseur et la pile à combustible pour le schéma SEHE [9].

En utilisant ce schéma de calcul, on estimera l'efficacité du moteur Stirling solaire fonctionnant avec de l'huile chaude entre 300°C et 65°C.

4. Estimation du rendement de la microcentrale à moteur de Stirling solaire avec cogénération et stockage thermique dans l'huile

Basé sur la validation des calculs des performances des plusieurs Moteurs de Stirling [8], on peut estimer actuellement combien serait le rendement du moteur, avant d'entrer dans le calcul détaillé ci-dessus. Une comparaison entre cette estimation et le calcul détaillé pourrait fournir une méthode rapide pour l'estimation de préconception des performances de n'importe quel moteur de Stirling solaire et ensuite du système dont il fait partie. Cette estimation est basée sur les données du Tableau 1 [7, 8] qui permet de déduire une valeur moyennée du rendement relatif au second principe de la thermodynamique.

Moteurs de Stirling	Rendement réel	Rendement calculé	T_L/T_H	Rendement de Carnot	Rendement relatif au second principe	
	%	%		%	réel	calculé
NS-03, régime 1	35,9	33,92	-	-	-	-
NS-03, régime 2	31,0	32,97	-	-	-	-
NS-03T, régime 1	32,6	31,9	-	-	-	-
NS-03T, régime 2	30,3	30,9	-	-	-	-
NS-30A, régime 1	37,5	35,7	333/956 = 0,348	65,2	57,5	54,8
NS-30A, régime 2	33,0	33,6	-	-	-	-
NS-30S, régime 1	37,2	36,6	-	-	-	-
NS-30S, régime 2	35,2	35,26	-	-	-	-
STM4-120	40,0	40,1	343/993 = 0,345	65,5	61,1	61,2
V-160	30,0	30,8	333/903 = 0,369	63,1	47,5	48,8
4-95 MKII	29,4	28,9	323/993 = 0,325	67,5	43,6	42,8
GPU-3	12,7	12,6	288/977 = 0,295	70,5	18,0	17,9
MP1002 CA	15,6	15,3	333/873 = 0,381	61,9	25,2	24,5
4-275	42,0	41,19	338/893 = 0,378	62,2	67,5	66,2
piston libre (9 kW)	33,0	33,1	333/902 = 0,369	63,1	52,3	52,5
RE-1000	25,8	22,85	313/798 = 0,392	60,8	42,4	37,6

Tableau 1 : Comparaison des rendements au sens du premier principe et relatif au second principe de la thermodynamique des moteurs de Stirling, réels et calculés : régime 1- économique, régime 2 - puissance maximale

En éliminant les moteurs Stirling avec des performances relativement faibles (GPU-3, MP1002 CA et RE-1000), on obtient une estimation raisonnable pour les moteurs Stirling modernes au niveau de $\eta_{II,moy,r\acute{e}el} = 0,549$ vis à vis de $\eta_{II,moy,calc} = 0,552$. Ensuite, la valeur calculée peut conduire à la séparation des pertes (voir eq. (2)), notamment à l'estimation du rendement relatif au second principe du aux pertes de pression, laminage et frottement, $\eta_{II,\Delta p,moy} = 0,69$ si on prend une valeur moyenne de celui responsable de la régénération incomplète de $\eta_{II,x,moy} = 0,80$.

Le rendement global du moteur Stirling fonctionnant avec une huile thermique entre 300°C et 65°C (fig. 3) en résulte conformément à l'eq. (1) :

$$\eta_{SE} = \left(1 - \frac{T_{L,g}}{T_{H,g}}\right) \cdot \eta_{II,moy,calc} = \left(1 - \frac{338}{573}\right) \cdot 0,552 = 0,41 \cdot 0,552 = 0,226 \quad (16)$$

En dépit de cette valeur qui semble «assez faible» par rapport aux valeurs du Tableau 1 correspondants aux moteurs les plus performants (sur lesquels la validation de notre méthode a été faite [8]), on remarque que l'approche des moteurs Stirling solaire avec cogénération est différente par rapport à celle des moteurs Stirling solaire à miroir parabolique. Pour les centrales opérationnelle (au sud de la Californie, Etats-Unis) ayant des milliers de modules identiques de 25 kW chacun, mais sans cogénération, l'objectif était d'optimiser le rendement total de la production d'électricité, donc d'élever autant que possible la température haute du cycle (800-900°C), de sorte que les modules Mc Donald Douglas et Vanguard [21] ont eu des valeurs du rendement total (maximum) de 30%, pour un rendement du moteur de Stirling maximum voisin de 40%. Il en résulte le rendement du récepteur solaire comme :

$$\eta_{Rec} = \frac{\eta_{tot}}{\eta_{SE}} = \frac{30}{40} = 0,75 \quad (17)$$

On pourrait compter sur une telle valeur du rendement pour le schéma proposé, mais on ne vise pas un rendement si élevé du moteur de Stirling, car ici l'objectif est d'optimiser le rendement total de l'ensemble avec cogénération, donc de considérer aussi la récupération de chaleur à l'extérieur du moteur à 65°C. Il résulte alors le rendement total de la microcentrale come suit:

$$\eta_{tot,cogen} = \frac{\dot{W}_{SE} + \dot{Q}_{cogen}}{\dot{Q}_{mir}} = \eta_{tot,SE} + \eta_{cogen} \quad (18)$$

$$\eta_{tot,SE} = \eta_{Rec} \cdot \eta_{SE} \quad ; \quad \dot{Q}_{cogen} = (\dot{Q}_{mir} - \dot{W}_{SE}) \cdot \eta_{p,cogen} \quad ; \quad \dot{Q}_{mir} = E \cdot A \cdot \eta_{Rec} \cdot \eta_{int} \quad (19)-(21)$$

Compte tenu des estimations précédentes, un exemple de calcul pour $A = 100m^2$, $E = 800W/m^2$, $\eta_{Rec} = 0,8$, $\eta_{int} = 0,9$, $\eta_{p,cogen} = 0,8$ fournit : $\dot{Q}_{mir} = 71$ kW, $\dot{Q}_{cogen} = 47$ kW, $\eta_{tot,SE} = 16,95\%$ et $\eta_{tot,cogen} = 83\%$.

Cette valeur du rendement est comparable avec les performances courantes des centrales à cogénération, mais bien supérieure à celle des modules (environ 30%) actuellement utilisés. Même si on aimerait concevoir et construire un module miroir parabolique – moteur de Stirling solaire à cogénération, il serait très compliqué (ce qui signifie également très cher), à cause des échangeurs de chaleur qui devraient être montés solidaires avec le moteur de Stirling et le générateur électrique, ce qui deviendrait très lourd et difficile à exploiter.

La nouveauté et l'avantage majeur du schéma proposé ici consiste dans le fait que le moteur de Stirling est stationnaire au sol, ainsi que tous les composants des circuits de stockage/cogénération, ce qui rend facile et sans doute plus économique l'utilisation d'une microcentrale solaire pour des villas, appartements ou immeubles.

5. Estimation de la corrélation puissance fournie - surface des miroirs

Le projet de la microcentrale dépend de la contrainte qui est prioritaire. Ainsi, on peut imposer la puissance électrique à fournir au consommateur et déterminer la surface nécessaire des miroirs, ou on peut supposer que la surface des miroirs est fixée par des raisons de terrain disponible et calculer la puissance électrique fournie, la chaleur assurée en cogénération et la chaleur stockée dans l'huile, respectivement la durée de fonctionnement de la microcentrale pendant la nuit.

Le choix de la deuxième voie permettra de continuer les estimations par le rendement total électrique et la puissance électrique fournie, qui est donnée par qui s'exprime:

$$\eta_{tot,el} = \eta_{tot,SE} \cdot \eta_{EG} \quad ; \quad P = \eta_{tot,el} \cdot \dot{Q}_{mir} \quad (22)-(23)$$

En exemple numérique, partant de $\eta_{tot,SE}$ et \dot{Q}_{mir} précédemment estimés et prenant $\eta_{EG} = 95\%$, il en résulte $\eta_{tot,SE} = 16,1\%$ et $P = 11,43 \text{ kW}$.

C'est un résultat très encourageant, mais basé sur une densité de flux rayonnant de $0,8 \text{ kW/m}^2$. Compte tenu de sa variation journalière, une insolation moyenne sur l'intervalle horaire de 9 heures du matin à 16h de l'après-midi d'environ $0,4 \text{ kW}$ est considérée plus réaliste, ce qui conduit à la moitié de la puissance antérieurement calculée, donc $5,7 \text{ kW}$. Une telle puissance électrique pourrait être suffisante pour une villa ou deux appartements.

Ensuite, pour fournir la même puissance pendant la nuit, le stockage thermique aurait besoin d'une surface de captage identique, soit d'un module supplémentaire de 100m^2 , qui servirait à stocker dans l'huile la chaleur équivalente du fonctionnement du moteur pendant la journée. Ce stock thermique sera utilisé dans le moteur pendant la nuit. Cela complique le schéma par le besoin d'un récepteur spécialement conçu pour fonctionner avec de l'huile, mais rend l'indépendance énergétique à l'utilisateur.

Le débit moyen de l'eau chaude sanitaire est estimé pour une différence de température de 10 degrés allée-retour au niveau de $2,35 \text{ kg/s}$, pour une période de 6 heures pendant la journée et 4 heures pendant la nuit (en provenance du stockage en huile).

Du côté hydrogène, on estime que la moitié de la puissance électrique maximale fournie pendant 6 heures de plein soleil est utilisable pour la production d'hydrogène. Il en résulte alors le retour en électricité d'environ 3 heures si on considère un rendement de 0,7 pour l'électrolyseur et aussi pour la pile à combustible ($6\text{h} \cdot 0,7 \cdot 0,7 \approx 3\text{h}$), qui se rajoute à celui de 2 heures ($4\text{h} \cdot 0,7 \cdot 0,7 \approx 2\text{h}$) obtenu du stockage en huile.

6. Conclusion

Le travail présente une étude de pré-évaluation des performances d'une microcentrale solaire à moteur de Stirling et miroirs de Fresnel, avec stockage thermique et électrochimique.

Sur la base du calcul d'avant-projet, on peut conclure que la surface nécessaire pour fournir le besoin énergétique d'environ 3 kW dans la journée et aussi pendant la nuit est celle d'un module de 100m^2 , similaire à celui de la figure 1, tandis qu'une villa nécessitera deux modules.

Dans le même temps, la cogénération fournira un débit moyen d'eau chaude sanitaire de $2,35 \text{ kg/s}$ à environ 55° C pour 6 heures pendant la journée et 4 heures pendant la nuit, tandis que le stockage en hydrogène et huile pourront assurer le fonctionnement du moteur pour 5 heures pendant la nuit.

Références

- [1] B. Hoffschmidt, S. Alexopoulos, C. Rau, J. Sattler, A. Anthrakidis, C. Boura, B. 'Connor, P. Hilger, 3.18 – Concentrating Solar Power, *Comprehensive renewable energy*, 3 (2012), 595-636.
- [2] M. Feidt, M. Costea, C. Petre, R. Boussehain, *Génie énergétique appliqué au solaire. Energie solaire thermique*, Printech, Bucarest (2004).
- [3] D. Barlev, R. Vidu, P. Stroeve, Innovation in concentrated solar power, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95-10 (2011), 2703-2725.
- [4] A. Ghobeity, A. Mitsos, Optimal operation of a concentrated solar thermal cogeneration plant, *Computer Aided Chemical Engineering*, 29 (2011), 1974-1978.
- [5] A. Mathieu, Contribution à la conception et à l'optimisation thermodynamique d'une microcentrale solaire thermo-électrique, (Directeur : M. Feidt), *Thèse UL Nancy*, 2012.
- [6] N. Thilak Raj, S. Iniyar, R. Goic, A review of renewable energy based cogeneration technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15-8 (2011), 3640-3648.
- [7] S. Petrescu, M. Costea, *Development of Thermodynamics with Finite Speed and Direct Method*, AGIR Press, Bucarest (2012).
- [8] 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*, 26 (2002), 589-609.
- [9] S. Petrescu, C. Petre, M. Costea, O. Malancioiu, N. Boriaru, A. Dobrovicescu, M. Feidt, A Methodology of computation, design and optimization of solar Stirling power plant using hydrogen/oxygen fuel cells, *Energy*, 35-2 (2010), 729-739.
- [10] S. Petrescu, C. Harman, M. Costea, T. Florea, C. Petre, M. Feidt, A scheme of computation, analysis, design and optimization of solar Stirling engines, *Proc. 16th Int. Conf. ECOS'2003* (Copenhagen, Denmark, July 2003), Vol. III, 1255-1262.
- [11] C. Dobre, Contributions au développement des méthodes de la Thermodynamique Irréversible appliquées à l'étude analytique et expérimentale des machines de Stirling et quasi-Carnot, (LR), *Thèse U Paris X et UP Bucarest*, (Directeurs : S. Petrescu, P. Rochelle, L. Grosu), 2012.
- [12] G. Tirca-Dragomirescu, Optimisation exergoéconomique des systèmes de trigénération d'énergie (LR), *Thèse UL Nancy et UP Bucarest*, (Directeurs: A. Dobrovicescu, M. Feidt), 2012.
- [13] S. Petrescu, G. Tirca-Dragomirescu, M. Feidt, A. Dobrovicescu, M. Costea, C. Petre, C. Dobre, Combined Heat and Power Solar Stirling Engine, *Proc. 24th Int. Conf. ECOS'10* (Lausanne, 2010).
- [14] S. Petrescu, M. Costea, V. Maris, Comparison between Thermal Machines and Fuel Cell Treatment in the Framework of TFS, *Revue Termotehnica*, AGIR, An XV-1 (2011), 12-23, 2011.
- [15] S. Petrescu, J. Zaiser, C. Harman, M. Costea, C. Petre, T. Florea, *Advanced Energy Conversion*, Vol. I et II, Bucknell University, Lewisburg, PA 17837, USA (2006).
- [16] <http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/csp.html>.
- [17] T. Florea, Grapho-analytical method for the study of the operating processes irreversibility in Stirling Engines (LR), *Thèse UP Bucarest*, (Directeur : S. Petrescu) 1999.
- [18] A. Bejan, *Advanced Engineering Thermodynamics*, Wiley, New York (1988).
- [19] S. Petrescu, *Lectures on New Sources of Energy*, Helsinki University of Technology, Otaniemi (1991).
- [20] M. Feidt, *Optimisation des systèmes et procédés*, 2nd édition, Tech&Doc, Paris (1996).
- [21] W.B. Stine, R.B. Diver, A Compendium of Solar Dish / Stirling Technology, *Sandia Laboratory Report*, 1994.

Remerciements

Le travail a été financé par le Programme sectoriel de développement opérationnel des ressources humaines 2007-2013 du Ministère Roumain du travail, famille et protection sociales dans le cadre de l'Accord financier POSDRU/107/1.5/S/76903.