

CONVERSION THERMODYNAMIQUE DE L'ENERGIE SOLAIRE DANS DES INSTALLATIONS DE FAIBLE OU DE MOYENNE PUISSANCE : REFLEXIONS SUR LE CHOIX DU MEILLEUR DEGRE DE CONCENTRATION

S. Bonnet, M. Alaphilippe, P. Stouffs
Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés, LaTEP, EA 1932,
Université de Pau et des Pays de l'Adour, IUT des Pays de l'Adour,
Département Génie Thermique & Energie, Avenue de l'Université,
F- 64000 Pau, France
Email : pascal.stouffs@univ-pau.fr Fax : + 33 (0)5 59 92 33 82

RESUME

Nous présentons d'abord un rappel sommaire de l'état de l'art des systèmes de faible ou moyenne puissance de conversion par voie thermodynamique de l'énergie solaire en énergie électrique. Les systèmes actuels sont essentiellement basés sur la technologie dite 'solar dish/Stirling', qui utilise des moteurs Stirling à haute température et requiert donc une forte concentration de l'énergie solaire. Ces systèmes font appel à une technologie avancée et lourde, donc coûteuse. A l'autre extrême, il est possible de produire de l'énergie mécanique par des moteurs thermiques à très basse température, utilisant le rayonnement solaire non concentré. Nous montrons, à l'aide d'un petit modèle simple, que, du fait de la détérioration du rendement du capteur solaire avec la température, les systèmes à très forte concentration présentent, du point de vue énergétique, un intérêt limité. Un exemple de système sans concentration montre que ces derniers sont économiquement peu viables. La meilleure voie semble donc être celle des systèmes à concentration moyenne, conduisant à des niveaux de température de l'ordre de 250°C ... 450°C. Il serait nécessaire de procéder à des études exergo-économiques complémentaires plus détaillées pour affiner cette assertion en fonction des applications visées.

Mots clés : énergie solaire thermodynamique, concentration, Stirling, Ericsson.

NOMENCLATURE

Lettres latines

I_s	ensoleillement, [W.m ⁻²]
K	coefficient de transfert, [W.m ⁻² .K ⁻¹]
\dot{Q}	puissance thermique, [W]
S	surface, [m ²]
T	température, [K]
\dot{W}	puissance mécanique, [W]

Lettres grecques

α	concentration géom., rapport de surface, [-]
ε	émissivité, [-]
η	rendement, [-]
ϑ	température adimensionnelle, [-]
κ	coefficient adimensionnel de transfert, [-]
ρ	coefficient adim. de rayonnement, [-]
σ	constante de Stefan-Boltzmann, [W.m ⁻² .K ⁻⁴]

Indices

c	concentrateur
capt	capteur (concentrateur + cavité récep.)
Carnot	Carnot
glob	global (puiss. soleil → puiss. indiquée)
ind	(puissance) indiquée
x	échangeur de chaleur du moteur
r	cavité réceptrice
s	soleil
0	ambiance
II	second principe

1. INTRODUCTION

La conversion d'énergie solaire en électricité est un enjeu énergétique majeur. Différents pays européens rétribuent de façon préférentielle l'électricité d'origine solaire. Dans les pays en voie de développement, s'affranchir de la dépendance pétrolière pour produire localement de l'électricité d'origine solaire est une

nécessité vitale. Il existe donc un besoin important de systèmes de petite ou moyenne puissance, bon marché, simples et fiables et ne nécessitant pas de moyens lourds.

Deux filières possibles existent pour réaliser la conversion d'énergie solaire en électricité : le recours à des cellules photovoltaïques, ou la conversion thermodynamique. La première solution est assez chère, pour un rendement limité. En outre, la technologie de fabrication des cellules est délicate et reste l'apanage de grands groupes : elle peut difficilement être appropriée localement.

Dans cette communication, nous nous intéressons donc exclusivement à la filière thermodynamique de conversion, basée sur une installation thermique motrice à apport de chaleur externe. Les niveaux de puissance visés ici vont de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts.

2. MACHINES MOTRICES DISPONIBLES

Une classification simplifiée des machines motrices a été proposée précédemment [1]. Cette classification peut nous aider à identifier les différents types de moteur à apport de chaleur externe susceptibles de répondre à notre besoin de conversion d'énergie solaire à faible ou moyenne puissance.

Un des premiers critères de cette classification concerne le type de machines de compression et de détente utilisées dans l'installation thermique motrice. On connaît essentiellement trois familles de machines de compression et de détente : les machines dynamiques (turbomachines), les machines volumétriques rotatives, et les machines volumétriques alternatives. Les premières sont naturellement réservées aux grands débits, donc aux grandes puissances. En effet, du fait de leur principe même de fonctionnement, le rendement des turbomachines s'effondre lorsque la taille de ces machines diminue. Les installations faisant appel aux turbomachines ne conviennent donc pas pour notre application. Les machines volumétriques rotatives sont assez délicates à usiner et n'ont pas encore fait leurs preuves en ce qui concerne leur fonctionnement en machine de détente. Nous ne les retiendrons donc pas non plus, pour ne garder que les moteurs basés sur des machines alternatives, soit des systèmes pistons-cylindres.

Un autre critère de classification important concerne la présence ou non de clapets ou de soupapes pour isoler les cylindres pendant les phases de compression et de détente. Ce critère permet de distinguer la famille des moteurs STIRLING (sans soupapes ni clapets) des moteurs ERICSSON (avec soupapes et/ou clapets). Ces derniers, moins connus, présentent cependant différents avantages sur les moteurs STIRLING, en particulier pour les applications à moyenne ou basse température [2]. Dans le cas des moteurs STIRLING, le concepteur est confronté à un difficile compromis entre les surfaces d'échanges des échangeurs, qu'il s'agit de maximiser, et le volume de ces mêmes échangeurs, qu'il faut minimiser, car l'augmentation des volumes morts du moteur en réduit les performances. Un avantage majeur des moteurs ERICSSON est que, contrairement aux moteurs STIRLING, les échangeurs de chaleur ne doivent plus être considérés comme des volumes morts. L'augmentation de leur taille n'est donc pas préjudiciable : ceci peut être un atout dans le cas de la conversion d'énergie solaire faiblement ou moyennement concentrée, en particulier lorsque la concentration n'est pas ponctuelle (concentrateur cylindro-parabolique, par exemple).

Enfin, un troisième critère important concerne la présence ou non de changements de phase du fluide de travail au cours du cycle thermodynamique. Les seuls moteurs STIRLING ou ERICSSON réalisés jusqu'ici ont toujours fonctionné avec un fluide monophasique gazeux. On peut cependant légitimement s'interroger sur l'intérêt et la faisabilité de machines STIRLING ou ERICSSON à fluide condensable.

3. ETAT DE L'ART

Les installations de conversion thermodynamique d'énergie solaire de basse ou moyenne puissance réalisées jusqu'ici sont pratiquement toutes basées sur l'utilisation de moteurs STIRLING à très haute température, donc à forte concentration. Les réalisations à basse ou moyenne température restent très rares.

3.1. Installations à forte concentration

La technologie dite '*Solar Dish/Stirling*' a donné lieu à diverses réalisations remarquables [3]. La figure 1 en présente le principe. Trois composants principaux sont associés : un concentrateur orientable, pointé en permanence vers le soleil, une cavité réceptrice, au foyer du concentrateur, destinée à collecter l'énergie solaire concentrée, à haute température, et à la transférer au moteur, et enfin le moteur Stirling lui-même.

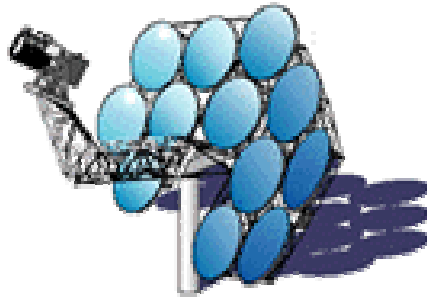


Figure 1. Principe de la technologie *Solar Dish/Stirling*

On voit donc que l'ensemble du système est relativement lourd, ce qui conduit forcément à des coûts assez élevés. C'est surtout le concentrateur, son dispositif de pointage et d'arrimage de la cavité réceptrice et du moteur au foyer, qui coûtent particulièrement cher.

La figure 2 présente un exemple concret de ce type de système. Il s'agit d'une réalisation de McDonnell Douglas/Southern California Edison, produisant une puissance électrique de 25 kW. Cette installation, réalisée dans les années 1984-1988, associe un concentrateur d'un diamètre équivalent de 10,57m et d'un rendement de $\eta_c = 0,88$ à une cavité réceptrice de 0,2m de diamètre d'ouverture. Cette cavité réceptrice a un rendement de 0,9, ce qui conduit à un rendement de captation $\eta_{\text{capt}} = 0,79$. Le moteur Stirling utilisé est le moteur cinématique 4-95 MkII construit par United Stirling AB (USAB). Ce moteur a un rendement de 38-42% pour une température maximale de l'hydrogène utilisé comme fluide de travail de 720°C. L'ensemble de cette installation conduit à un rendement global de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique de 29-30%. Ce chiffre est environ le double de celui du rendement de conversion par cellules photovoltaïques, mais l'infrastructure correspondante est évidemment plus lourde...



Figure 2. Le système McDonnell Douglas/Southern California Edison, produisant 25 kW_e

La plupart des projets *Solar Dish/Stirling* réalisés jusqu'ici ont fait appel à des moteurs préexistants, développés en général pour des applications à combustion externe. Ceci explique la température élevée nécessaire dans la cavité réceptrice, et donc le très grand degré de concentration que doit réaliser le concentrateur. Ces moteurs à haute température utilisent de l'hélium ou de l'hydrogène à très forte pression (typiquement 20 MPa) comme fluide de travail. Il s'agit donc d'une technologie assez sophistiquée, donc coûteuse...

3.2. Installations sans concentration

En 1983, le professeur Ivo Kolin invente les moteurs Stirling à faible différence de température entre la source chaude et la source froide [4]. Sa machine initiale fonctionnait avec un ΔT de seulement 20°C entre la source chaude et la source froide. Quelques années plus tard, en 1990, James R. Senft fait tourner un moteur qui fonctionne entre deux sources de chaleur dont les températures ne sont différentes que de 0,5°C [5] ! La figure 3

présente un exemple d'un modèle de ce type, dont la source chaude n'est constituée que de la chaleur dégagée par la paume de la main.



Figure 3. Le moteur GUE-HWM [6]

On pourrait considérer que ces petites machines n'ont qu'un intérêt anecdotique, et n'ont pas d'avenir industriel. Il faut souligner cependant que ces machines fonctionnent aussi bien lorsqu'elles sont placées au soleil, sans aucun concentrateur. Peu de systèmes semblent avoir été réalisés concrètement jusqu'ici. La figure 4 présente un exemple d'une machine motrice destinée à des applications de pompage. L'énergie nécessaire pour faire fonctionner cette moto-pompe est l'énergie solaire illuminant directement et sans concentration le couvercle supérieur transparent. La source froide est assurée par l'eau pompée.

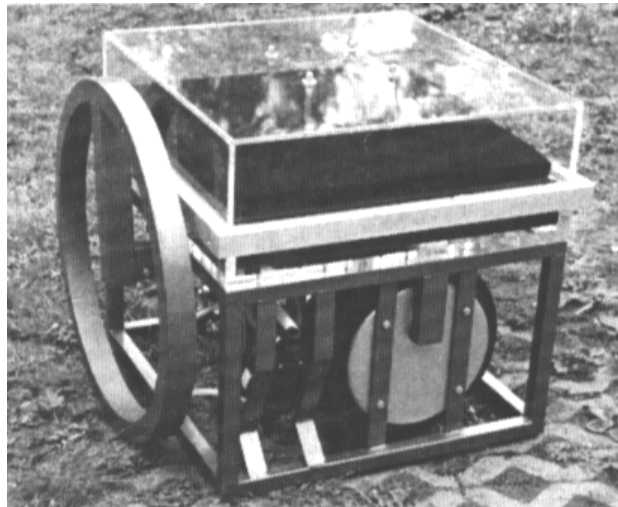


Figure 4. Machine de pompage solaire réalisée par E. Weber [7]

La société allemande BSR Solar Technologies GmbH développe actuellement une machine motrice solaire sans concentration, baptisée SUNPULSE (figure 5). La surface de captation du rayonnement solaire vaut approximativement 3 m^2 , et l'absorbeur convertit le rayonnement en chaleur à 100°C . La machine fonctionne à une fréquence d'environ $0,5$ à 1 Hz . La pression interne fluctue d'environ 10 kPa , ce qui génère une force d'environ 1000 daN sur le piston d'un m^2 . Le rendement de ce moteur vaut 13% , ce qui représente 70% du rendement de Carnot entre les niveaux de température des sources chaude et froide du moteur.



Figure 5. Moteur Stirling solaire sans concentration SUNPULSE [8]

3.3. Installation à faible ou moyenne concentration

Très peu de travaux semblent avoir été consacrés aux installations à faible ou moyenne concentration. La société BSR Solar Technologies GmbH, qui a développé le SUNPULSE, travaille également sur un système destiné à produire de l'électricité à partir d'énergie solaire moyennement concentrée (facteur de concentration géométrique α_c de l'ordre de 300), ce qui conduit à des niveaux de température de l'ordre de 450°C.

4. EVOLUTION DU RENDEMENT EN FONCTION DE LA CONCENTRATION

4.1. Modélisation simplifiée

Une étude simplifiée va permettre d'estimer l'influence du degré de concentration du rayonnement solaire sur le rendement de conversion de l'énergie solaire en travail indiqué. Soit I_s l'ensoleillement, et S_c la surface du capteur concentrateur. La puissance thermique émise par le soleil et reçue par le concentrateur vaut donc :

$$\dot{Q}_s = I_s S_c \quad (1)$$

Soit η_c le rendement du concentrateur, que nous considérons comme indépendant du degré de concentration. La puissance thermique envoyée par le concentrateur sur la cavité réceptrice vaut alors :

$$\dot{Q}_c = \eta_c I_s S_c \quad (2)$$

La cavité réceptrice perd une fraction de cette puissance, par convection naturelle et par rayonnement. Si on désigne par T_r la température moyenne de la cavité réceptrice, T_0 la température de l'ambiance et S_r la surface déperditive de la cavité réceptrice, on peut écrire la puissance transmise par la cavité vers l'échangeur réchauffeur du moteur comme suit :

$$\dot{Q}_r = \eta_c I_s S_c - K_r S_r (T_r - T_0) - \sigma \varepsilon S_r (T_r^4 - T_0^4) \quad (3)$$

En divisant la relation (3) par la puissance thermique reçue par le concentrateur, on obtient une expression du rendement du capteur, c'est-à-dire de l'ensemble constitué du concentrateur et de la cavité réceptrice :

$$\eta_{\text{capt}} = \eta_c - \frac{\kappa_r}{\alpha_c} (g_r - 1) - \frac{\rho_r}{\alpha_c} (g_r^4 - 1) \quad (4)$$

Dans cette expression, nous avons introduit les grandeurs adimensionnelles suivantes :

- $\alpha_c = S_c / S_r$, le degré de concentration géométrique du concentrateur,
- $\kappa_r = K_r T_0 / I_s$, le coefficient adimensionnel de perte par transfert thermique de la cavité réceptrice,
- $\rho_r = \sigma \varepsilon T_0^4 / I_s$, le coefficient adimensionnel de perte par rayonnement de la cavité réceptrice,

- $\mathcal{G}_r = \frac{T_r}{T_0}$, la température adimensionnelle de la cavité réceptrice.

Nous considérons que la puissance thermique transmise par la cavité réceptrice vers l'échangeur de chaleur du moteur est intégralement reçue par le fluide de travail du moteur. Si on désigne par K_x le coefficient de transfert thermique de cet échangeur, et par S_x la surface d'échange, la température du fluide de travail dans l'échangeur réchauffeur vaut donc :

$$T_x = T_r - \frac{\dot{Q}_r}{K_x S_x} \quad (5)$$

Sous forme adimensionnelle, la relation (5) se réécrit :

$$\mathcal{G}_x = \mathcal{G}_r - \frac{\eta_{\text{capt}} \alpha_c}{\kappa_x \alpha_x} \quad (6)$$

Dans la relation (6), nous avons à nouveau introduit les grandeurs adimensionnelles suivantes :

- $\alpha_x = \frac{S_x}{S_r}$, le rapport de la surface d'échange du réchauffeur à la surface de la cavité réceptrice,
- $\kappa_x = K_x \frac{T_0}{I_s}$, le coefficient adimensionnel de transfert thermique de l'échangeur réchauffeur,
- $\mathcal{G}_x = \frac{T_x}{T_0}$, la température adimensionnelle du fluide de travail dans l'échangeur réchauffeur.

Le rendement théorique maximal que peut avoir le moteur thermique est le rendement de Carnot :

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{1}{\mathcal{G}_x} \quad (7)$$

Dans la pratique, le rendement indiqué du moteur est inférieur au rendement de Carnot et peut être exprimé par la relation suivante :

$$\eta_{\text{ind}} = \eta_{\text{II}} \eta_{\text{Carnot}} \quad (8)$$

expression dans laquelle η_{II} désigne le rendement 'second principe' du moteur. Ce rendement 'second principe' est fonction de la conception de la machine. On observe qu'il est en général meilleur pour les moteurs à basse température, très lents, et souvent, à mouvements discontinus des pistons, que pour les moteurs à haute température, à vitesse de rotation élevée, et technologiquement sophistiqués. Néanmoins, nous adopterons pour la suite une valeur constante pour ce rendement 'second principe'. La puissance indiquée produite par le fluide de travail sur les pistons du moteur vaudra donc :

$$\dot{W}_{\text{ind}} = \eta_{\text{capt}} \eta_{\text{II}} \eta_{\text{Carnot}} I_s S_c \quad (9)$$

et le rendement global de conversion de la puissance solaire reçue par le concentrateur en puissance indiquée du moteur s'exprime donc, de façon similaire :

$$\eta_{\text{glob}} = \eta_{\text{capt}} \eta_{\text{II}} \eta_{\text{Carnot}} \quad (10)$$

Ces différentes expressions nous permettent de déterminer comment le rendement de conversion de l'énergie solaire évolue en fonction du degré de concentration de l'énergie solaire. Considérons \mathcal{G}_r comme variable indépendante. Les paramètres du modèle simplifié sont les suivants :

- α_c le degré de concentration géométrique du concentrateur sera considéré comme dépendant linéairement de la température dans la cavité réceptrice ; pour établir la dépendance du degré de concentration à la température dans la cavité dans les calculs qui suivent, nous avons posé que $\alpha_c = 1$ pour $\mathcal{G}_r = 1$ et $\alpha_c = 2000$ pour $\mathcal{G}_r = 4$; cette dernière valeur de α_c pour une température de cavité élevée a été choisie par comparaison avec des valeurs représentatives d'installations réelles [3] ; on note cependant une assez grande dispersion des valeurs de concentration géométrique citées dans la littérature ;
- α_x le rapport entre la surface de la cavité réceptrice et la surface de l'échangeur réchauffeur du moteur ; dans les calculs qui suivent, nous avons posé $\alpha_x = 1$;
- κ_r le coefficient adimensionnel de pertes par transferts thermiques de la cavité réceptrice ; nous avons fait l'hypothèse, probablement discutable, que ce coefficient dépend linéairement de la température de

la cavité réceptrice, et nous avons posé, dans les calculs qui suivent que $\kappa_r = 5$ pour $\mathcal{G}_r = 1$ et $\kappa_r = 100$ pour $\mathcal{G}_r = 4$;

- ρ_r le coefficient de pertes par rayonnement a été pris égal à 0,4 ;
- κ_x le coefficient adimensionnel de transfert thermique de l'échangeur réchauffeur du moteur a été considéré comme valant 2500 ;
- η_c le rendement du concentrateur a été posé égal à 0,9 ;
- η_{II} le rendement 'second principe' du moteur a été posé égal à 0,7.

4.2. Résultats

La figure 6 présente l'évolution du rendement de capteur (concentrateur + cavité réceptrice), du rendement de Carnot, et du rendement global en fonction de la température de la cavité réceptrice, dans deux cas différents :

- les courbes en traits continus sont relatifs à une cavité réceptrice parfaite ($\kappa_r = \rho_r = 0$), et à un échangeur réchauffeur parfait ($\kappa_x = \infty$), n'impliquant donc aucune chute de température entre la cavité réceptrice et le fluide de travail dans le moteur ;
- les courbes en traits interrompus présentent les résultats pour la cavité 'déperditive' caractérisée par les valeurs des paramètres indiquées dans le paragraphe 4.1.

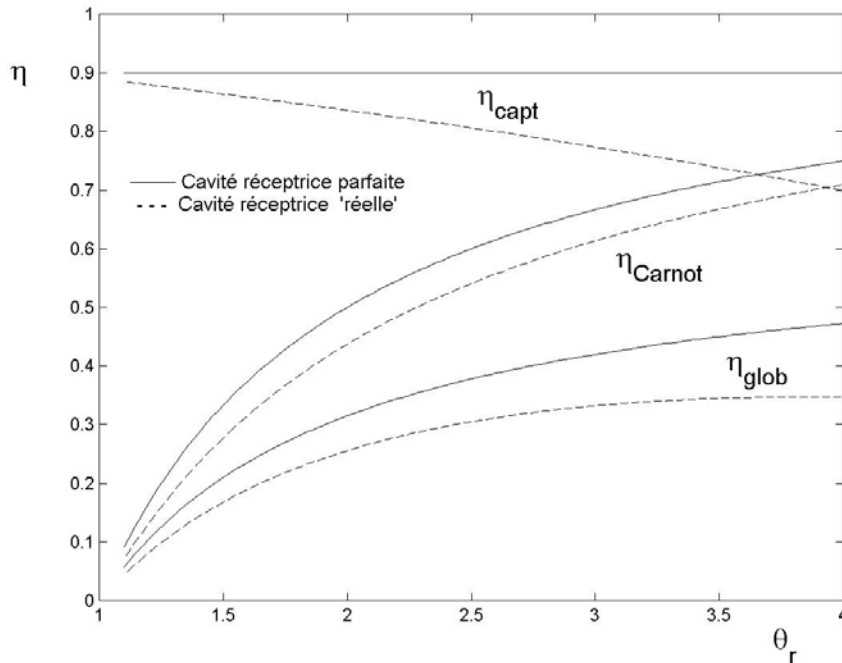


Figure 6. Evolution des rendements en fonction de la température de la cavité réceptrice

On constate que lorsqu'on tient compte des pertes du capteur solaire, l'accroissement du rendement global avec la température est beaucoup moins marqué que ne le laisse présager le seul rendement de Carnot ! La chute du rendement de l'ensemble concentrateur + cavité réceptrice avec l'élévation de la température dans la cavité réceptrice conduit donc à relativiser l'intérêt de travailler à forte concentration. On observe que pour une valeur de $\mathcal{G}_r = 3,74$ (correspondant à une température de 850°C dans la cavité réceptrice), le rendement global calculé vaut 0,347, alors qu'il vaut 0,328 pour $\mathcal{G}_r = 2,9$ (600°C). En d'autres termes, pour produire la même puissance indiquée au moteur, il faudrait augmenter la surface du concentrateur de moins de 6% si l'on réduit la température dans la cavité réceptrice de 850°C à 600°C. Cela revient à multiplier le diamètre du concentrateur par un facteur de seulement 1,028 ! Si on considère $\mathcal{G}_r = 2,08$ (350°C), le rendement global calculé vaut 0,266. En d'autres termes, il ne faut multiplier le diamètre du concentrateur que par un facteur 1,14 pour produire la même puissance avec 350°C plutôt que 850°C à la cavité réceptrice.

5. DISCUSSION

Les résultats qui précèdent demandent à être relativisés : ils dépendent assez fortement des valeurs que l'on donne aux paramètres du modèle. Ces valeurs ont été choisies au mieux, en fonction des données disponibles et mènent à des résultats réalistes et compréhensibles. Quoi qu'il en soit de la crédibilité de ce modèle simple, il n'en reste pas moins que la décroissance inévitable du rendement du système de captation avec la température réduit considérablement l'intérêt de la très forte concentration. On peut presque se demander si ce n'est pas la disponibilité (toute relative, d'ailleurs) des moteurs Stirling à haute température qui a conduit au choix de la forte concentration pour les systèmes existant actuellement. En effet, l'énergie solaire étant gratuite, les systèmes qui sont promis au plus bel avenir sont ceux qui auront le coût d'investissement le plus faible. Or de toute évidence, la faible réduction de la surface de captation ne compense pas le surcoût lié à l'utilisation d'un moteur largement plus sophistiqué lorsqu'on recourt à des niveaux élevés de température...

A l'autre extrême, on peut se poser la question de l'intérêt de systèmes à très basse température, utilisant des capteurs sans concentration. On peut imaginer, par exemple, de greffer un moteur thermique à très basse température (75°C) pour valoriser les surplus d'eau chaude produite en été par les capteurs thermiques plans destinés à la production d'eau chaude sanitaire et de chauffage dans les habitations. Le surcoût d'investissement n'est lié qu'au moteur, puisque toute l'installation de captation de l'énergie solaire est dimensionnée pour les besoins en eau chaude. Une étude récente [9] a considéré une maison résidentielle de 120 m² habitée par 4 personnes. La maison, située en Midi-Pyrénées, est équipée de 20 m² de capteurs solaires plans permettant de couvrir 72% des besoins annuels en eau chaude sanitaire et de chauffage. Du mois de mars au mois d'octobre inclus, les capteurs produisent un excédent d'eau chaude, qui permettraient de produire environ 1000 kWh d'énergie électrique. Au coût actuel du kWh électrique, cette production est bien trop faible pour qu'il y ait un intérêt économique quelconque à la valorisation énergétique de ce surplus d'eau chaude...

Les systèmes les plus pertinents seraient donc probablement les systèmes à moyenne concentration, conduisant à des niveaux de température de l'ordre de 250°C ... 450°C. Il serait nécessaire de procéder à des études exergo-économiques plus poussées pour déterminer les niveaux de concentration qui conviennent le mieux en fonction des applications visées.

REFERENCES

- [1] Stouffs P., '*Machines thermiques non conventionnelles : état de l'art, applications, problèmes à résoudre...*', Actes de la Journée d'Etude de la SFT du 14 octobre 1999, Coordonnateurs P. Stouffs et M. Feidt, Paris (1999).
- [2] Stouffs P., '*Does the Ericsson engine deserve more consideration than the Stirling engine ?*', in Proceedings of the European Stirling Forum 2002, Osnabrück (2002).
- [3] Stine W.B. and Diver R.B., '*A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology*', Rapport SAND93-7026 UC-236, Sandia National Laboratories, Albuquerque (1994) ; on trouvera également des versions actualisées des informations contenues dans ce rapport sur les sites <http://solstice.crest.org/renewables/dish-stirling/>, www.grc.nasa.gov et www.energylan.sandia.gov/sunlab/distributed.htm
- [4] Kolin I., '*Stirling motor*', Zagreb University Publications Ltd, Zagreb (1991).
- [5] Senft J.R., '*An introduction to low temperature differential Stirling engines*', Moriya Press, River Falls (1996).
- [6] Schmidt E., Stirlingmotor.com, Koernerstr.3, PF 2006, D-61410 Oberursel, <http://www.stirlingmotor.com/>
- [7] Weber E., Delta T Photon, Am Laufer Schlagturm 6, D-90403 Nürnberg, machine exposée au cours de la 6th International Stirling Engine Conference, Eindhoven (1993)
- [8] Kleinwächter J., BSR Solar Technologies GmbH, Industriestr. 8, D-79541 Lörrach, <http://www.bsrsolar.com>
- [9] Kremer P. & Dumont A., '*Valorisation énergétique du surplus de production des capteurs solaires thermiques en période estivale, par moteur thermique à basse température*', Rapport de projet tutoré, Tuteur : P. Stouffs, Licence professionnelle 'Sciences et Technologie des Energies Renouvelables', IUT de Tarbes, UPS, Tarbes (2003).