

Prédimensionnement d'une microcentrale solaire thermodynamique avec une étude de sensibilité paramétrique destinée à orienter la conception

Antoine MATHIEU^{1*}, Michel FEIDT², Pierre ROCHELLE^{3,4}, Lavinia GROSU³, David GUALINO¹, Benoit GRAPPE¹

¹Schneider Electric Industrie, Technologie et Innovation, 38TEC-T1, 37 quai Paul Louis Merlin 38050 Grenoble Cedex,

²L.E.M.T.A., U.R.A. C.N.R.S. 7563, Université "Henri Poincaré" Nancy 1, 2, avenue de la Forêt de Haye, 54516 Vandoeuvre-Les-Nancy, France. e-mail : Michel.Feidt@ensem.inpl-nancy.fr

³Université Paris Ouest Nanterre La Défense, Laboratoire Energétique Mécanique et Electromagnétisme, 50, rue de Sèvres, 92410 Ville d'Avray

⁴Institut Jean Le Rond d'Alembert, Université Paris 6, France, 2, place de la gare de ceinture, 78210 Saint Cyr l'Ecole

*auteur correspondant : antoine.mathieu@fr.schneider-electric.com

Résumé - Ce document présente le prédimensionnement du stockage thermique et de la surface utile de captage solaire d'une microcentrale solaire thermodynamique, avec une étude de sensibilité paramétrique des résultats. L'assemblage des modèles des éléments du système, issus ou inspirés de la littérature aboutit à un modèle global à la fois simple et représentatif de certaines réalités physiques, à travers des paramètres pertinents. Les résultats obtenus aident à la définition de spécifications techniques, préliminaire à la conception du système par différents acteurs industriels et universitaires, œuvrant chacun sur une partie spécifique.

Nomenclature

Captage solaire :

a_1	coefficient de pertes linéaires	$W.K^{-1}$
a_2	coefficient de pertes quadratiques	$W.K^{-2}$
A_{rec}	surface de captage,	m^2
fo	facteur optique du capteur	
I_s	rayonnement direct au sol	$W.m^{-2}$
K_i	facteur d'incidence moyen journalier	
\dot{Q}_{rec}	puissance thermique captée,	W
T_{rec}	température moyenne de captage,	K
η_{sol}	rendement du captage solaire	

Stockage thermique :

$C_{T\ st}$	capacité thermique du stock	$J.K^{-1}$
\dot{Q}_{ch}	puissance thermique de charge,	W
\dot{Q}_{de}	puissance thermique de décharge	W
\dot{Q}_f	puissance de fuite thermique	W
t_{ch}	temps de charge (ensoleillement utile)	s
t_{de}	temps de décharge	s
T_{st}	température moyenne du stock	K
ΔT_{st}	variation de température du stock	K
η_{st}	rendement global du stock	
$\eta_{st\ ch}$	rendement de stockage à la charge	
$\eta_{st\ de}$	rendement de stockage à la décharge	

Moteur Stirling :

C_{fth}	facteur de fuites thermiques globalisées	
C_s	coefficient thermostatique du cycle	
P_{meca}	puissance mécanique produite	W
\dot{Q}_{mot}	puissance thermique consommée	W
R_v	rapport volumétrique	
T_H	température de source chaude	K
T_a	température ambiante	K
T_h	température haute du cycle	K
T_c	température basse du cycle	K
γ	rapport Cp/Cv du gaz de travail	
ε_{reg}	efficacité de régénération thermique	
η_{cycle}	rendement d'un cycle moteur théorique	
η_{meca}	rendement des éléments mécaniques	
$\eta_{mot\ b}$	rendement brut du moteur	
η_{mot}	rendement moteur avec circulateurs	
χ	coefficient de chute de température	
Équipements électriques :		
P_{elec}	puissance électrique demandée	W
δ_h	consommation relative des circulateurs	
η_{elec}	rendement de génération et conversion	

1. Introduction

Aujourd'hui dans le monde, 1,6 milliards de personnes n'ont pas accès à l'électricité. Le programme de développement BIP-BOP de Schneider Electric [1] relève le défi de fournir l'électricité à ces populations, en vue de promouvoir leur qualité de vie, leur accès aux soins médicaux, à l'éducation et favoriser le développement économique local. L'installation de microcentrales solaires thermodynamiques autonomes est une des solutions envisagées pour alimenter en énergie des villages éloignés du réseau en Afrique ou en Inde.

Un cahier des charges système sert de point de départ, définissant des contraintes ou des propriétés générales à satisfaire par une telle installation : robustesse, simplicité, économie, maintenance et impact environnemental limités sont les idées directrices ayant abouti aux orientations technologiques suivantes :

- Capteurs solaires à basse ou moyenne température (150°C à 300°C)
- Stockage thermique par chaleur sensible, direct ou indirect
- Eau ou huile minérale comme caloporteurs pour le circuit chaud
- Conversion thermomécanique par moteur de Stirling
- Génératrice à courant alternatif et conversion en tension alternative régulée

2. Modélisation globale et des sous-systèmes

Une modélisation fidèle nécessite une définition précise des technologies utilisées en terme de matériaux et dimensions. Ces détails étant inconnus à priori, il est nécessaire de s'inspirer de la littérature pour établir des modèles génériques, cohérents avec les grandes lignes techniques visées et l'usage prévu.

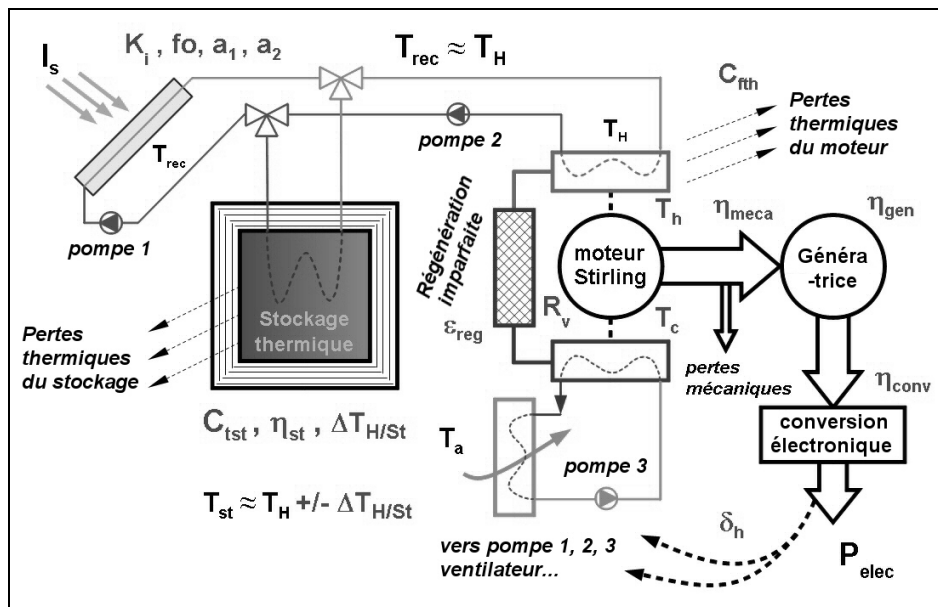


Figure 1 : Schéma global du système

Il est important de noter que la modélisation des circuits thermiques (chaud et froid), en terme de différences de température et de pertes de charge est très incertaine avant d'avoir fait de réels choix technologiques. C'est pourquoi dans la présente étude toutes les températures de la boucle chaude sont considérées comme équivalentes. On considère toutefois des différences de température, uniformes, à travers chaque échangeur.

L'assemblage des formules de rendement fournit deux expressions paramétriques de rendement global du système : l'une relative à la phase de décharge du stock thermique alimentant le moteur, l'autre à la charge du stock thermique, simultanée avec la consommation du moteur, selon l'énergie solaire disponible à travers le dispositif de captage.

Le modèle global ainsi obtenu traduit le fonctionnement du système en fonction des variables physiques externes que sont l'insolation, la puissance électrique demandée et la température extérieure. Dans la présente étude, ces variables externes sont considérées comme des constantes tout au long de la journée.

2.1. Puissance électrique demandée, rendements des équipements électriques

Une étude de prédimensionnement spécifique (interne à Schneider Electric) a permis de déterminer les plages de rendements de conversion AC/AC η_{conv} et de la génératrice η_{gen} , donc leur produit η_{elec} . La puissance mécanique d'entraînement, compte tenu de la consommation des pompes de circulation, s'exprime :

$$P_{meca} = P_{elec} \frac{(1 + \delta_h)}{\eta_{elec}} \quad (1)$$

2.2. Modélisation du moteur Stirling

Le modèle est basé sur l'étude d'un cycle théorique de Stirling direct, mais endoréversible et avec une régénération imparfaite.

Le rendement d'un cycle théorique s'exprime en fonction des températures isothermes, chaudes (à T_h) et froides (à T_c) du cycle, ainsi que du facteur thermostatique du moteur [2].

L'introduction des différences entre les températures moyennes des caloporteurs (côté source et puits) et les isothermes (chaudes et froides) du cycle permettent de définir le rendement du cycle endoréversible. Il est supposé que ces chutes de températures sont équivalentes au bout chaud et au bout froid, ce qui est assez cohérent avec la conception d'un moteur robuste à basse ou moyenne température. Elles sont donc représentées par un paramètre unique :

$$\chi = \frac{T_H - T_h}{(T_H - T_a)/2} = \frac{T_c - T_a}{(T_H - T_a)/2} \quad (2)$$

Ce paramètre χ est donc représentatif de la "partie" de la différence de température entre source et puits nécessaire aux échangeurs pour transmettre la puissance thermique. L'introduction de χ permet d'exprimer le rendement brut du moteur en fonction des seules températures de source et puits. Les pertes mécaniques et surtout thermiques des moteurs Stirling interviennent en réalité à différents niveaux [3]. Pour simplifier il en est ici tenu compte sous forme de facteurs de pertes globalisés, il vient :

$$\eta_{mot b} = \frac{(1 - C_{fth}) \eta_{meca} (1 - T_a/T_H) (1 - \chi)}{1 + (1 - T_a/T_H) (C_s (1 - \chi) - \chi/2)} ; \text{ où } C_s = \frac{1 - \varepsilon_{reg}}{(y - 1) \ln(R_v)} \quad (3)$$

Cette relation sera utilisée dans les études de charge et décharge du stock. Pour calculer le rendement effectif du moteur il convient toutefois de tenir compte de la consommation des pompes de circulations, supposée comme une fraction constante de l'électricité produite :

$$\eta_{mot} = \left(1 - \frac{\delta_h}{1 + \delta_h} \right) \eta_{mot b} \quad (4)$$

2.3. Modélisation du stockage thermique

Compte tenu des contraintes techniques et environnementales du cahier des charges système, la solution de stockage thermique par chaleur sensible a été retenue. Dans le présent article, il est considéré que ce stock est réalisé de manière directe, par le caloporteur lui-même. La température moyenne instantanée du stockage est par conséquent considérée comme équivalente à celle de la boucle thermique chaude. De même les phénomènes d'inertie et autres irréversibilités internes sont difficiles à évaluer sans un minimum de considérations dimensionnelles, inaccessibles a priori. On considère donc le stock comme une capacité thermique pure, en série avec une conductance thermique générant une fuite thermique constante. Cela est traduit par un rendement global de stockage, dont la valeur paramétrée est inspirée de la littérature [4][5].

Partons de la définition des rendement du stockage : global, en charge et en décharge :

$$\eta_{st} = -\frac{\overline{\dot{Q}}_{de} t_{de}}{\overline{\dot{Q}}_{ch} t_{ch}} ; \eta_{stch} = \frac{\overline{\dot{Q}}_{ch} + \overline{\dot{Q}}_f}{\overline{\dot{Q}}_{ch}} ; \eta_{stde} = \frac{\overline{\dot{Q}}_{de}}{\overline{\dot{Q}}_{de} + \overline{\dot{Q}}_f} \quad (5)$$

En explicitant les puissances thermiques, admise lors de la charge et restituée lors de la décharge à l'aide de la capacité thermique et des temps de charge et décharge, nous obtenons deux expressions de la puissance moyenne de fuite, assimilée à la fuite thermique instantanée :

$$\overline{\dot{Q}}_f = C_{Tst} \frac{-\Delta T_{st}}{t_{de}} (1 - \eta_{stde}) = C_{Tst} \frac{\Delta T_{st}}{t_{ch}} (\eta_{st} - 1) \quad (6)$$

Cela permet de définir les expressions des rendements de charge et décharge :

$$\eta_{stch} = \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{t_{ch}}{t_{de}} \right) + \sqrt{\left(1 - \frac{t_{ch}}{t_{de}} \right)^2 + 4 \frac{t_{ch}}{t_{de}} \eta_{st}} \right] \text{ et } \eta_{stde} = \frac{\eta_{st}}{\eta_{stch}} \quad (7)$$

La connaissance de la capacité thermique du stockage permet de déterminer simplement les masses et volume de médium nécessaire à partir des valeurs thermo-dépendantes ou moyennes des chaleurs spécifiques massiques et de la masse volumique du médium

2.4. Modélisation du captage solaire

Le modèle générique adopté pour calculer le rendement de captage utilise des pertes linéaires et quadratiques [6]. Ce modèle ne reflète certes pas toute la réalité physique des convertisseurs héliothermiques [7][8], mais est réputé valable dans les plages de fonctionnement de nombreux capteurs, et même le rendement de capteurs cylindro-paraboliques à hautes performances est parfois exprimé sous cette forme simplifiée :

$$\eta_{sol} = fo - \frac{a_1(T_{rec} - T_a) - a_2(T_{rec} - T_a)^2}{I_s K_i} \quad (8)$$

3. Dimensionnement et optimisation

Compte tenu des hypothèses formulées plus haut, la puissance thermique de décharge s'exprime :

$$\dot{Q}_{dech} = \eta_{stde} C_{Tst} \frac{dT_{st}}{dt} = \frac{-P_{elec} (1 + \delta_h)}{\eta_{elec} \eta_{mot}} \quad (9)$$

La séparation des variables temps et température de (9) permet d'intégrer simplement, ce qui aboutit à la détermination de la capacité thermique, en relation avec les niveaux de température au début et à la fin de la décharge :

$$C_{T_{st}} = \frac{P_{elec}(1+\delta_h) t_{de}}{\eta_{st\ de} \eta_{elec} \int_{T_{st\ min}}^{T_{st\ max}} \eta_{mot} dT_{st}} \quad (10)$$

Pendant la durée exploitable d'ensoleillement, le champ de capteurs doit assurer à la fois la charge du stock et la consommation thermique du moteur, en terme de puissance instantanée cela s'exprime :

$$\dot{Q}_{rec} = \dot{Q}_{ch} + \dot{Q}_{mot} = \eta_{sol} K_i I_s A_{rec} = \frac{C_{T_{st}}}{\eta_{st\ ch}} \frac{dT_{st}}{dt} + \frac{P_{elec}(1+\delta_h)}{\eta_{mot} \eta_{elec}} \quad (11)$$

La détermination de la surface de captage à l'aide de (11) n'est pas directe, mais une première estimation peut être obtenue en assimilant la dérivée de la température du stock à sa moyenne sur toute la durée de la charge :

$$\widetilde{A}_{rec\ 0} = \frac{\frac{C_{T_{st}}}{\eta_{st\ ch}} \left(\frac{T_{st\ max} - T_{st\ min}}{t_{ch}} \right) + \frac{P_{elec}(1+\delta_h)}{\eta_{mot}(T_{st\ moy}) \eta_{elec}}}{\eta_{sol}(T_{st\ moy}) K_i I_s} \quad (12)$$

L'expression (12) est également à variables séparable. La capacité du stock étant connue, l'intégration du temps de charge est possible en fonction des niveaux de température souhaités, et pour une valeurs approchée de \widetilde{A}_{rec} . L'application de la méthode de Newton permet la détermination numérique de A_{rec} .

D'autres grandeurs intermédiaires peuvent être obtenues par le biais de l'expression différentielle du temps de décharge issu de (9) et du temps de charge issu de (11), en particulier les rendement moyens journaliers du captage solaire et du moteur Stirling.

Cette méthode de dimensionnement a été appliquée à plusieurs capteurs connus (tubes évacués, CPC et CP) ou possible à fabriquer [9]. La variation du maximum $T_{st\ max}$ de la température du stock, et de sa variation cyclique journalière $\Delta T_{st} = T_{st\ max} - T_{st\ min}$ permet de déterminer les niveaux optimaux de température pour chaque type de capteur. Les surfaces de captage, volumes de stockage rendement de captage et rendement du moteur correspondant à ces optima sont représentés synthétiquement sur la figure 2 (pour $\Delta T_{st} = 0,3(T_{st\ max} - T_{st\ min})$).

Il est remarquable que pour l'ensemble des capteurs, le rendement de conversion thermosolaire reste proche de 50% dans la plage de température visée (< 300°C). La surface de captage et le volume de stockage sont quant à eux sensiblement proportionnels à l'inverse et au carré inverse de la température. Le coût de l'installation sera donc sensiblement proportionnels à ces deux grandeurs. Le rendement du moteur, suivant une courbe comparable au facteur de Carnot, et l'augmentation linéaire du rendement global avec la température semblent confirmer l'avantage des plus hautes températures.

Toutefois il convient de considérer que les prix de revient et de mise en œuvre des matériaux utilisés pour la réalisation des capteurs solaires, du stockage et du moteur s'élèveront considérablement avec la température, avec notamment des sauts technologiques aux alentours de 200°C et une croissance exponentielle au delà.

Ces considérations permettent de supposer l'existence d'un optimum thermoéconomique lié au niveau de température, qu'il conviendra de confirmer dans les études de conception à venir.

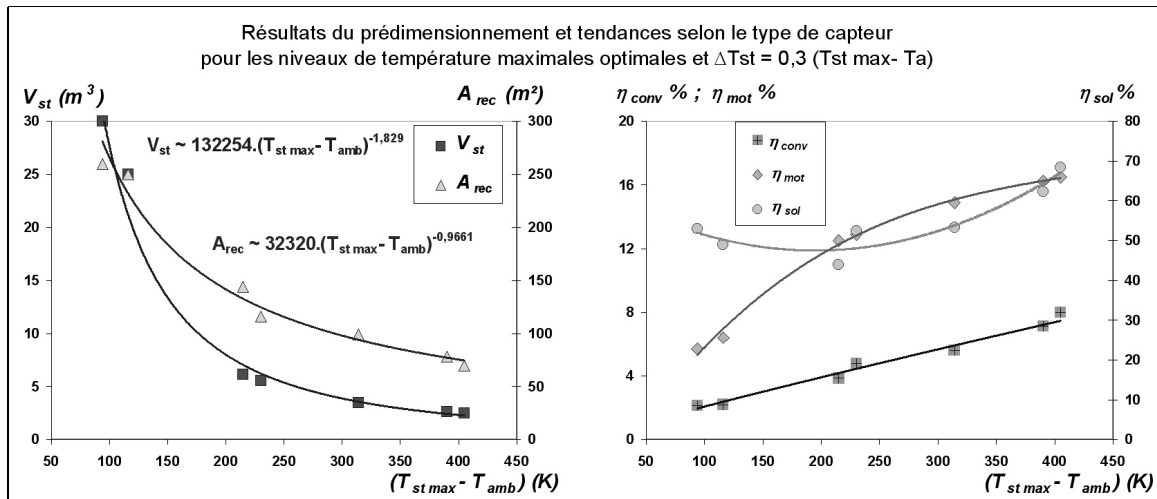


Figure 2 : Synthèse des résultats optimaux, indicateur thermoéconomique préliminaire

4. Conclusion

Le modèle réalisé de microcentrale solaire thermodynamique a permis de prédimensionner des éléments clef du système pour différents capteurs solaire allant de la basse température (100 à 150°C) à la moyenne température (200 à 400°C). Cela a abouti aux spécifications techniques préliminaires à la conception proprement dite des sous-systèmes par différents acteurs universitaires et industriels.

Les résultats obtenus associés aux contraintes techniques et environnementales associées, constituent des indicateurs vers une étude thermoéconomique plus avancée. En outre la méthode ci-avant présentée est améliorable par la considération des profils de charge journalière réalistes ou encore un rayonnement variable au cours de la journée.

Références

- [1] <http://www.schneider-electric.com/sites/corporate/fr/groupe/developpement-durable-et-fondation/engagements-sociaux/communautes.page>
- [2] J. Howell, R. Bannerot (1977). *Optimum solar collector operation for maximizing cycle work output*. University of Houston. Solar Energy 19, 149-153
- [3] P. Rochelle et al (2009). *Modélisation TDF des moteurs "isothermes" avec pertes : application à l'évaluation d'un moteur Stirling LTD*. Université Paris 10. Congrès Français de la Thermique, SFT 2009, 901-906 .
- [4] D. Laing et al. (2006) *Solid media thermal storage for parabolic trough power plants*. Solar Energy 80, 1283–1289. Elsevier
- [5] Pilkington Solar International GmbH (2000). *Survey of Thermal Storage for Parabolic Trough Power Plants*. NREL, 61 p. NREL/SR-550-27925
- [6] NF EN 12975-1 et -2 (2006). *Installations solaires thermiques et leurs composants. Capteurs solaires. Partie 1 : Exigences générales et Partie 2 : Méthode d'essai*. AFNOR
- [7] P. Gallet, F. Papini, G. Péri (1980). *Physique de convertisseurs héliothermiques*. Edisud, La Calade. ISBN 2857440707. 197 p.
- [8] M. Feidt, M. Costea, C. Petre, R. Boussehain (2004). *Génie énergétique appliqué au solaire*. Printech, Bucarest. ISBN 9737180925. 115p.
- [9] M. Brooks (2005). *Performance of a parabolic trough collector* . University of Stellenbosch, South Africa , Mémoire de Master, 174 p.