

# La batterie de Carnot, une technologie prometteuse de stockage de l'électricité

Vincent LEMORT

*Laboratoire de Thermodynamique, Université de Liège, Belgique, [vincent.lemort@uliege.be](mailto:vincent.lemort@uliege.be)*

**RÉSUMÉ.** Face aux enjeux sociétaux liés au dérèglement climatique, il est nécessaire de développer des machines thermodynamiques qui permettent de produire et stocker de la chaleur, du froid et de l'électricité de manière efficace, fiable et à un coût qui permet leur déploiement. Les hybridations entre une machine à cycle de Rankine organique et une pompe à chaleur à compression de vapeur, en particulier la batterie de Carnot, offrent des solutions prometteuses. Dans cet article, différents développements de prototypes et applications de batteries de Carnot seront présentés, soulignant les nombreux enjeux de recherche et développement, en lien avec les limites de la thermodynamique, auxquels le Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège tente de répondre.

**ABSTRACT.** In the context of societal challenges related to climate change, it is necessary to develop thermal machines that can efficiently and reliably produce and store heat, cold and electricity, and be cost-effective to allow for their widespread deployment. Hybridizations between an Organic Rankine Cycle module and a vapor compression heat pump offer promising solutions, which is particularly true for the Carnot battery. In this paper, different prototypes developments and applications of Carnot batteries will be presented, stressing the many research and developments challenges faced by the Thermodynamics Laboratory of the University of Liège, in relation with the limits of thermodynamics.

**MOTS-CLÉS.** Batterie de Carnot, ORC, pompe à chaleur, chaleur fatale, stockage de l'électricité, chaleur, froid

**KEYWORDS.** Carnot battery, ORC, heat pump, waste heat, electricity storage, heat, cold

## 1. Introduction

La région liégeoise a été l'un des témoins principaux du déploiement des machines à vapeur déjà du temps de Sadi Carnot. À l'Université de Liège, dans la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, les étudiants avaient l'occasion de travailler sur des modèles de pièces de machines dans un atelier de construction qui était équipé d'une machine à vapeur [1]. Mais il ne s'agissait pas encore d'un laboratoire de recherche à proprement parler. Il faut attendre les années 1880 pour voir la création du Laboratoire de thermodynamique de l'Université de Liège par le Prof. Dwelshauvers-Dery et avec le soutien de Hirn. Le laboratoire a immédiatement fait de la machine à vapeur son sujet d'étude expérimentale principal [1]. Sa première publication (en 1887) est probablement un rapport d'essais d'une chaudière à vapeur. Au tout début du XX<sup>e</sup> siècle, le laboratoire a été pionnier dans l'utilisation des thermocouples comme moyen de mesure intrusif, ce qui a notamment permis de mieux comprendre le comportement de la vapeur évoluant à l'intérieur d'une machine à piston [1]. Tout au long du XX<sup>e</sup> siècle, le laboratoire a suivi l'évolution des techniques, apportant une contribution scientifique en développant et exploitant des méthodes numériques et expérimentales : les moteurs à combustion, la réfrigération, le chauffage et la climatisation des bâtiments, la production centralisée d'électricité (y compris nucléaire), la propulsion aéronautique, la thermique des véhicules, les réseaux d'énergie thermique, etc. Aujourd'hui encore, l'équipe de recherche du Laboratoire étudie différents systèmes énergétiques thermiques à différentes échelles. En particulier, elle s'intéresse aux machines à compression de vapeur, en mode récepteur (production de chaleur et de froid au moyen de pompes à chaleur) et moteur (production de travail au moyen de cycles de Rankine organiques). Dans cet article, nous tentons de montrer comment ces deux machines, et les cycles thermodynamiques qu'elles décrivent, peuvent être hybridées pour offrir des technologies répondant aux enjeux de notre société : la production (décarbonée) et le stockage de la chaleur et du froid (dont la demande ne fait qu'augmenter) et le stockage de l'électricité.

## 2. Le cycle de Rankine organique (ORC)

Les ORC s'apparentent à des cycles de Rankine conventionnels. Ils comportent en effet une chaudière, une turbine, un condenseur et une pompe. À la différence des cycles de Rankine conventionnels, ils n'utilisent pas l'eau comme fluide de travail mais un fluide « organique », c'est-à-dire qui contient du carbone. Ces fluides sont caractérisés par des points d'ébullition normaux plus faibles que l'eau ce qui permet de valoriser des sources de chaleur à basse température et des sources de capacités thermiques limitées [2].

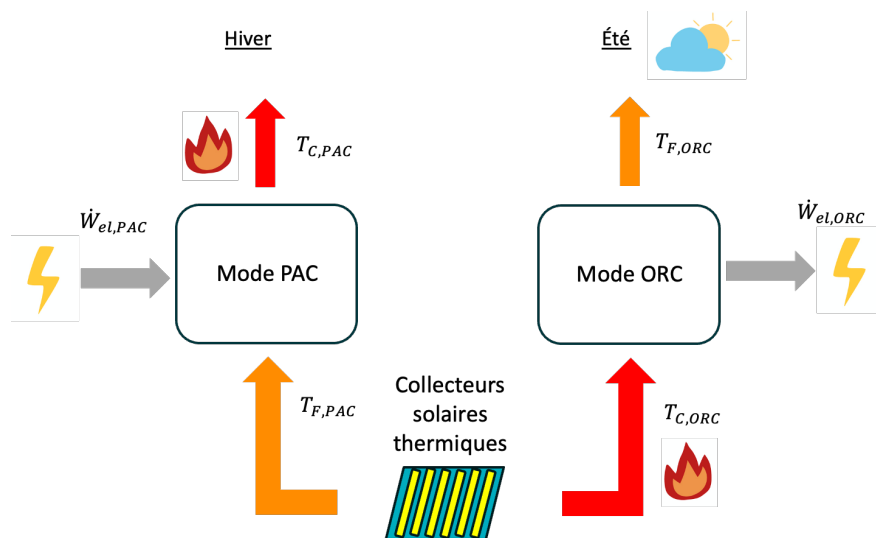
Un autre intérêt de l'ORC est d'être un moteur à combustion externe, ce qui permet de valoriser un large panel de sources de chaleur : la chaleur fatale issue de procédés industriels, l'énergie solaire, la géothermie, ou bien la chaleur générée par la combustion de la biomasse (qu'elle soit liquide, solide ou gazeuse).

## 3. La réversibilité (« inversabilité ») des PAC-ORC

La proximité technique entre un ORC et une pompe à chaleur (PAC) est remarquable. Ils partagent des composants « inversibles » : le compresseur volumétrique peut fonctionner en expanseur, les échangeurs peuvent assurer à la fois les fonctions d'évaporateur et de condenseur et le fluide de travail peut être commun aux deux modes (pour autant que les niveaux de température le permettent et moyennant un ajustement de la charge en fluide). Une seule machine pourrait ainsi être conçue de sorte à être inversible et fonctionner soit en mode ORC, soit en mode PAC.

### 3.1. PAC inversible pour la production d'électricité

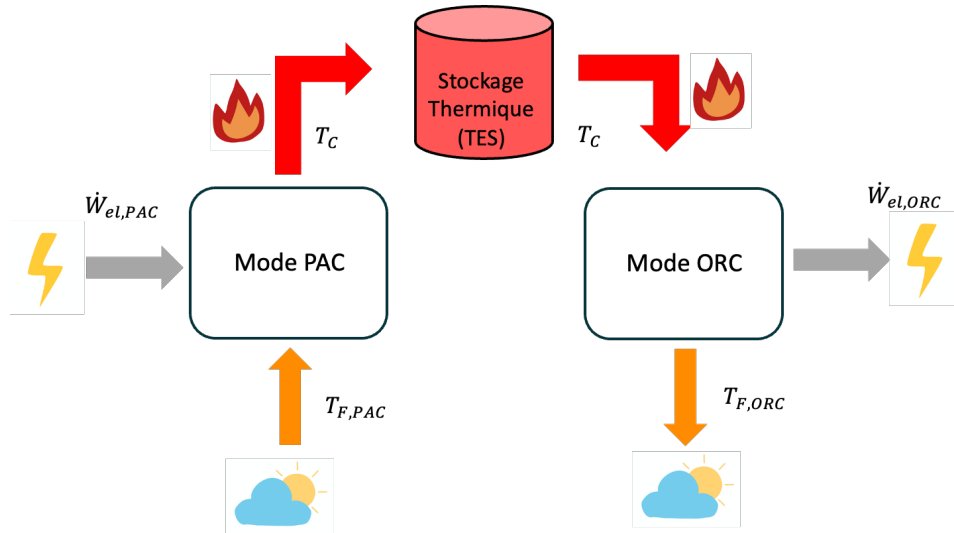
Sous l'impulsion et en partenariat avec une société danoise, le laboratoire de thermodynamique a étudié l'association d'une telle machine inversible à des panneaux solaires thermiques (figure 1) [3]. Ces panneaux qui produisent de l'eau chaude constituent la source froide ( $T_{F,PAC}$ ) de la machine fonctionnant en mode PAC en hiver. Ces mêmes panneaux deviennent la source chaude ( $T_{C,ORC}$ ) de la machine fonctionnant en ORC en été. Un prototype a été construit et testé. La machine affichait des performances prometteuses [4] : un COP de 3.1 (températures d'évaporation et de condensation de 21 °C et 61 °C) et un rendement d'ORC de 4.2 % (températures d'évaporation et de condensation de 88 °C et 25 °C). Malheureusement la rentabilité économique d'une telle installation n'a pas été démontrée face à une solution concurrente qui consiste à utiliser des panneaux photovoltaïques (dont le coût a chuté) et une PAC.



**Figure 1** — Utilisation d'une PAC-ORC inversible pour la production d'électricité ou de chaleur au moyen de collecteurs solaires thermiques.

### 3.2. PAC inversible pour le stockage de l'électricité (la batterie de Carnot)

L'enjeu sociétal actuel n'est pas tellement de produire de l'électricité (dans un contexte d'installation croissante de panneaux PV et d'éoliennes), mais bien de stocker l'électricité produite par ces sources d'énergie renouvelable intermittentes. La batterie de Carnot, une technologie permettant de stocker de l'électricité, peut trouver un intérêt à exploiter une machine à la fois motrice et réceptrice. La batterie de Carnot étudiée intègre une PAC-ORC inversible et un stockage thermique (figure 2).



**Figure 2** — Utilisation d'une PAC-ORC inversible pour le stockage d'électricité au moyen d'une batterie de Carnot.

#### 3.2.1. Fonctionnement

En mode PAC, l'électricité est consommée pour produire de la chaleur. Cette chaleur est stockée à un niveau de température  $T_C$  pour être reconvertie plus tard en électricité au moyen de la machine opérant en mode ORC. Deux remarques importantes doivent être formulées :

- 1) La PAC et l'ORC peuvent être deux machines différentes. Le fait d'utiliser une machine inversible doit simplement permettre de réduire le coût d'investissement.
- 2) D'autres technologies que les machines à compression de vapeur peuvent être utilisées, par exemple des machines à cycle de Brayton.

#### 3.2.2. Rendement charge-décharge

Le rendement charge-décharge peut s'exprimer par le produit du COP de la pompe à chaleur et du rendement de l'ORC. On suppose que les pertes thermiques du stockage sont négligeables. On peut exprimer le rendement de l'ORC et le COP de la PAC en fonction du rendement et du COP de Carnot en introduisant les rendements du second principe. En considérant les températures indiquées à la figure 2, nous avons :

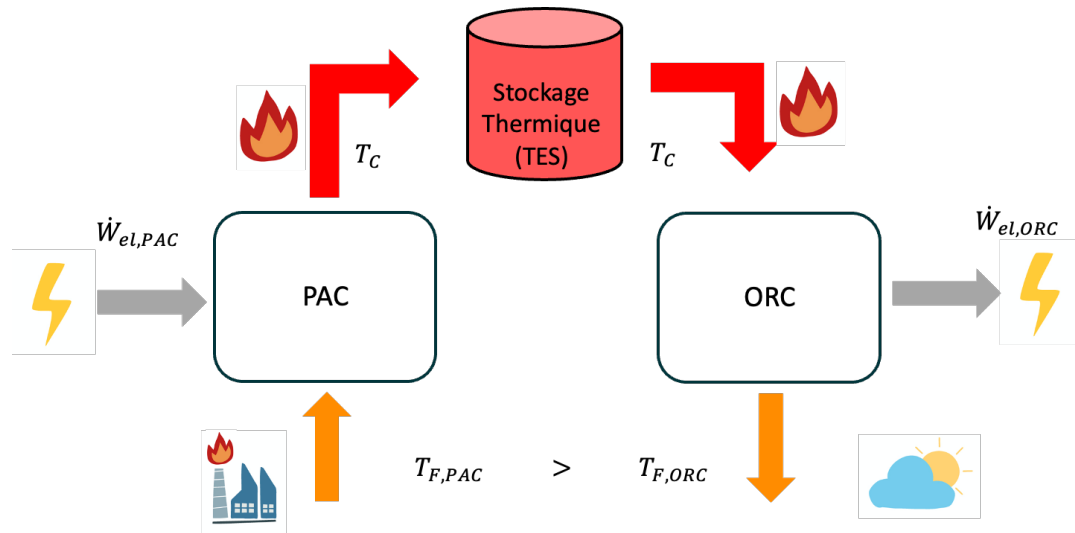
$$RTE = \frac{W_{el,ORC}}{W_{el,PAC}} = (\eta_{sto}) COP_{PAC} \eta_{ORC} = (\eta_{sto}) \eta_{II,PAC} \frac{T_C}{T_C - T_{F,PAC}} \eta_{II,ORC} \left(1 - \frac{T_{F,ORC}}{T_C}\right)$$

Dans le cas où la température de la source froide de la PAC et celle de l'ORC sont égales, on a simplement que le rendement charge-décharge est égal au produit des rendements du second principe :  $RTE = \eta_{II,PAC} \eta_{II,ORC}$ . En supposant des rendements du second principe de 70 % (évaluation optimiste),

la valeur du RTE est proche de 50 %, valeur qui reste largement inférieure à ce qu'on pourrait obtenir avec une batterie électrochimique.

### 3.2.3. Batteries de Carnot intégrées thermiquement

On pourrait augmenter le rendement charge-décharge en augmentant la température de la source froide de la PAC ( $T_{F,PAC}$ ), par exemple en exploitant de la chaleur fatale produite par un procédé industriel (figure 3). Cette configuration est appelée « batterie de Carnot intégrée thermiquement ».



**Figure 3** — Batterie de Carnot intégrée thermiquement en valorisant une source de chaleur fatale à  $T_{F,PAC}$ .

Une des questions majeures est de déterminer la température optimale du stockage de chaleur. Cette question a été traitée par Antoine Laterre [5] qui a considéré, en première approximation, que la PAC et l'ORC sont endoréversibles et a retenu comme seule source d'irréversibilité le pincement de température  $\Delta T$  dans les échangeurs. Il montre ainsi que le rendement charge-décharge (RTE) est donné par

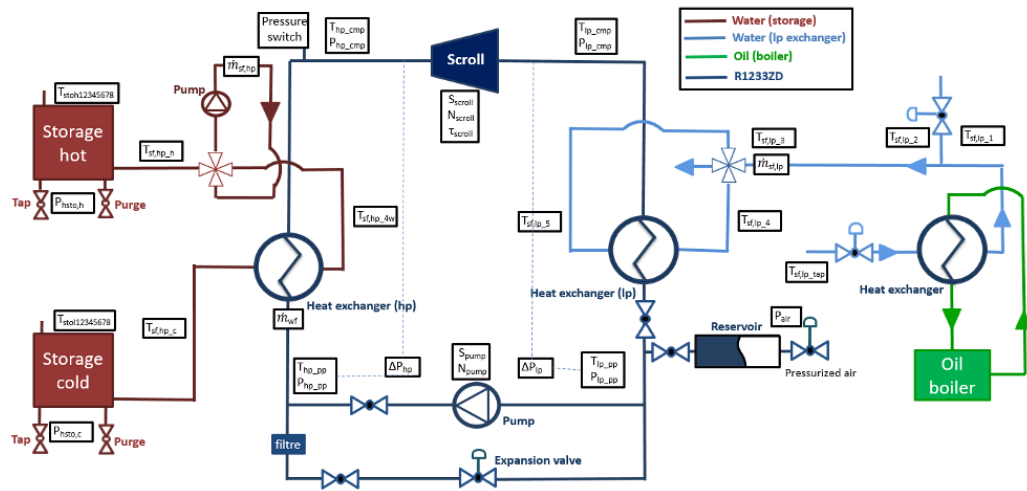
$$RTE = \frac{T_C + \Delta T}{T_C - T_{F,PAC} + 2\Delta T} \times \frac{T_C - T_{F,ORC} - 2\Delta T}{T_C - \Delta T}$$

Cette équation indique que le rendement charge-décharge de la batterie de Carnot n'évolue pas de la même manière avec la température du stockage selon la différence entre la température de la source froide de la PAC et celle de l'ORC ( $T_{F,PAC} - T_{F,ORC}$ ). Lorsque cette différence est supérieure à 30 K, on a intérêt à limiter la température du stockage. On peut en effet montrer qu'en diminuant la température du stockage, le COP de la PAC augmente plus fort que la diminution du rendement de l'ORC. Le cycle thermodynamique de la PAC « s'écrase » dans le diagramme T-s. Le système dégénère ainsi progressivement en un simple système de captation, stockage et conversion de la chaleur fatale en électricité. Dès lors, en fonction de la température extérieure ( $T_{F,ORC}$ ), la batterie de Carnot est pertinente pour des sources de chaleur fatale entre approximativement 50 et 70 °C. Au-delà de 90 °C, il est certainement plus intéressant de convertir la chaleur fatale en électricité au moyen d'un ORC seul.

## 4. Travaux expérimentaux sur les batteries de Carnot « réversibles »

Un premier prototype de batterie de Carnot a été testé et opéré au laboratoire de thermodynamique. La construction d'un second s'achève et la construction d'une troisième démarre. Les essais sur le premier prototype, représentant une batterie de Carnot intégrée thermiquement (une chaudière à huile simulait la chaleur fatale), ont démontré qu'un RTE de 72.5 % pouvait être atteint (rendement de l'ORC de 5 %

(chute de température de 49 K) et COP de la PAC de 14.4 (saut de température de 8 K)). En mode décharge, une puissance proche de 900 W a été produite [6].



**Figure 4** — Schéma du premier prototype de batterie de Carnot [6].

Comme le montrent les figures 4 et 5, le stockage thermique du premier prototype est un stockage d'eau chaude. Selon le mode charge ou décharge, l'eau circule dans un sens ou dans l'autre, entre un réservoir chaud et un réservoir froid et est réchauffée ou refroidie. Le second prototype devrait produire une puissance de l'ordre de 5 kWe. Le stockage de chaleur est toujours de type sensible, mais une seule cuve est utilisée plutôt que deux. Un front dont la position varie, sépare la poche d'eau chaude de la poche d'eau froide (stockage thermocline).



**Figure 5** — Vues des deux premiers prototypes de batterie de Carnot (gauche : 1 kW ; droite : 5 kW).

Ce deuxième prototype doit permettre de répondre à deux questions de recherche :

- 1) Quel bénéfice apporte la gestion de la charge de fluide lors du passage d'un mode à l'autre ?
- 2) Quelle est la dynamique de la batterie de Carnot et quels sont les services qu'elle peut fournir au réseau électrique ?

## 5. Batteries de Carnot associées à la géothermie minière

Le troisième prototype de batterie de Carnot, fonctionnant au R1233zd(E) comme les deux premiers, produira une puissance de 50 kWe. La machine d'expansion sera à vis. Le stockage de chaleur consistera en des galeries de mine de schiste abandonnées et noyées d'eau [7]. En exploitant différentes chambres, trois réservoirs d'eau seront isolés (figure 6) : un premier volume de 800 m<sup>3</sup> évoluant entre 70 et 90 °C, un volume de 6 840 m<sup>3</sup> entre 40 et 50 °C et un volume de 20 000 m<sup>3</sup> entre 5 et 10 °C. Le réservoir à haute température sera chauffé par des résistances électriques (qui présentent l'intérêt d'être très réactives et de ne pas produire simultanément du froid) et éventuellement par une pompe à chaleur. L'ORC fonctionnera entre le réservoir à haute température et celui à basse température. L'activation de l'ORC ou des résistances (ou de la PAC) dépendra des marchés de l'électricité [8]. Le réservoir à basse température pourra couvrir la demande de froid de bâtiments et d'utilisateurs en surface. Le réservoir à moyenne température permettra aussi de couvrir la demande de chaleur.

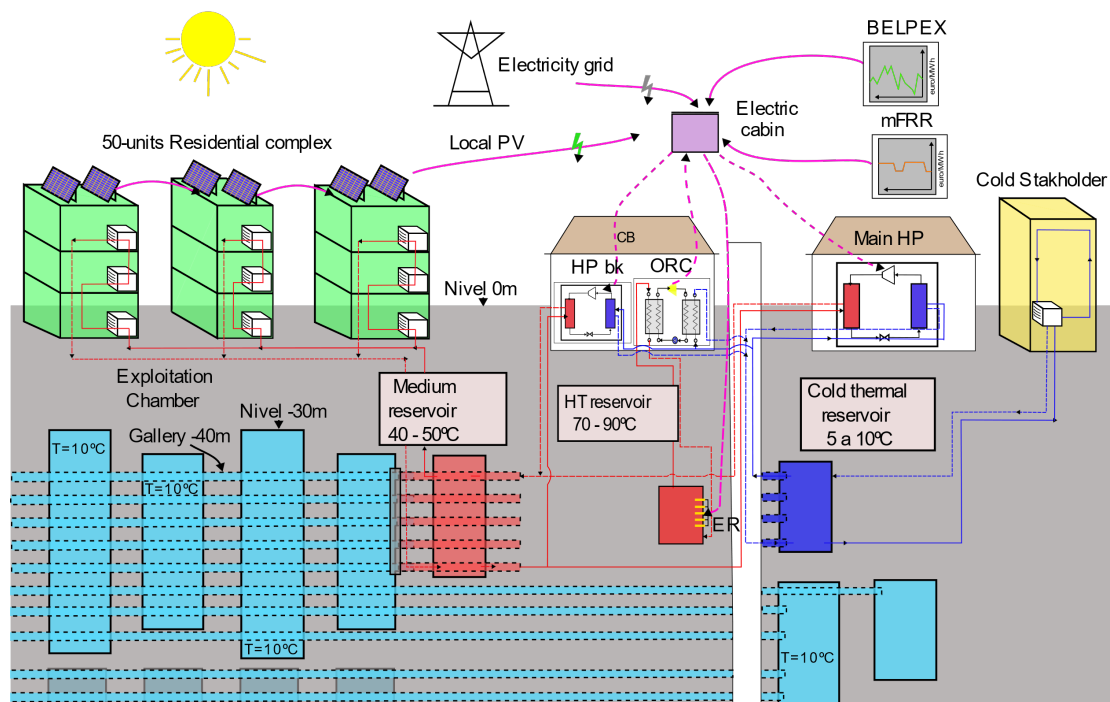


Figure 6 — Batterie de Carnot exploitant des anciennes mines noyées d'eau [8].

## 6. Batteries de Carnot et stockage de froid

Les batteries de Carnot présentent l'intérêt économique d'offrir des services d'équilibrage aux réseaux électriques. Aussi, les stockages de chaleur et de froid peuvent être utilisés pour couvrir des demandes thermiques. Un autre champ d'application concerne les sites en réseau isolé. Dans l'application présentée dans cette section, la batterie de Carnot est intégrée dans une ferme au Nigéria, ferme qui est connectée à un réseau électrique peu fiable [9]. La batterie de Carnot produit du froid et du chaud. La chaleur est stockée sous forme sensible et le froid est stocké sous forme de glace. L'électricité est utilisée pour entraîner des pompes d'irrigation et un système d'éclairage. Le stockage de froid est lui utilisé pour couvrir en partie la demande de froid pour la conservation des aliments.

Dans les applications de batterie de Carnot traitées dans les sections précédentes, le stockage de chaleur, et éventuellement de froid, se présentait sous forme sensible, ce qui peut présenter l'inconvénient d'un manque de compacité. En stockage sensible, la compacité augmente en effet avec la variation de température de l'eau (différence entre les températures initiale et finale du stockage). Toutefois, des grandes variations de température nuisent à la performance de la PAC et de l'ORC, soulignant ainsi un des compromis qui doit être trouvé (performance-compacité) lors de la conception



## Remerciements

Le Laboratoire de Thermodynamique remercie la Région wallonne de Belgique (projet ArdNrgy), le Fonds National de la Recherche Scientifique (convention n° R.8003.23) et l'Union européenne (conventions n° 851541 (REGEN-BY-2), 101123556 (Weforming), 963530 (Reptes)) pour leurs soutiens financiers.

## Références bibliographiques

- [1]LEMORT V. (2023), *Essor de la pratique expérimentale dans l'étude et l'enseignement de la Thermodynamique Appliquée à l'Université de Liège de 1868 à 1914*. Histoire. [\(dumas-04558946\)](#).
- [2]MACCHI E. , 1 – *Theoretical basis of the Organic Rankine Cycle*, Editor(s) : *Ennio Macchi, Marco Astolfi*, *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*, Woodhead Publishing, 2017, p. 3-24, ISBN 9780081005101.
- [3]DUMONT O., CARMO C., FONTAINE V., RANDAXHE F., QUOILIN S., LEMORT V., ELMEGAARD B., MAD S P., BRIAN N. (2018), "Performance of a reversible heat pump/organic Rankine cycle unit coupled with a passive house to get a positive energy building", *Journal of Building Performance Simulation*, doi : 10.1080/19401493.2016.1265010.
- [4]DUMONT O., QUOILIN S. & LEMORT V. (June 2015), "Experimental investigation of a reversible heat pump / organic Rankine cycle unit designed to be coupled with a passive house (Net Zero Energy Building)", *International Journal of Refrigeration*, 54, p. 190-203, doi : 10.1016/j.ijrefrig.2015.03.008.
- [5]LATERRE A. *et al.*, "Extended mapping and systematic optimisation of the Carnot battery trilemma for sub-critical cycles with thermal integration", *Energy*, Volume 304, 2024.
- [6]DUMONT O., CHARALAMPIDIS A., LEMORT V. & KARELLAS S. (2021), "Experimental investigation of a thermally integrated Carnot battery using a reversible heat pump/organic Rankine cycle", *In Proceedings of the 18th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*.
- [7]CENDOYA A., RANSY F., LEMORT V., KOZLOWSKA N., DEWALLEF P. & WINDESHAUSEN J. (2024), "Modelling and simulation of a seasonal underground water storage coupled with photovoltaic panels, heat pump and district heating network for providing local renewable heating to a residential district" *in Proceedings of ecos 2024 - the 37<sup>th</sup> international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems* (p. 12), Rhodes, Unknown/unspecified : ECOS2024.
- [8]CENDOYA A., RANSY F., LEMORT V., HERNANDEZ NARANJO J. A., DEWALLEF P., GRESSE P.-H. & WINDESHAUSEN J. (14 July 2024), *Modelling and Simulation of a Carnot Battery Coupled to Seasonal Underground Stratified Thermal Energy Storage for Heating, Cooling and Electricity Generation* [Paper presentation]. HERRICK CONFERENCES 2024 - High Performance Buildings Conference, West-Lafayette, United States - Indiana.
- [9]GUO B. & LEMORT V. (2024), "Designing of an Off-Grid Reversible Heat Pump/Organic Rankine Cycle System for Electricity and Cooling Demands of a Nigerian Family Farm", *In 37<sup>th</sup> International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, ECOS2024.
- [10]LECLERCQ N., BEDERNA B. G. & LEMORT V. (2024), "Experimental Testing of a Scroll Compressor with Two-Phase Refrigerant Flows", *In Springer Proceedings in Energy*. Springer Nature Switzerland, doi:10.1007/978-3-031-42663-6\_19.