

# Évaluation expérimentale des performances d'une installation de micro-cogénération solaire couplant un concentrateur cylindro-parabolique et un moteur à cycle de Hirn

**Jean-Louis BOUVIER<sup>1</sup>, Ghislain MICHAUX<sup>1</sup>, Patrick SALAGNAC<sup>1</sup>, Thiebaut KIENZ<sup>2</sup>, François NEPVEU<sup>3</sup>, Dominique ROCHIER<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> LaSIE, Université de La Rochelle, Av. M. Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex 1, France

<sup>2</sup> Exoès, 6 Avenue de la Grande Lande, ZI Bersol, 33170 Gradignan, France

<sup>3</sup> Exosun, Rue Jacques Monod, Technopole Bordeaux Montesquieu, 33650 Martillac, France

Auteur correspondant : [patrick.salagnac@univ-lr.fr](mailto:patrick.salagnac@univ-lr.fr)

## Résumé

Le secteur du bâtiment est aujourd'hui un poste important de consommation d'énergie. Il représente plus de 40 % de l'énergie finale consommée en France. Dans un contexte d'économies d'énergie et d'épuisement des ressources fossiles, ce secteur est donc particulièrement concerné. La micro-cogénération peut apporter une solution pour la réduction des consommations énergétiques. En effet, elle consiste généralement en la production simultanée de chaleur et d'électricité avec une meilleure efficacité qu'une production séparée. Elle est particulièrement adaptée au secteur du bâtiment où ces deux besoins sont prépondérants.

C'est dans ce contexte qu'est né le projet Micosol (Micro-COgénération SOLaire). Porté par le laboratoire Lasie, en partenariat avec les entreprises Exoès et Exosun, il a pour objectif le développement d'une unité de micro-cogénération solaire. Il s'oriente autour d'un prototype construit sur le site de l'université de La Rochelle et constitué d'un concentrateur cylindro-parabolique associé à un moteur à vapeur fonctionnant suivant un cycle de Hirn (Rankine surchauffé).

L'originalité de ce projet est la génération directe de vapeur au sein d'un concentrateur de taille réduite (46,5 m<sup>2</sup>), couplée à un moteur non lubrifié à piston monocylindre et pourvu d'un système de suivi deux axes. La gamme de puissance envisagée, de l'ordre de 20 kW thermique et 2 kW électrique, permet de répondre aux besoins énergétiques de bâtiments tels que des maisons individuelles ou des petits collectifs, tertiaires et industriels.

Une campagne expérimentale a été menée afin d'évaluer les performances de l'installation de micro-cogénération solaire. Les conditions de fonctionnement du cycle (pression, débit, température) ainsi que les performances globales obtenues (rendement, puissances électrique et thermique produites) sont présentées.

## Nomenclature

$G$	irradiance solaire directe normale, $W.m^{-2}$	
$\dot{m}$	débit, $kg.s^{-1}$	Indices et exposants
$N$	vitesse de rotation, $tr/min$	$f$ fluide
$p$	pression, $bar$	$evap$ évaporation
$P$	puissance électrique, $W$	$mot$ moteur
$T$	température, $^{\circ}C$	

## 1. Introduction

Du fait de la raréfaction des ressources énergétiques fossiles et de la demande de plus en plus importante d'énergie électrique dans les bâtiments, il devient nécessaire de développer de nouvelles solutions répondant à ces contraintes actuelles. La production d'électricité dans des centrales thermiques génère près de 60 % de pertes [1], [2]. Une solution peut venir de la micro-cogénération qui permet de réduire ces pertes en produisant sur le lieu de consommation de l'électricité et de la chaleur pour répondre aux besoins de chauffage et/ou d'eau chaude sanitaire dans le bâtiment. La micro-cogénération est définie pour une puissance électrique inférieure à 50 kW [3].

Le principal objectif du projet MICOSOL est de développer un prototype de micro-cogénération solaire, basé sur l'association d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique équipé d'un système de suivi solaire deux axes, et d'un moteur à vapeur suivant un cycle de Hirn (Rankine surchauffé). Conçu pour répondre aux besoins énergétiques de petits bâtiments tels que maisons individuelles ou petits bâtiments collectifs, tertiaires et industriels. Le prototype a été dimensionné pour générer une puissance électrique de 2 kW et thermique de 20 kW.

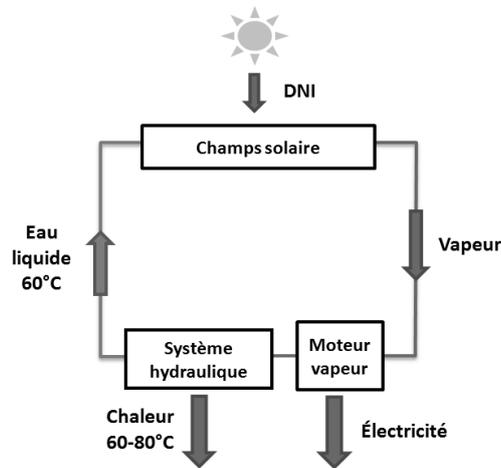


Figure 1 : Schéma du système de micro-cogénération

Le principe de fonctionnement (Figure 1) est le suivant : de l'eau déminéralisée entre dans le concentrateur à une pression comprise entre 10 et 30 bars, avec un débit compris entre 20 et 40  $kg.h^{-1}$ . Sous l'effet de l'ensoleillement, l'eau est vaporisée sous forme de vapeur surchauffée ou saturée à une température comprise entre 180 et 250°C. Cette vapeur est ensuite détendue au sein du moteur puis condensée. La chaleur récupérée lors de la condensation est cédée à un circuit de refroidissement qui permet, à l'aide d'un aérotherme, de simuler la charge thermique d'un bâtiment (chauffage et production d'ECS).

Plusieurs exemples de microcentrales de production électrique ou de micro-cogénération à partir de collecteurs solaires thermiques ont été étudiés avec l'utilisation de composés organiques (Organic Rankine Cycle) [4]–[7] ou de CO<sub>2</sub> [8] comme fluide de travail. Par ailleurs, de nombreuses expérimentations et études ont été conduites sur la production d'électricité centralisée par génération de vapeur directe à partir d'énergie solaire pour des puissances supérieures à 1 MW [9]–[11]. En revanche, les exemples de centrales de micro-cogénération solaire avec génération directe de vapeur sont rares. Almenza *et al.* ont évalué le couplage d'un champ solaire cylindro-parabolique de 36,3 m<sup>2</sup> couplé à un moteur à vapeur d'une puissance de 2,24 kW de marque Stuart Swan [12].

L'objectif de cette étude est l'évaluation expérimentale des performances du micro-cogénérateur solaire. La caractérisation du champ solaire du prototype MICOSOL a été effectuée précédemment et a permis d'étudier le fonctionnement du concentrateur solaire en génération directe de vapeur [13]. La seconde étape, qui fait l'objet du présent article, est l'étude du système de micro-cogénération solaire. Dans un premier temps, nous décrivons le prototype qui a servi à réaliser les essais. Par la suite, les résultats expérimentaux obtenus sont présentés puis discutés.

## 2. Prototype expérimental et métrologie

Le prototype est composé de quatre éléments principaux : un champ solaire, un moteur, un système hydraulique et une boucle de refroidissement (Figure 1).

Le champ solaire est constitué de deux rangées de concentrateurs cylindro-paraboliques situés sur une structure pourvue d'un système de suivi deux axes (Figure 2). La boucle de refroidissement permet de réguler la température en entrée du champ solaire de 35 à 70°C. Une description du champ solaire, de la boucle de refroidissement et de la métrologie associée est donnée dans une précédente publication [14].



Figure 2 : Vue extérieure du prototype

Le moteur, développé par la société Exoès, est un détendeur à piston monocylindre. Le principal défi lors de la conception de ce moteur a été la non-lubrification, rendue indispensable par le fait que la boucle soit fermée et par le niveau de température atteint au sein du concentrateur. Une description détaillée du moteur est donnée par Daccord [15] et dans le brevet déposé par Exoès [16].

Les caractéristiques du moteur sont présentées par le Tableau 1.

Diamètre du cylindre	85 mm
Volume balayé	443 cm <sup>3</sup>
Volume mort	170 cm <sup>3</sup>
Rapport volumétrique de détente	6,10
Rapport volumétrique de compression	3,35
Vitesse de rotation	600-1500 tr/min
Puissance électrique maximale	3 kW

Tableau 1 : *Caractéristiques du moteur*

Afin de garantir une surchauffe de la vapeur produite, un surchauffeur a été installé entre le concentrateur et le moteur. La surchauffe de la vapeur permet de pouvoir connaître l'enthalpie du fluide à partir des mesures de la température et de la pression ainsi que de limiter le risque de condensation au sein du moteur.

La Figure 3 présente le schéma hydraulique du prototype. La vapeur en sortie du surchauffeur ( $T_{f8}$ ) est admise par le moteur à une température  $T_{f14}$  et une pression  $p_9$ . À l'échappement, la vapeur ( $T_{f15}$ ) est directement condensée au sein du circuit de refroidissement du moteur. Le débit de fluide en entrée du moteur est calculé à l'aide de corrélations établies à l'aide d'essais effectués sur un banc spécifique [17].

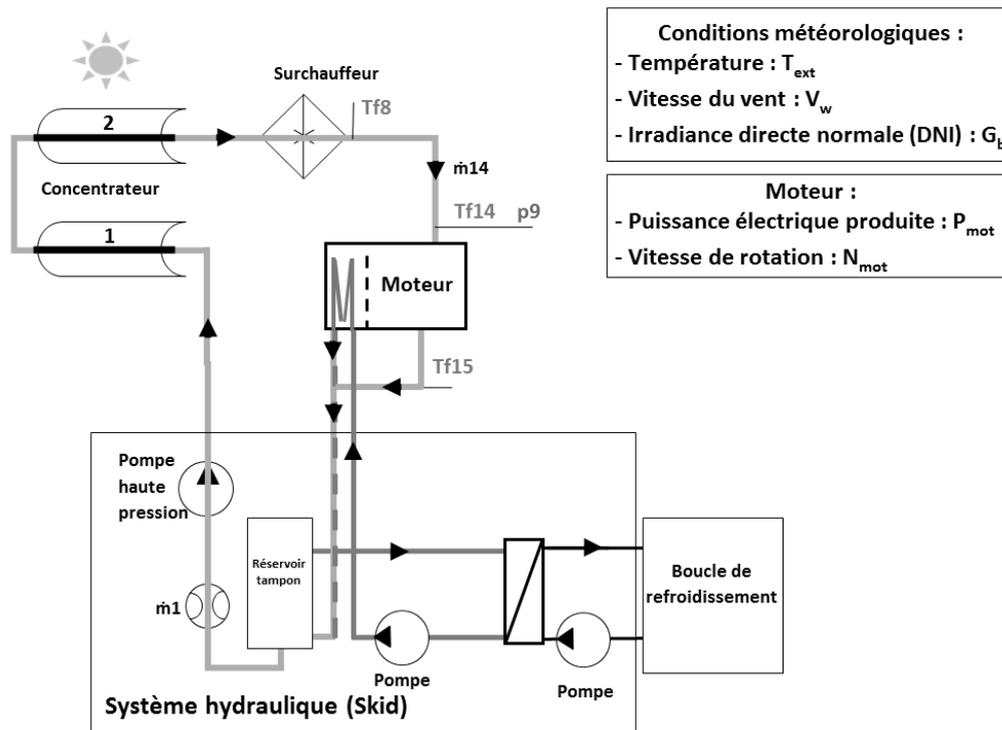


Figure 3 : *Schéma hydraulique simplifié du prototype*

La vitesse du moteur est mesurée par des capteurs à effet Hall. La puissance électrique générée est donnée par le variateur contrôlant la vitesse du moteur. Deux thermocouples permettent de mesurer la température du fluide dans la chapelle et à l'échappement.

### 3. Résultats et discussion

Les essais présentés ici ont été réalisés en régulant la pression en entrée du moteur ( $p_9$ ). La régulation s'est faite à l'aide d'un contrôleur PI (Proportionnel – Intégral). L'actionneur est la vitesse de rotation du moteur  $N_{mot}$  contrôlée par un variateur. La température de sortie du surchauffeur ( $T_{f8}$ ) a également été régulée à l'aide d'un pilotage en tout ou rien sur la puissance électrique du surchauffeur.

La Figure 4 présente les conditions de fonctionnement et de régulation. Au cours de l'essai, l'irradiance directe normale (DNI) est restée à une valeur proche de  $880 \text{ W/m}^2$ .

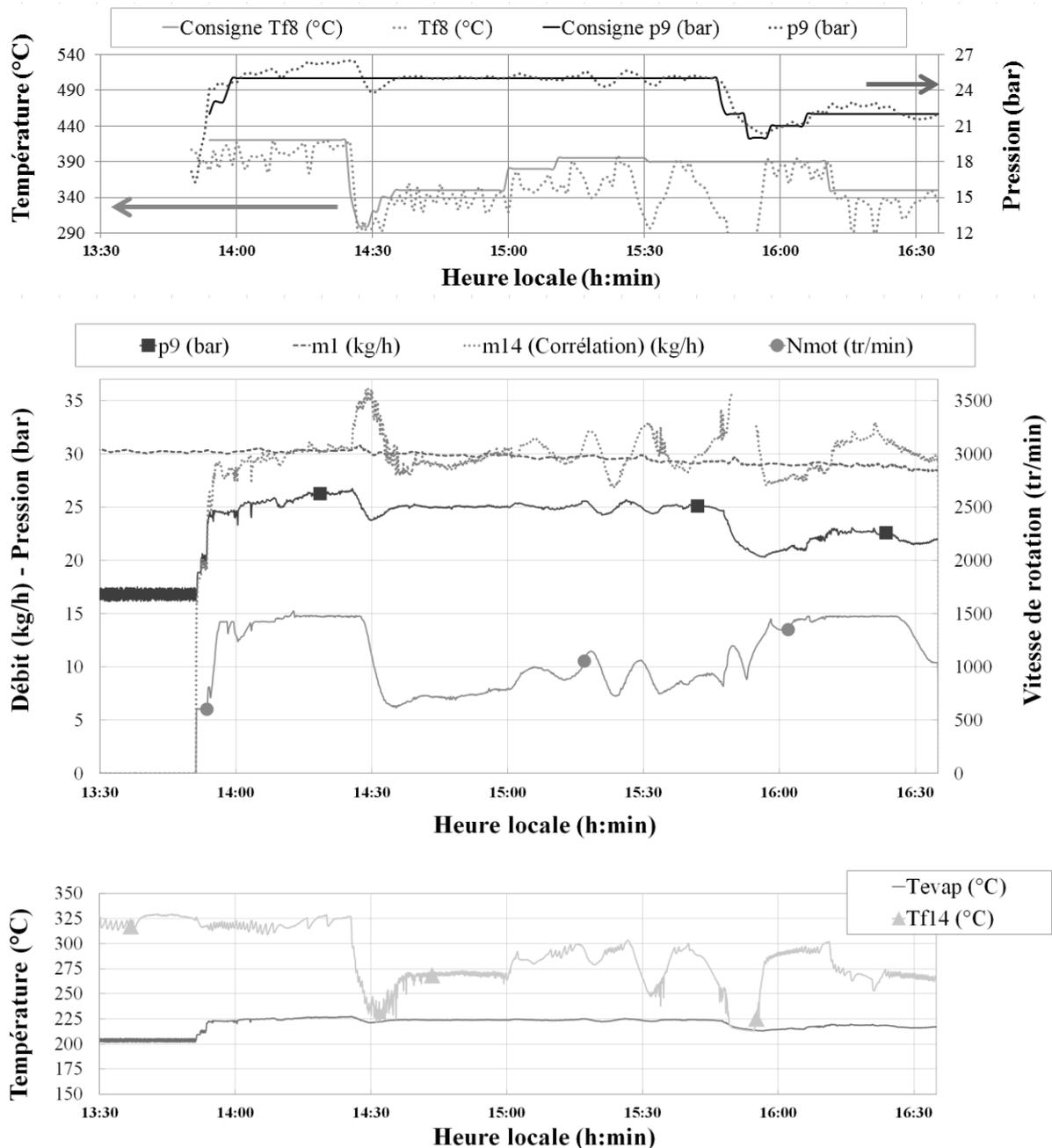


Figure 4 : Conditions de fonctionnement et de régulation du prototype complet (16/07/2014)

Le premier graphe de la Figure 4 présente les consignes sur la température à la sortie du surchauffeur ( $T_{f8}$ ) et sur la pression en entrée du moteur ( $p_9$ ) ainsi que les valeurs relevées pour ces deux grandeurs. La pression est relativement proche de la consigne. En revanche, on observe des variations importantes pour la température liées aux variations du débit en entrée du moteur.

Le second graphe de la Figure 4 montre à la fois la pression ( $p_9$ ) et le débit ( $\dot{m}_{14}$ ) en entrée du moteur, le débit en entrée du concentrateur ( $\dot{m}_1$ ) ainsi que la vitesse de rotation du moteur ( $N_{mot}$ ). Le débit d'entrée du concentrateur est régulier tout au long de la période d'essai.

La température à l'admission du moteur ( $T_{f14}$ ) ainsi que la température d'évaporation ( $T_{evap}$ ) sont présentées sur le troisième graphe de la Figure 4. La vapeur à l'admission est à l'état saturé à deux reprises (14h30 et 15h50).

À 13h50, la mise en marche du moteur s'est opérée sans difficultés particulières. De 14h00 à 14h25, la pression est supérieure à la consigne, le moteur étant à la vitesse maximale, la régulation est inopérante. Cependant, un régime stabilisé est atteint pour cette période. En effet, le système est considéré comme stabilisé quand il y a équilibre entre les débits d'entrée du concentrateur ( $\dot{m}_1$ ) et du moteur ( $\dot{m}_{14}$ ).

La régulation par la vitesse du moteur entraîne une variation du débit volumique absorbé par ce dernier. La masse volumique en sortie du concentrateur (et par conséquent la pression du fluide) s'ajuste alors pour établir un équilibre entre le débit volumique en sortie du concentrateur et celui en entrée du moteur. L'impact de la régulation s'observe par exemple à 14h30. La pression  $p_9$  étant inférieure à la consigne, la vitesse du moteur passe alors de 1500 tr/min à 600 tr/min afin de diminuer le débit admis par le moteur ( $\dot{m}_{14}$ ) et d'augmenter ainsi la pression  $p_9$ . À partir de 14h40, la régulation a permis d'obtenir un régime stabilisé jusqu'à 15h00. Enfin de 16h05 à 16h25, le moteur est à sa vitesse maximale, il n'est donc pas possible de maintenir la pression à sa valeur de consigne de 22 bars.

Des fluctuations sur la pression, les températures, le débit en entrée du moteur et la vitesse de rotation apparaissent entre 15h10 et 16h. Ces oscillations sont dues à l'inertie et au volume important du concentrateur. En effet, ces derniers entraînent un léger déphasage entre débit et pression qui rend complexe la régulation du système.

La régulation mise en place s'avère donc pertinente sur certaines périodes où deux points stabilisés ont été obtenus. Elle montre cependant des limitations sur d'autres périodes où des oscillations importantes ont été relevées.

Ces deux points stabilisés d'une durée de 10 minutes sont décrits par le tableau 2.

Heure	14h16	14h50
Vitesse de rotation (tr/min)	1475	762
Pression chapelle : $p_9$ (bar)	26,3	25
Pression échappement (bar)	0,95	0,93
Débit $\dot{m}_1$ (kg/h)	30,3	29,9
Débit $\dot{m}_{14}$ (corrélation) (kg/h)	30,6	29,8
Puissance solaire (kW)	42,3	41,7
Puissance récupérée par le concentrateur (kW)	21,3	20,7
Puissance surchauffeur (kW)	4,8	3,6
Puissance électrique produite (kW)	1,3	1,4
Puissance thermique produite (kW)	19,6	18,3

Tableau 2 : Performances globales pour deux points stabilisés

Le débit calculé ( $m^3$  en entrée du moteur), est très proche du débit mesuré en entrée du concentrateur (tableau 2). Cette égalité permet à la fois de vérifier l'équilibre du système, et de valider l'utilisation d'une corrélation pour le débit en entrée du moteur.

On remarque que la puissance consommée par le surchauffeur est supérieure à la puissance produite par le moteur. L'utilisation d'un surchauffeur électrique est liée à un besoin expérimental, mais son usage, pour une application pratique, ne serait pas pertinent. En revanche, il peut être remplacé par une source alternative renouvelable, bois ou biogaz ou fossile, gaz ou fioul par exemple.

La puissance solaire récupérée par le concentrateur est assez stable pour les deux essais (de l'ordre de 21 kW). La puissance électrique produite est assez faible ( $< 2$  kW). Ces valeurs limitées s'expliquent par la faible pression de fonctionnement ( $\leq 26,3$  bars) et par les pertes thermiques importantes au niveau des différents éléments du système. Elles pourraient être améliorées en limitant les déperditions thermiques, en augmentant la pression à l'admission ou en diminuant la pression à l'échappement.

## 4. Conclusion

Les performances globales du micro-cogénérateur ont été évaluées pour un essai avec régulation sur la pression d'entrée du moteur. La mise en marche du moteur s'est opérée sans difficultés particulières. En revanche, il a été complexe de stabiliser le système en raison de la forte inertie thermique de la source chaude (concentrateur). La puissance électrique produite est en moyenne de 1,4 kW et la puissance thermique de 19 kW pour les deux points stabilisés considérés. Ces résultats pourraient être améliorés par une isolation plus importante des conduites et de certains éléments du système et par une diminution de la pression à l'échappement ou une augmentation de la pression de service.

## Références

- [1] IEA, *Energy Efficiency Indicators for Public Electricity Production from Fossil Fuels*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2009.
- [2] M. Boudellal, *La cogénération*, 1 vol. Paris : Dunod, France: l'Usine nouvelle, 2010.
- [3] EU, « Official Journal of the European Union, publication L315, volume 55. », nov. 2012.
- [4] O. Dumont, E. Georges, S. Declaye, V. Lemort, et S. Quoilin, « Dimensionnement et modélisation d'une microcentrale solaire », in *Congrès français de thermique*, Gerardmer, 2013.
- [5] M. Kane, D. Larrain, D. Favrat, et Y. Allani, « Small hybrid solar power system », *Energy*, vol. 28, n° 14, p. 1427–1443, 2003.
- [6] T. Saitoh, N. Yamada, et S. Omer, « Solar Rankine cycle system using scroll expander », *Journal of Environment and Engineering*, vol. 2, p. 708- 719, 2007.
- [7] X. D. Wang, L. Zhao, J. L. Wang, W. Z. Zhang, X. Z. Zhao, et W. Wu, « Performance evaluation of a low-temperature solar Rankine cycle system utilizing R245fa », *Solar Energy*, vol. 84, n° 3, p. 353- 364, mars 2010.
- [8] H. Yamaguchi, X. R. Zhang, K. Fujima, M. Enomoto, et N. Sawada, « Solar energy powered Rankine cycle using supercritical CO<sub>2</sub> », *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, n° 17- 18, p. 2345- 2354, déc. 2006.
- [9] A. Khenissi, D. Krüger, T. Hirsch, et K. Hennecke, « Return of experience on transient behavior at the DSG solar thermal power plant in Kanchanaburi, Thailand », présenté à SolarPACES Conference 2014, Beijing, China, 2014. Disponible sur : [http://elib.dlr.de/91902/1/SolarPces\\_2014\\_11\\_09\\_2014.pdf](http://elib.dlr.de/91902/1/SolarPces_2014_11_09_2014.pdf)

- [10] M. Eck et E. Zarza, « Saturated steam process with direct steam generating parabolic troughs », *Solar Energy*, vol. 80, n° 11, p. 1424- 1433, nov. 2006.
- [11] T. Hirsch, J. F. Feldhoff, K. Hennecke, et R. Pitz-Paal, « Advancements in the Field of Direct Steam Generation in Linear Solar Concentrators—A Review », *Heat Transfer Engineering*, vol. 35, n° 3, p. 258- 271, 2014.
- [12] R. Almanza et A. Lentz, « Electricity production at low powers by direct steam generation with parabolic troughs », *Solar Energy*, vol. 64, n° 1- 3, p. 115- 120, sept. 1998.
- [13] J.-L. Bouvier, G. Michaux, P. Salagnac, F. Nepveu, D. Rochier, et T. Kientz, « Experimental study of a micro combined heat and power system: characterisation of the parabolic trough collector used for direct steam generation », in *Eurosun*, Aix-les-Bains, 2014.
- [14] J.-L. Bouvier, G. Michaux, et P. Salagnac, « Étude expérimentale d'un concentrateur solaire parabolique à génération directe de vapeur alimentant une centrale de micro-cogénération », in *Congrès Français de Thermique*, Lyon, 2014.
- [15] R. Daccord, J. Melis, T. Kientz, A. Darmedru, R. Pireyre, N. Brisseau, et E. Fonteneau, « Exhaust Heat Recovery with Rankine piston expander », in *Proceedings of ICE Powertrain Electrification & Energy Recovery*, Rueil-Malmaison, France, 2013.
- [16] R. Daccord, T. Kientz, et B. Gallot, « Steam Engine Electricity Production Assembly », WO2014044772 (A1), 27-mars-2014.
- [17] J.-L. Bouvier, « Étude expérimentale d'une installation de micro-cogénération solaire couplant un concentrateur cylindro-parabolique et un moteur à cycle de Hirn », Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2014.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier la Région Poitou-Charentes et le FEDER pour leur contribution financière ainsi que les sociétés Exosun ([www.exosun.net](http://www.exosun.net)) en charge de la structure et des concentrateurs cylindro-paraboliques et Exoès ([www.exoes.com](http://www.exoes.com)) en charge du système hydraulique et du moteur à vapeur.