

Comparaison des performances de deux types de technologies associées à un bâtiment à énergie positive : une pompe à chaleur réversible en ORC et une pompe à chaleur couplée avec des panneaux photovoltaïques

Olivier DUMONT^{1*}, Vincent LEMORT¹

¹Laboratoire de thermodynamique appliquée, université de Liège
Chemin des chevreuils, 7 - Bât. B49 (P33) 4000 Liege, Belgique
*(olivier.dumont@ulg.ac.be)

Résumé – Afin d’atteindre les objectifs 20-20-20 en 2020 ainsi que les objectifs européens à plus long terme, il est impératif de réduire drastiquement les émissions dues au secteur du bâtiment résidentiel qui compte pour plus de 27% de la consommation d’énergie finale en Europe. Dans ce cadre, le développement des bâtiments à énergie positive est une voie prometteuse. Ce travail compare les performances annuelles de deux systèmes concurrents. D’une part, une solution classique, consistant en une maison passive couplée à une pompe à chaleur (PAC) eau-eau et à des panneaux photovoltaïques (PAC/PV). D’autre part, une maison passive avec un toit solaire thermique combiné à une unité pompe à chaleur / cycle organique de Rankine réversible (PAC/ORC). Cette unité modulable permet trois modes de fonctionnement : le mode PAC, le mode ORC et un mode de chauffage direct, utilisant l’énergie thermique générée par le toit solaire. Les deux systèmes sont dimensionnés pour une puissance électrique nette maximale de 5,29 kW. Les simulations dynamiques sont effectuées à l’aide du logiciel Dymola. Les modèles utilisés sont brièvement présentés. La Figure 1 compare la production électrique nette annuelle ainsi que les bénéfices de fonctionnement (profit réalisé grâce à la vente d’électricité tout en assurant les besoins en chaleur et en électricité annuellement) pour les deux systèmes étudiés et pour différents climats. Il s’avère que la solution PAC/PV présente de meilleures performances tant au niveau production électrique nette qu’au niveau bénéfices de fonctionnement. Par contre, la consommation électrique de la pompe à chaleur est réduite grâce au mode chauffage direct du système PAC/ORC réversible.

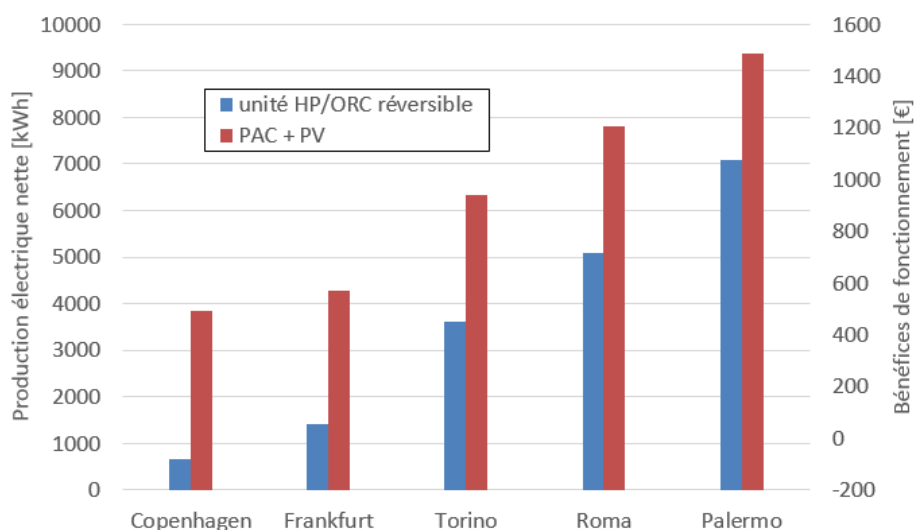


Figure 1 : Comparaison des performances annuelles des deux systèmes en termes de bénéfices de fonctionnement et de production électrique nette

Nomenclature

<i>B</i>	bénéfices de fonctionnement, €	η	rendement
<i>C</i>	prix de l'électricité, €.kWh ⁻¹	γ	facteur de couverture
<i>CD (DH)</i>	chauffage direct	<i>Indices</i>	
<i>CS</i>	chauffage sol	<i>bb</i>	revente
<i>COP</i>	coefficient de performance	<i>cons</i>	consommation
<i>ECS</i>	eau chaude sanitaire	<i>h</i>	haut(e)
<i>HVAC</i>	chauffage, ventilation et clim.	<i>I</i>	irradiation solaire
\dot{m}	débit massique, kg.s ⁻¹	<i>l</i>	bas
<i>PAC (HP)</i>	pompe à chaleur	<i>max</i>	maximum
<i>PV</i>	panneau photovoltaïque	<i>prod</i>	production
<i>ORC</i>	cycle organique de Rankine	<i>r</i>	achat (retail)
<i>T</i>	température, °C	<i>roof</i>	toit solaire
<i>W</i>	énergie, kWh	<i>sto</i>	stockage
<i>Symboles grec</i>		<i>S</i>	production
<i>D</i>	demande	<i>T</i>	thermique

1. Introduction

En 2020, les émissions de gaz à effet de serre devront être réduites de 20% comparé au niveau d'émissions des années 1990 (objectifs 20-20-20) [1]. Dans ce contexte, les ménages représentent 27% de la consommation d'énergie finale en Europe [2]. De nombreuses solutions sont investiguées dans le secteur du bâtiment afin d'atteindre ces objectifs. Parmi celles-ci, les bâtiments à énergie positive sont de plus en plus étudiés. Par ailleurs, à compter de 2019, tous les nouveaux bâtiments devront présenter une production à partir d'énergie renouvelable plus élevée que leur consommation d'énergie primaire sur base annuelle [1].

Cet article présente une technologie innovante dans le but d'obtenir un bâtiment à énergie positive : le couplage d'une unité réversible pompe à chaleur / cycle organique de Rankine (PAC/ORC) avec un bâtiment passif, un toit solaire et un échangeur géothermique [3]. Ce système est rendu flexible par la réversibilité de la pompe à chaleur (PAC) qui peut également fonctionner en mode cycle organique de Rankine (ORC). Il y a, en effet, trois modes de fonctionnement possibles. Tout d'abord, le mode pompe à chaleur permet de couvrir les besoins d'eau chaude de la maison (eau chaude sanitaire - ECS - et chauffage sol - CS) lorsque les conditions météorologiques sont défavorables en hiver. Par contre, lorsque l'ensoleillement est suffisant, la chaleur produite par le toit solaire est utilisée directement pour charger le stockage desservant l'ECS et le CS (mode de chauffage direct – CD). Enfin, lorsque le stockage est entièrement chargé (voire section 2.3), le surplus de chaleur produit par le toit solaire est utilisé pour produire de l'électricité grâce au cycle ORC.

Un tel système a été étudié pour la première fois en 2011 [4]. Cette étude a montré les avantages économiques dans le cas particulier d'une maison avec des pieux géothermiques et un collecteur solaire de taille modeste (12 m²). Par après, le concept de maison passive couplée avec un toit solaire de grande taille (138,8 m²) et couplée avec un échangeur géothermique horizontal (300 m de long) a été breveté par la compagnie Innogie (Fig. 2) [5]. Suite à cela, un dimensionnement d'optimalité [3], suivi d'une campagne d'essai [6] ont prouvé la faisabilité du système. La production électrique nominale en mode ORC est égale à 5,29 kW avec un rendement de 7% alors que le mode PAC présente une puissance thermique au condenseur de 13 kW pour un coefficient de performance nominal (COP) de 4.2 [3].

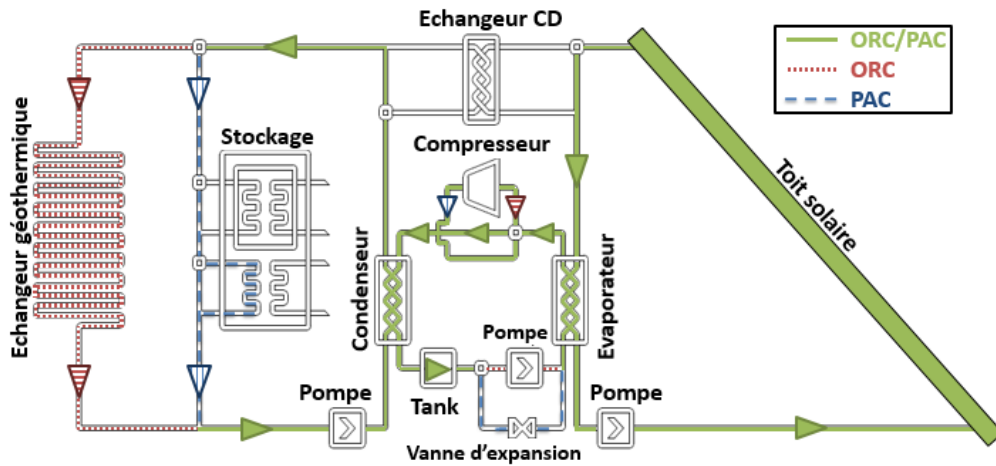


Figure 2: Représentation du système avec le stockage de chaleur, l'unité PAC/ORC réversible, l'échangeur géothermique et le toit solaire.

2. Description du modèle

Toutes les simulations sont réalisées à l'aide du logiciel Dymola/Modelica couplée aux bibliothèques Thermocycle [7] et Coolprop [8]. Le modèle de maison passive couplée au système PAC/ORC réversible, au toit solaire, à l'échangeur géothermique et au stockage pour l'ECS et le CS a été décrit en détail dans un travail antérieur [9]. Cette section fournit un bref rappel destiné à expliquer le modèle de manière concise ainsi que la stratégie de contrôle.

2.1 Sous-modèles

L'unité réversible PAC/ORC est modélisée à l'aide de modèles semi-empiriques validés sur base de données expérimentales [9]. Le modèle de stockage est le composant « Heat Storage Water Heater » de la bibliothèque Thermocycle [7]. Le toit solaire est modélisé à l'aide de la formule de Klein [10]. Le modèle de maison est un modèle 5 zones basé sur la maison prototype installée à Herning au Danemark [6]. Les gains solaires, les infiltrations, les gains dus aux consommations électriques hors HVAC (non liées au chauffage, à la ventilation et à la climatisation), la chaleur dégagée par les occupants, l'inertie due à l'ameublement sont considérés. Finalement, pour ce qui est de l'échangeur géothermique, il est démontré expérimentalement que sa température est constante quelle que soit le flux de chaleur injecté dans le sol. Ceci est dû à la présence d'un écoulement phréatique [9]. La température est donc imposée suivant les mesures sur site. Pour plus de détails sur ces différents modèles, il est recommandé de consulter [9].

Afin de comparer l'efficacité énergétique du système, l'unité PAC/ORC réversible est comparée à un autre système mature pour obtenir une maison à énergie positive : une pompe à chaleur eau/eau couplée à des panneaux photovoltaïques (PAC/PV). Les différentes hypothèses de modélisation sont détaillées ci-après. L'efficacité des panneaux photovoltaïques est évaluée en réalisant le produit (Eq. 1) du rendement thermique (η_T) et du rendement lié à l'irradiation (η_I). Ce modèle est validé à l'aide du modèle Trnsys [11].

$$\eta = \eta_I \cdot \eta_T = 0.0034 \cdot \ln(I_{glob}) + \frac{0.1592 - 0.0034 \cdot T_{out}}{0.1622} \quad (1)$$

L'aire totale des panneaux photovoltaïques est fixée de manière à obtenir une puissance crête électrique égale à celle du système PAC/ORC réversible dans des conditions nominales typiques : la température extérieure est fixée à 25°C, l'irradiation solaire est fixée à 800 W/m². Cela conduit à une puissance de 5290 W et à une aire de panneaux PV de 44 m². La PAC, la stratégie de contrôle, les consignes de températures, le modèle de bâtiment, la température du sol sont tous dimensionnés et fixés de la même manière que pour le système PAC/ORC réversible

2.2 Modèle global

La Figure 3 présente les différentes connections entre les sous-modèles afin d'obtenir le modèle global. Les variables d'entrées sont les données météorologiques en termes d'irradiation solaire, de température ambiante et de température du sol au niveau de l'échangeur géothermique ainsi que l'occupation du bâtiment et le comportement des habitants en termes de consommation électrique, charges internes et consommation d'ECS. Les données météorologiques (base de temps horaire) du Danemrak proviennent de l'institut météorologique du Danemark [13] alors que les données des autres villes proviennent de [14]. Le pas de temps pour les simulations annuelles présentées est de 900 s.

Certains paramètres sont imposés selon les valeurs mesurées dans la maison prototype : les débits d'eau dans l'échangeur géothermique (1,5 kg/s), dans le toit solaire (0,6 kg/s), dans les tuyaux reliant le stockage à la PAC/ORC (0,4 kg/s). Le débit d'eau dans le CS est ajusté afin de maintenir une température proche de 20° à l'intérieur de la zone principale du bâtiment. Ces débits devront être optimisées dans de futurs travaux afin d'augmenter l'efficacité énergétique du système [12].

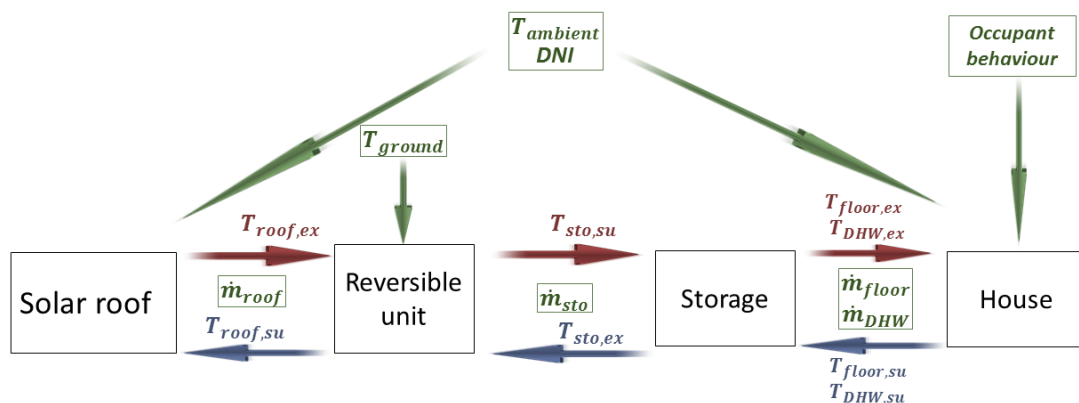


Figure 3: *Modèle global* [9]

2.3 Stratégie de contrôle

La stratégie de contrôle du système est basée sur l'idée suivante: assurer la couverture des besoins d'ECS et de CS tout en maximisant la production électrique nette du bâtiment. Pour ce faire, un seuil haut et un seuil bas de température de stockage sont optimisés selon le critère énoncé ci-dessus, respectivement à 45° et 40°C [9]. Le diagramme de contrôle basé sur une logique d'état présenté à la figure 4 montre comment le système fonctionne. Ce type de contrôle est utilisé pour sa rapidité et robustesse. La logique est la suivante : aussi longtemps qu'une transition (flèche) n'est pas valide, on reste dans le même mode.

L'initialisation est réalisée en mode bypass (mode signifiant qu'aucun des trois modes de fonctionnement n'est activé). A partir de là, si la température de contrôle du stockage (T_{sto}) descend sous le seuil bas de température de stockage ($T_{sto,l}$), le mode PAC est activé. Aussi tôt que le seuil haut ($T_{sto,h}$) est atteint à l'aide du mode PAC, le mode bypass peut être réenclenché. Si la température du toit solaire (T_{roof}) est plus élevée que la température du stockage, le mode CD peut être activé. Une fois dans ce mode, deux cas peuvent se présenter : soit la température du toit devient inférieure à la température de contrôle du stockage, soit la température de stockage atteint un seuil de température maximum ($T_{sto,max} = 90^\circ$). Dans le premier cas, on retourne en mode bypass, dans le second, on active le mode ORC si la température du toit solaire est supérieure à la température minimum de fonctionnement de l'ORC ($T_{ORC,l}$). Enfin, le mode ORC n'est désactivé que dans le cas où la production électrique nette est inférieure à zéro.

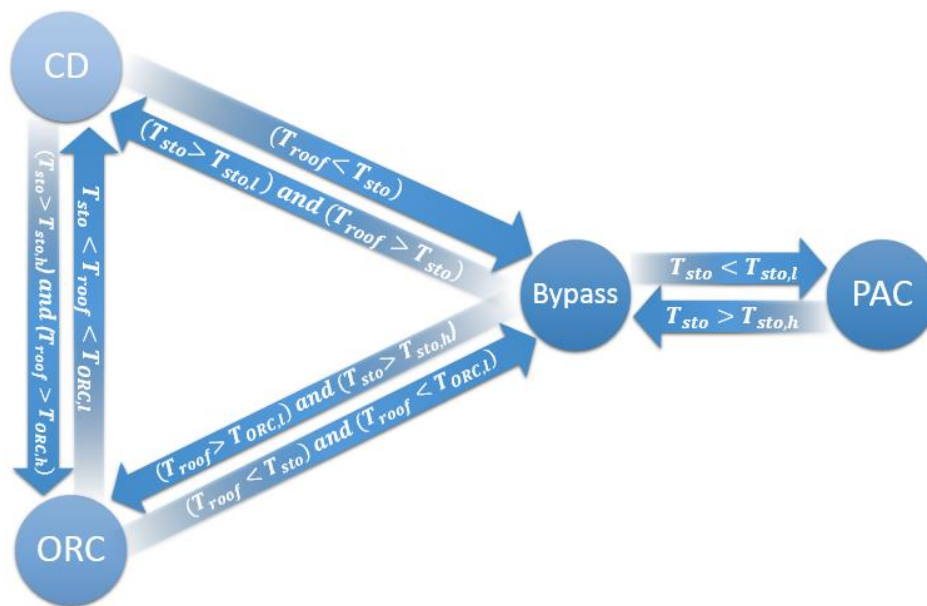


Figure 4: Stratégie de contrôle

3. Résultats

Les modèles de PAC/ORC et de PAC/PV ayant été présentés, les critères de performances annuelles sont définis et ensuite comparés dans les deux cas.

3.1 Indicateurs de performance annuelle

Les critères de performance annuelle utilisés sont :

- Production électrique brute [kWh], qui est l'énergie électrique produite par le mode ORC (ou PV).
- Consommation électrique hors HVAC [kWh], qui correspond à l'ensemble de la consommation électrique (lumière, auxiliaires...) excepté la consommation de la PAC.
- Consommation électrique totale [kWh], qui correspond à l'ensemble de la consommation électrique (HVAC et non HVAC).

- Production électrique nette [kWh], qui est égale à la production électrique brute moins la consommation électrique totale.
- Energie thermique fournie par le mode chauffage direct [kWh]
- B [€], sont les bénéfices de fonctionnement suivant la législation danoise (Eq. 2). C_r est le prix d'achat de l'électricité sur le réseau [€/kWh], $C_{r,HP}$ est le prix d'achat de l'électricité pour la PAC [€/kWh] and C_{bb} est le tarif de revente de l'électricité sur le réseau [€/kWh]. C_x est égal à C_{bb} si la production électrique est plus élevée que la consommation électrique hors HVAC et égal à C_r dans le cas contraire. kW_{ORC} est la puissance électrique de l'ORC [kW], $kW_{cons,l-a}$ est la consommation électrique totale hors HVAC et kW_{HP} est la puissance électrique consommée par la pompe à chaleur. Les tarifs liés à la vente et à l'achat d'électricité proviennent des données réelles [15].

$$B = \int_0^t (C_x (kW_{ORC} - kW_{cons,l-a}) - C_{r,HP} \cdot kW_{HP}) \cdot dt \quad (2)$$

- Facteur de couverture de production (γ_S), Il donne une image de la fraction de l'énergie produite par l'ORC (ou le PV) qui est directement consommé dans la maison (Eq. 3).

$$\gamma_S = \frac{\sum \min (W_{cons.}, W_{prod})}{\sum W_{prod}} \quad (3)$$

- Facteur de couverture de demande (γ_D), Il donne une image de la fraction de l'énergie consommée qui a été produite par l'ORC (ou le PV) (Eq. 4).

$$\gamma_D = \frac{\sum \min (W_{cons.}, W_{prod})}{\sum W_{cons.}} \quad (4)$$

3.2 Comparaison des performances du système PAC/PV et du système PAC/ORC réversible

Le tableau 1 reprend l'ensemble des critères de performance annuelle pour le système PAC/ORC et PAC/PV. Tout d'abord, la consommation électrique de la pompe à chaleur est plus élevée dans le cas du système PAC/PV car il ne bénéficie pas des 1394 kWh fourni par le CD dans le cas du système PV/ORC. D'autre part, la production électrique brute est inférieure pour le système PAC/ORC réversible. Ceci est dû à deux raisons principales. D'une part, le mode ORC ne peut être activé lorsque le mode CD l'est déjà, réduisant ainsi le temps de production électrique. De plus, le rendement du PV est stable quelques soient les conditions. Or, le système PAC/ORC réversible est combiné à un toit solaire dont les performances sont largement influencées par la température ambiante et l'irradiation solaire.

Système	PAC/PV	PAC/ORC
---------	--------	---------

Consommation hors HVAC [kWh]		1491
Consommation électrique de la PAC [kWh]	1185	812
Production électrique brute [kWh]	6511	2970
Production électrique nette [kWh]	3835	667
Besoins en chaleur annuels (ECS+CS) [kWh]		4403
Energie thermique fournie par le mode de chauffage direct [kWh]	0	1394
Bénéfices de fonctionnement [€]	494	-78
Facteur de couverture de production [-]	9,1	8,9
Facteur de couverture de consommation [-]	39	9,2

Tableau 1 : Comparaison des performances annuelles du système PAC/PV et du système PAC/ORC

Suite à cette constatation, il est logique que la production électrique annuelle nette et les bénéfices de fonctionnements soient nettement plus élevés pour le système PAC/PV. Enfin, les facteurs de couverture de production et de consommation sont plus faibles pour le système PAC/ORC réversible. La figure 5 permet d'en comprendre la raison à l'aide de la simulation d'une journée type en été. Le pic de consommation journalier, apparaissant entre 18h et 19h, peut être couvert partiellement par le PV alors que le système réversible HP/ORC estompe sa production peu avant 18h.

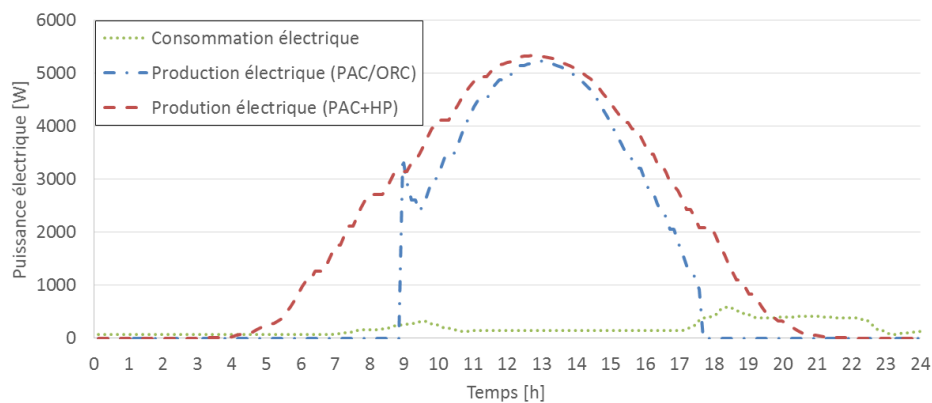


Figure 5 : Comparaison des productions électriques du système PAC/PV et du système PAC/ORC avec les consommations des lampes et auxiliaires au cours d'une journée type d'été.

Finalement, une étude comparative réalisée avec 5 climats typiques d'Europe (Figure 1) montre que le système PAC/ORC devient de plus en plus compétitif avec le système PAC/PV lorsque l'on se déplace vers le sud. Et, ce, car on bénéficie davantage du chauffage direct mais aussi car l'ORC et le toit solaire fonctionnent une plus grande partie du temps au point nominal.

4. Conclusion

En conclusion, cet article démontre que dans le cas d'étude précis qui a été étudié (stockage de 500 litres, maison prototype passive danoise, climat et législation danois...) le système PAC/PV est plus performant selon plusieurs points de vue : La production électrique nette est supérieure malgré une consommation de PAC plus importante. Les bénéfices de fonctionnements sont supérieurs et, enfin, la correspondance temporelle entre la production et la consommation d'électricité est meilleure.

Une étude d'influence sur différents paramètres devra être réalisée. Il a, notamment, été montré que certaines locations méridionales sont plus propices au système PAC/ORC

réversible. Par ailleurs, l'utilisation d'un stockage de plus gros volume, d'enveloppes de maison moins bien isolées thermiquement, l'utilisation d'un contrôle basé sur les prédictions (météorologiques, comportement habitant et prix d'électricité) devraient également être plus favorable au système PAC/ORC réversible.

Références

- [1] European Commission, Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions (Brussel, 2012).
- [2] European Commission, Market observatory for energy (2011).
- [3] S. Quoilin, O. Dumont, V. Lemort, Design, modeling and performance optimisation of a reversible HP-ORC prototype, *2nd International Seminar on ORC Power Systems* (Rotterdam, 2013).
- [4] S. Schimpf, K. Uitz, R. Span, Simulation of a solar assisted combined heat pump-organic Rankine cycle system, *World renewable Energy Congress* (2011 Sweden).
- [5] Innogie ApS, Thermal solar absorber system generating heat and electricity, United States Patent Application Publication, *US 2013/025778 A1* (2013).
- [6] O. Dumont, S. Quoilin, V. Lemort, Design, modeling and experimentation of a reversible HP-ORC prototype, *ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition* (Dusseldorf, 2014).
- [7] S. Quoilin, A. Desideri, J. Wronski, I. Bell, V. Lemort, ThermoCycle: A Modelica library for the simulation of thermodynamic systems, *10th International Modelica Conference, Modelica Association.*, 10.3384/ECP14096683 (Lund, 2014).
- [8] Coolprop library, <http://www.coolprop.org>, consulté le 5 janvier 2015.
- [9] O. Dumont, C. Carmo, F. randaxhe, S. Quoilin, V. Lemort, Simulation of a passive house coupled with a heat pump/organic Rankine cycle reversible unit, *9th International Conference on System Simulation in Buildings* (Liege, 2014).
- [10] S. A. Klein, Calculation of flat-plate loss coefficient, *Solar Energy*, 17 (1975).
- [11] Trnsys, <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/>, consulté le 5 janvier 2015.
- W. De Soto, S. Klein, W. Beckman, Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, *Solar Energy*, 80, 78-88 (2006).
- [12] E. A. Wystrcil, Model-based optimization of control strategies for low-exergy space heating systems using an environmental heat source, *13th Conference of International Building Performance Simulation Association* (Chambéry, 2013)
- [13] P.G. Wang, M. Scharling, K. P. Nielsen, C. Kern-Hansen, Technical Report 13-19: 2001 – 2010 Danish Design Reference Year, *Climate Dataset for Technical Dimensioning in Building, Construction and other Sectors*, <http://www.dmi.dk/fileadmin/Rapporter/TR/tr13-19.pdf> (2010).
- [14] Site internet de Wunderground, <http://www.wunderground.com/>, consulté le 5 janvier 2015.
- [15] Energynet, <http://energynet.dk/DA/EI/Solceller/Har-du-solceller/Sider/Pristillaeg.aspx>, consulté le 5 janvier 2015.