

PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE POUR SITE ISOLÉ PAR SYSTÈME HYBRIDE DE CONVERSION D'ÉNERGIE SOLAIRE

Muriel ALAPHILIPPE, Pascal STOUFFS, *Didier MARQUET

LaTEP, EA 1932, IUT-GTE, 1 Avenue de l'Université, F - 64000 Pau, France

*France Télécom, R&D, RESA/FACE, 38 rue du Général Leclerc, F - 92794 Issy

Moulineaux Cedex 9

didier.marquet@orange-ftgroup.com, muriel.alaphilippe@univ-pau.fr

pascal.stouffs@univ-pau.fr

Résumé : Cette communication étudie l'intérêt de systèmes hybrides de production d'énergie électrique de faible puissance en site isolé, notamment pour des applications de télécommunication. L'élément principal de ces installations est un moteur thermique à apport de chaleur externe qui effectue la conversion de l'énergie solaire ou de la chaleur issue d'un combustible en électricité par voie thermodynamique. Nous évaluons les dimensions de différentes installations permettant de fournir 1 kWe en régime permanent, dans 5 localisations géographiques différentes.

Mots clés :

Energie solaire, site isolé, production électrique, moteur Ericsson, cycle de Joule.

1. INTRODUCTION

La production d'énergie électrique de faible puissance en site isolé, notamment pour des applications de télécommunication, représente un enjeu très important. Les seules réponses technologiques actuelles à ce besoin sont les centrales à groupes électrogènes, consommant du combustible généralement fossile qu'il s'agit d'approvisionner, et/ou les centrales à panneaux solaires photovoltaïques ou éoliennes, associées à des parcs de batteries électriques. L'objectif pour France Telecom R&D est de trouver des alternatives réduisant le coût et l'exploitation des batteries et de groupe diesel dans les pays à fort ensoleillement et absence de réseau électrique fiable. Les travaux de recherche et les réalisations de France Télécom dans le domaine ont été présentés notamment à IEEE/intelec 2006 [1]. La figure 1 montre une station solaire type d'1 kW de France Télécom au Vietnam. Le remplacement de batterie à métaux lourds comme le plomb ou le cadmium et d'usage de combustible fossile constitue également de forts enjeux environnementaux. Cette solution pourrait également résoudre les problèmes du vol de panneaux photovoltaïques, de combustibles ou de batteries rencontrés dans certains cas. Ce travail étudie la pertinence de systèmes hybrides de production d'énergie électrique basés sur un moteur Ericsson alimenté par de la chaleur issue d'un combustible ou de l'énergie solaire concentrée. A cela, on peut ajouter un stockage d'énergie thermique, et/ou un parc de batteries électriques. En option, des capteurs photovoltaïques efficaces sous rayonnement diffus pourraient optimiser la taille du stockage et le recours au combustible.

Pour cette étude, cinq localisations géographiques différentes sont considérées : Antananarivo à Madagascar, Gaborone au Botswana, Saint-Denis de la Réunion, Le Caire en Egypte et Lyon en France. Les données d'ensoleillement sont issues de [2]. Nous avons effectué toutes les modélisations sur la base d'une journée type (moyenne) du mois le plus défavorable (janvier ou juin selon hémisphère) de la localisation géographique considérée, sauf pour Lyon où on a considéré le mois de juin. Les données sont fournies et exploitées par

période de 15 minutes. Elles correspondent à un suivi solaire selon les 2 axes. La figure 2 présente les valeurs du rayonnement solaire direct sous incidence normale utilisées dans les modèles de calculs. On y voit que les journées moyennes considérées étant relatives au mois le plus défavorable, les valeurs de l'ensoleillement direct sont assez faibles.



Figure 1 : Station solaire de France Telecom/ Orange sur l'île de Tahn Ahn (Vietnam).

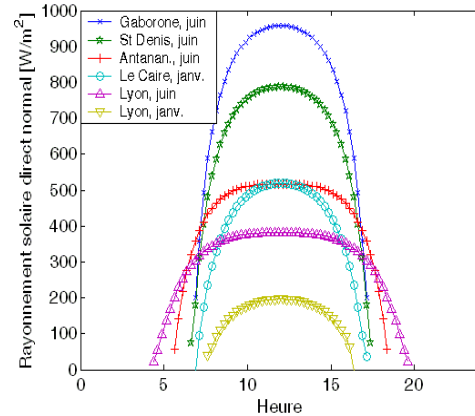


Figure 2. Rayonnement solaire direct pour les 5 localisations géographiques.

2. SYSTEME ENERGETIQUE ETUDIE

2.1. Concentrateur solaire

Le concentrateur considéré a été conçu par l'association Soleil-Vapeur [3] (Figure 3). L'énergie solaire, d'abord concentrée par le miroir cylindro-parabolique, est à nouveau concentrée au travers du Concentrateur Parabolique Composé 'CPC' dans la partie supérieure du système. Sur la ligne focale du concentrateur, en sortie de 'CPC', l'énergie solaire est transférée à l'air via l'échangeur chaud 'Heater' (Figure 4). Ce concentrateur, simple et bon marché, nous conduit cependant à considérer un rendement optique faible ($\eta_{\text{conc}} = 0,6$).



Figure 3. Concentrateur

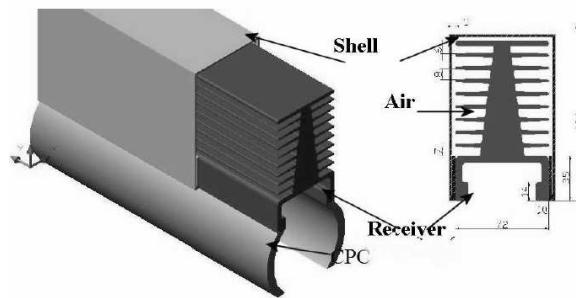


Figure 4. 2^e étage du concentrateur (CPC) et du « heater »

2.2. Moteur Ericsson et configurations des systèmes étudiés

John Ericsson inventa en 1833 un moteur thermique à air constitué d'un cylindre de compression muni de soupapes, d'un échangeur récupérateur, d'un échangeur de chaleur pour la source chaude et d'un cylindre de détente, lui aussi muni de soupapes. Ce moteur paraît pertinent pour la conversion thermodynamique d'énergie solaire de petite puissance [4, 5]. Le cycle thermodynamique réalisé dans cette machine est un cycle de Joule, équivalent à celui de la turbine à gaz à récupération. La figure 5 présente le schéma de la configuration de base. Cette configuration peut facilement être « hybridée » (figure 6), c'est-à-dire qu'on adjoint la

moteur ERICSON est obtenu en considérant un cylindre de détente « carré » et une course commune pour les pistons de détente et de compression. La vitesse linéaire moyenne des pistons est inférieure à 8 m/s. La vitesse de rotation vaut 1500 tr/min. Les autres données et les équations utilisées dans les modèles peuvent être trouvées dans [5].

En ce qui concerne les stockages thermiques par MCP, le matériau considéré ici est un mélange eutectique de NaCl/MgCl₂, dont la température de fusion vaut 442 °C, et la chaleur latente de fusion vaut 280 kJ/kg [6]. Par hypothèse, la masse de MCP considérée est telle qu'au cours d'une journée la cuve contient toujours un mélange de liquide et de solide. La température T_{hs} de l'air à la sortie du stockage thermique est donc constante tout au long de la journée et égale à la température de fusion du mélange de sels considéré. On néglige les phénomènes de surfusion et les gradients thermiques dans le stockage.

L'objectif est de déterminer la surface de concentrateur solaire qui permette de produire, soit une puissance à l'arbre de 1 kW, soit une énergie journalière de 24 kWh pour la configuration de base sans stockage thermique, mais avec seulement un stockage électrique.

3. RESULTATS

Dans la configuration de base, sans stockage thermique, le moteur Ericsson fonctionne en régime variable, en fonction des conditions d'ensoleillement. Le tableau 1 donne, pour les différentes localisations retenues, la surface de concentrateur nécessaire S_{capt}, ainsi que les différents rendements. On distingue le rendement global journalier du capteur solaire η_{capt}, le rendement indiqué journalier η_i du moteur, et le rendement mécanique. Le rendement global journalier du système est défini comme le rapport du travail net à l'arbre journalier à l'énergie journalière du rayonnement solaire direct frappant le capteur solaire. Ce dernier rendement est aussi le produit des trois précédents. Enfin, les 4 dernières colonnes du tableau 1 indiquent les caractéristiques du point de fonctionnement du moteur sous les conditions d'ensoleillement maximales de la journée considérée (à midi solaire). On y trouve le débit \dot{m}_{\max} , la température maximale atteinte à la sortie du heater solaire T_{h,max}, la puissance instantanée maximale produite à l'arbre du moteur $\dot{W}_{a,\max}$, et la valeur instantanée maximale du rendement global du système η_{glob,max}. Quelle que soit la localisation géographique, les moteurs Ericsson ne sont pas sensiblement différents les uns des autres : l'alésage du cylindre de détente varie entre 131 mm et 158 mm, et celui du cylindre de compression entre 97 et 120 mm.

Dans la configuration avec stockage thermique (tableau 2), le cycle thermodynamique est identique et fonctionne en régime permanent, quelle que soit la localisation géographique, puisque les températures extrêmes du cycle T_{hs} et T_k sont imposées respectivement par la température de fusion du MCP et par la température ambiante. L'alésage du cylindre de détente du moteur est de 147 mm et celui du cylindre de compression vaut 105 mm. Dans tous les cas, la masse minimale de MCP à prévoir est de 2400 kg.

	S _{capt} (m ²)	η _{capt} (%)	η _i (%)	η _{mec} (%)	η _{glob} (%)	\dot{m}_{\max} (kg.s ⁻¹)	T _{h,max} (K)	$\dot{W}_{a,\max}$ (kW)	η _{glob,max} (%)
Antananarivo	58,2	33,7	34,9	63,0	7,4	0,0390	861	2,47	8,2
Gaborone	27,0	40,5	38,4	69,2	10,8	0,0349	976	3,00	11,6
Saint-Denis	36,4	38,4	37,4	67,2	9,7	0,0363	958	3,04	10,6
Le Caire	82,7	30,7	35,7	64,4	7,0	0,0444	890	3,42	8,0
Lyon	93,9	27,3	33,5	59,9	5,5	0,0378	798	2,24	6,3

Tableau 1 : Configuration de base, sans stockage

	S_{capt} (m^2)	η_{capt} (%)	η_i (%)	η_{mec} (%)	η_{glob} (%)	\dot{m} ($kg \cdot s^{-1}$)	$T_{h,s}$ (K)	\dot{W}_a (kW)
Antananarivo	103	32,6	27,8	46,3	4,2	0,0377	715	1,00
Gaborone	53	42,5	27,8	46,3	5,5	0,0377	715	1,00
Saint-Denis	71	38,3	27,8	46,3	4,9	0,0377	715	1,00
Le Caire	273	16,6	27,8	46,3	2,1	0,0377	715	1,00
Lyon	159	25,2	27,8	46,3	3,3	0,0377	715	1,00

Tableau 2 : Configuration avec stockage thermique en série

4. COMMENTAIRES ET PERSPECTIVES

Les résultats que nous avons obtenus sont encourageants, en particulier dans la configuration sans stockage. Dans ce cas, on obtient ainsi, par exemple, pour les journées de l'année les plus défavorables, un rendement global journalier de 10,8 %, avec une surface de 27 m² au Botswana, de 9,7 % avec une surface de captation de 36 m² à La Réunion, alors même que les hypothèses adoptées, notamment en terme de rendement de concentrateur, rendements isentropiques, rendements mécaniques, sont très sévères. Ces résultats semblent pouvoir soutenir la comparaison avec d'autres technologies comme le photovoltaïque, par exemple. A titre de comparaison, les grandes centrales solaires thermodynamiques, implantées dans des localisations très ensoleillées, ont des rendements annuels moyens voisins de 14 %, et sur les installations photovoltaïques de plusieurs dizaines de m² les rendements moyens observés sont voisins de 12 % en climat chaud [7]. Il serait utile de valider par des études expérimentales les valeurs des rendements isentropiques et mécaniques des organes de compression et de détente des moteurs ERICSSON, ainsi que les données concernant le concentrateur solaire considéré ici et/ou d'envisager d'autres concentrateurs plus performants. Il serait intéressant d'envisager une configuration avec stockage thermique en parallèle, et d'examiner la disponibilité de MCP à température de fusion plus élevée.

Références

- [1] D.Marquet, M. Aubrée, O. Foucault, Sollan-Dimsol R&D Project, Solar and Renewable Energy in France Telecom, *IEEE/Intelec 2006*, 10-14 sept 2006, Providence, USA.
- [2] Solarec, 2006, Solar Electricity Action, European Commission Joint Research Centre, <http://re.jrc.cec.eu.int/>, Ispra, Italie, 2006.
- [3] J. Boubour, Capteur solaire linéaire à suivi discontinu, *Demande de brevet d'invention*, N° de publication 2754592, INPI, Paris, Oct. 1996.
- [4] S. Bonnet, M. Alaphilippe, P. Stouffs P., Thermodynamic solar energy conversion: Reflections on the optimal solar concentration ratio, *International Journal of Energy, Environment and Economics*, Vol. 12, N°3, pp.141-152, 2006.
- [5] M. Alaphilippe, S. Bonnet, P. Stouffs, Low power thermodynamic solar energy conversion: coupling of a parabolic trough concentrator and an Ericsson engine, *International Journal of Thermodynamics*, to be published, Vol. 10, 2007.
- [6] J Lopez, E. Palomo, Y. Zeraouli, J.-P. Dumas, Etude calorimétrique de composites graphite-sel conçus pour le stockage thermique à haute température, *Actes des 12^{èmes} Journées Internationales de Thermique, JITH2005*, 15-17 novembre 2005, Tanger, Maroc.
- [7] G. Flamant, Les systèmes énergétiques solaires à concentration « SESCO », Propositions pour un programme de recherche national sur les systèmes solaires à concentration, PROMES-CNRS, Odeillo, 2004.