

Etude expérimentale et numérique d'un Cycle de Rankine à fluide Organique (ORC) appliquée aux Réacteurs à Eau Pressurisée (REP)

Guillaume LHERMET^{1,2}, Nicolas TAUVERON², Nadia CANEY² et Franck MORIN¹

¹CEA, DES, DER, SESI, F-13108 Saint Paul Lez Durance, France

²Univ. Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France, CEA, LITEN, F-38054, Grenoble, France

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la mise au point de systèmes passifs dans l'architecture de systèmes de sauvegarde de réacteurs à eau pressurisées (REP) avancés : le couplage entre un condenseur de sûreté et un cycle de Rankine à fluide Organique (ORC). L'étude expérimentale se concentre sur la fiabilité du cycle ORC en réponse à deux situations hors nominales: l'entrée de fluide en diphasique dans la turbine et la montée en température de la source froide.

Nomenclature

| | | | |
|-----------------------|--------------------------------------|------------------|-------------------------------------|
| <i>Symboles</i> | | in | Entrée |
| h | Enthalpie spécifique, [kJ/kg] | is | Isentropique |
| \dot{m} | débit massique, [kg/s] | out | Sortie |
| N | Vitesse de rotation, [tr/min] | sc | Source chaude |
| N_s | Vitesse spécifique, [-] | tur | Turbine |
| P | Pression, [Pa] | <i>Acronymes</i> | |
| \dot{q} | Débit volumique, [m ³ /s] | APS | Capteur de pression absolue |
| Q | Puissance thermique, [kW] | EES | Engineering Equation Solver |
| W | Puissance, [kW] | EFM | Débitmètre électromagnétique |
| x | Titre vapeur, [-] | GWP | Potentiel de réchauffement global |
| <i>Symboles grecs</i> | | ODP | Potentiel de Déplétion Ozonique |
| Δ | Delta | ORC | Cycle de Rankine à fluide Organique |
| η | Rendement, [-] | PFD | Process Flow Diagram |
| π | Rapport de pression, [-] | PID | Proportionnel Intégral Dérivé |
| <i>Indices</i> | | REP | Réacteur à Eau Pressurisée |
| elec | Electrique | SBO | Station BlackOut |
| f | Fluide de travail | | |

1. Introduction

Lors de l'arrêt de la réaction nucléaire au sein du cœur du réacteur, les produits de fission présents dans le cœur continuent de produire de la chaleur : il s'agit de la chaleur résiduelle du cœur du réacteur. Cette puissance résiduelle ne chute pas immédiatement à une valeur nulle mais décroît progressivement en fonction du temps de refroidissement [1]. Au moment de l'arrêt du réacteur cette puissance résiduelle est égale à 7% de la puissance nominale thermique du réacteur. Au bout de 5h, cette puissance n'en vaut plus que 1%. [2]

Pour éviter tout risque de surchauffe du cœur, il est nécessaire d'évacuer cette chaleur résiduelle. Une solution de plus en plus utilisée dans les designs des centrales consiste en l'installation de condenseur passif de sûreté. On peut notamment citer le REP américain AP1000 ou encore le REP chinois HPR1000. [3] [4] Le principal atout des condenseurs passifs de sûreté réside dans leur fiabilité du fait de leur passivité. En effet le refroidissement du cœur

du réacteur se fait uniquement par convection naturelle, en plaçant la source froide en hauteur. Cette source froide peut être de l'air (VVER Russe [5]) ou de l'eau (AP1000 ou HPR1000) (Figure 1).

L'idée motrice de ce travail est de venir utiliser l'énergie stockée dans cette piscine de refroidissement à saturation pour alimenter un ORC en source chaude. L'autonomie en énergie de cette technologie lui permettra d'intervenir en cas de coupure de la centrale de tout apport d'énergie externe : Station BlackOut (SBO). Il est ainsi nécessaire de démontrer la robustesse ainsi que la fiabilité de ce système. Pour ce faire, des essais expérimentaux ont été réalisés sur un ORC expérimental en essayant de reproduire des conditions de fonctionnement hors nominales, voire dégradées.

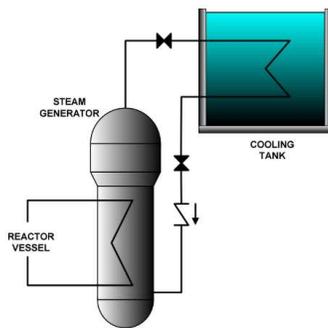


Figure 1 : Condenseur de sécurité utilisant l'eau [6]

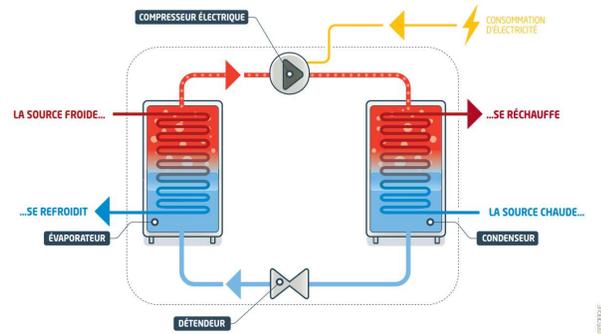


Figure 2 : Schéma d'un ORC [7]

2. Cycle de Rankine à fluide Organique

2.1. Générale

Les ORC sont des cycles thermodynamiques ayant pour but de produire de l'énergie mécanique à partir d'une source d'énergie thermique. Un des intérêts de ce cycle réside dans sa capacité à valoriser des températures de source chaude, dites à basse et moyenne température : soit inférieur à 300 °C pour une production d'électricité variant du kW au MW. [8] [9] [10]

Aujourd'hui les ORC sont des cycles très utilisés dans l'industrie : presque 300 MW de production installées pendant l'année 2019 [11]. Cependant, bien que fortement rependue dans l'industrie, cette technologie est un important sujet de recherche [12].

De nombreux fluides de travail existent. Ils sont choisis en fonction des gammes de température/pression de l'ORC, pour leur dangerosité d'utilisation (toxicité, inflammabilité ...) ainsi que pour des critères environnementaux comme le Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP) ou encore le Potentiel de réchauffement global (GWP). De plus, suite aux restrictions imposées par les protocoles de Montréal et Kyoto, les Hydrofluorocarbures (HFC), fluides à forts GWP extrêmement utilisés, seront interdits dans les prochaines décennies. [8] [13]

Récemment de nombreuses études sur des fluides de travail de type Hydrofluoroethers (HFE), un type de fluide identifié spécifiquement pour remplacer les HFC, ont été publiés. [14] [15] Ces fluides ont un ODP nul.

2.2. Installation ORC expérimentale

Le Process Flow Diagram (PFD) de l'installation est présenté en Figure 3. Au sein de celle-ci, le fluide de travail, à l'état liquide, passe au niveau de pression haut grâce à la pompe volumétrique. En fonctionnement nominal, le fluide est ensuite chauffé, évaporé et éventuellement surchauffé au contact de la source chaude par l'intermédiaire du préchauffeur et de l'évaporateur. Il est détendu dans la turbine, produisant un travail mécanique transformé en électricité via une génératrice. A basse pression, le fluide est refroidi, condensé et sous-refroidi par la source froide au sein du condenseur pour être ensuite de nouveau pompé et ainsi fermer le cycle. Afin de dissiper l'électricité produite à la génératrice, un dissipateur thermique est utilisé.

Le système est composé d'une micro-turbine axiale à admission partielle d'une puissance maximale de 1 kW environ (Figure 4). La lubrification du système est assurée par le fluide de travail. Un circuit externe propre à la génératrice assure son refroidissement pour permettre son bon fonctionnement.

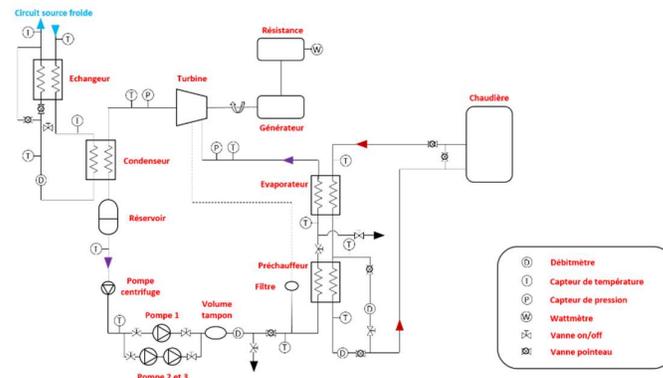


Figure 3 : PFD de l'installation ORC

De façon plus précise deux pompes assurent la circulation et la mise sous pression du fluide de travail dans le circuit ORC ; la pompe principale est une pompe volumétrique à diaphragmes, la seconde est une petite pompe centrifuge qui permet d'éviter tout risque de cavitation au sein de la pompe principale [16]. Deux échangeurs de chaleur, un préchauffeur et un évaporateur, sont placés en série pour permettre le transfert d'énergie issue de la source chaude. Un condenseur, permet le refroidissement du fluide de travail au sein du cycle. Placé entre le condenseur et la pompe centrifuge, un réservoir assure un niveau suffisant de liquide en entrée de la pompe centrifuge.

La source chaude est une chaudière électrique dans laquelle de l'eau est pompée et mise sous pression pour atteindre une température allant jusqu'à 115 °C à l'état liquide en entrée d'évaporateur. Un régulateur proportionnel intégral dérivé (PID) intégré à la chaudière permet de maintenir l'eau à une température constante en entrée d'évaporateur. Le débit d'eau de la boucle chaude est fixé manuellement à l'aide d'une vanne présente sur le circuit de by-pass de la chaudière.

La source froide est assurée par le réseau d'eau industrielle du laboratoire qui se trouve à une température constante proche de 13 °C. Une vanne manuelle permet de réguler le débit d'eau au sein de la boucle froide. Il est possible de modifier cette température grâce à un système de récupération de chaleur situé en sortie de condenseur.

2.3. Instrumentation

Tous les capteurs utilisés pour les mesures et l'acquisition de données sont présents sur le PFD de l'installation en Figure 3. Les caractéristiques des équipements de mesures sont répertoriées dans le Tableau 1.

Les boucles du fluide de travail, de la source chaude et de la source froide sont équipées de thermocouples de Type-T pour mesurer les températures entre les divers composants.

Le circuit du fluide de travail est instrumenté de capteurs de pression absolue (APS) en entrée et sortie de turbine afin de mesurer les deux étages de pression au sein de l'installation.

Les mesures de débit volumique des circuits chaud et froid sont effectuées à l'aide de débitmètres électromagnétiques (EFM) tandis que le débit fluide est mesuré à partir d'un débitmètre massique de type Coriolis.

La puissance brute produite à la turbine est mesurée par l'intermédiaire d'un wattmètre.

| Variable | Équipement | Gamme | Incertitude |
|------------------------------------|---------------------|----------------|-------------|
| Puissance électrique | Wattmètre | 0 – 3250 W | ± 0,3 % |
| Débit volumique (source chaude) | EFM | 0 – 3500 l/h | ± 0,23 % |
| Débit volumique (source froide) | EFM | 0 – 2500 l/h | ± 0,33 % |
| Débit massique (fluide de travail) | Coriolis | 50 – 500 kg/h | ± 0,30 % |
| Température | Thermocouple Type-T | - 200 – 200 °C | ± 0,1 °C |
| Pression | APS | 0 – 7 bar | ± 1 % |

Tableau 1 : Caractéristiques des équipements de mesure

3. Résultats et discussion

Afin d'étudier la fiabilité du système, il est nécessaire de montrer que le système fonctionne en toute situation. Deux situations hors nominales ont été étudiées en priorité : cas où l'échangeur n'est plus capable d'évaporer l'ensemble du fluide (encrassement par exemple) et le cas où la température de source froide augmente (saisonnalité par exemple).

Pour ces deux scénarios, différentes températures de source chaude, de débits de source chaude et de source froide ont été testés afin d'étudier leurs impacts sur l'installation et ses performances.

L'ensemble des essais (117) a été réalisé en Novec649, un fluide sec de type HFE, proposé comme fluide de remplacement aux HFC [17]. L'ensembles des propriétés du Novec649 sont obtenues en utilisant le logiciel EES (Engineering Equation Solver) [18].

3.1. Evaporation partielle

La première situation hors nominale que nous avons reproduite repose sur le cas où l'échangeur chaud n'est plus capable d'évaporer la totalité du fluide. Ce déséquilibre est réalisé dans la boucle d'essais en augmentant le débit de fluide circulant dans l'ORC.

Une étude préliminaire sur l'évaporateur a permis de déterminer le débit de fluide limite à partir duquel l'évaporateur ne serait plus capable d'évaporer l'ensemble du fluide. Ensuite, en réalisant un bilan thermique sur l'évaporateur [Eq (1) et (2)], il a été possible de déterminer le titre du fluide en entrée de turbine. La gamme de titre en entrée de turbine, varie entre 1 et 0,55, ce qui est très inhabituel pour les ORC et pour les turbines axiales en général pour des raisons d'érosion des aubes de la turbo-machine. [19]

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_f \cdot \Delta h_f \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{sc} \cdot \Delta h_{sc} \quad (2)$$

Afin de visualiser les performances de la turbine, il est nécessaire d'expliciter la formule du rendement utilisé.

$$\dot{W}_{is,tur} = \dot{m}_f \cdot (h_{f,in} - h_{f,out,is}) \quad (3)$$

$$\eta_{tur} = \frac{\dot{W}_{elec,tur}}{\dot{W}_{is,tur}} \quad (4)$$

Sur la Figure 5 on observe que la puissance électrique produite par la turbine augmente avec le débit fluide jusqu'à atteindre un maximum. Après avoir atteint ce maximum elle décroît légèrement avec le débit du fluide. On remarque que le point maximum est atteint lors de la transition du fluide de l'état monophasique à l'état diphasique en entrée de turbine. Il est ainsi intéressant de remarquer que, même en diphasique la turbine continue de produire de la puissance électrique, à une valeur presque constante, mais que cette puissance ne pourra jamais dépasser la puissance produite en monophasique pour le même débit de vapeur.

Sur la Figure 6, on peut observer que le rendement électrique de la turbine augmente avec la puissance produite. On observe aussi que le rendement monophasique est, pour toute puissance, supérieur au rendement diphasique. Ainsi, comme l'a montré la Figure 5, même si la turbine continue de produire de la puissance avec une arrivée de fluide diphasique, le rendement de la turbine en diphasique sera toujours inférieur au rendement de la turbine en monophasique. Cette constatation est corroborée par la Figure 7 où l'on observe que le rendement de la turbine commence à chuter avec le passage du fluide de l'état monophasique à diphasique en entrée de turbine. On observe aussi que plus le débit fluide est important, et donc son titre faible, plus le rendement de la turbine est dégradé.

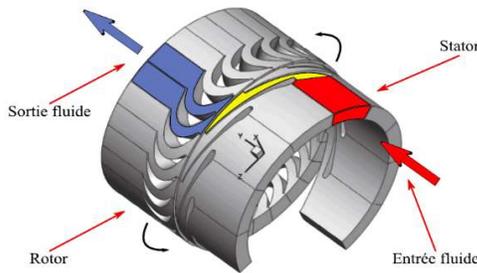


Figure 4 : Schéma d'une turbine axiale, canaux fluidiques [12]

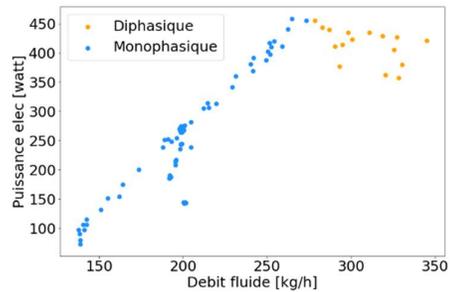


Figure 5 : Puissance électrique en fonction du débit fluide (Température source froide cst)

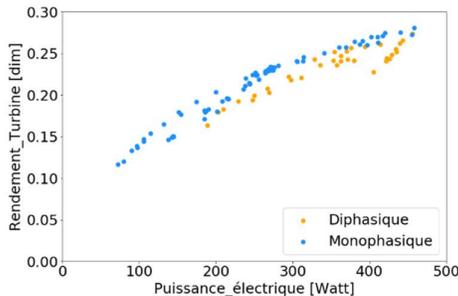


Figure 6 : Rendement électrique en fonction de puissance électrique produite

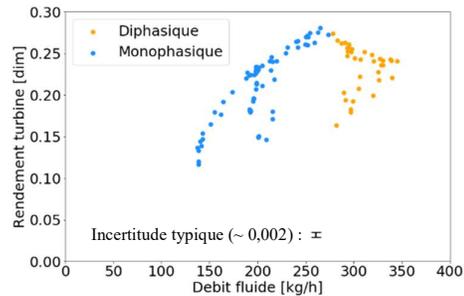


Figure 7 : Rendement électrique en fonction du débit fluide

Sans rentrer dans le détail du fonctionnement de la turbine, mais en se concentrant sur le fonctionnement du système de manière générale, ces résultats démontrent une grande adaptabilité de l'ORC à une entrée de fluide diphasique dans la turbine.

En effet, bien que le rendement électrique de la turbine soit plus faible en diphasique, en comparaison à son rendement monophasique, la turbine continue de produire significativement. Cette continuité de production permet d'assurer la fonction de production électrique.

3.2. Augmentation température source froide

Un autre scénario étudié se concentre sur l'augmentation de la température de la source froide et ses effets sur la production et les performances de l'ORC.

En effet, la source froide de l'ORC étant de l'eau stockée à l'air libre, elle est sujette aux changements de température saisonniers, ou encore à la situation géographique de la centrale. La gamme retenue pour notre étude expérimentale va de 13°C à 35°C.

On observe ainsi que la puissance produite par l'ORC décroît avec l'augmentation de la température de source froide (Figure 8) : une augmentation de la température de source froide de 20° vient diviser la puissance de l'ORC par deux.

Cette diminution de la puissance produite est provoquée par l'augmentation de la pression basse suivant l'augmentation de la température de source froide (Figure 9). Cette augmentation de pression basse vient diminuer le taux de pression et donc diminuer la puissance produite.

On remarque aussi que le rendement de l'ORC diminue avec l'augmentation de la température de source froide (Figure 10). On peut justifier cette diminution de rendement suivant la Figure 6 qui montre que plus la puissance produite est importante, plus le rendement est important.

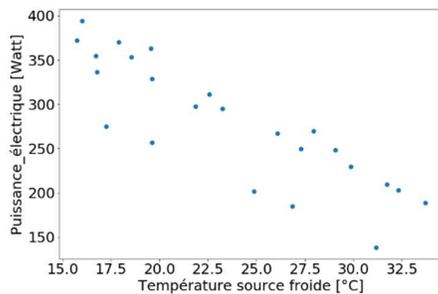


Figure 8 : Puissance électrique en fonction de la température de source froide

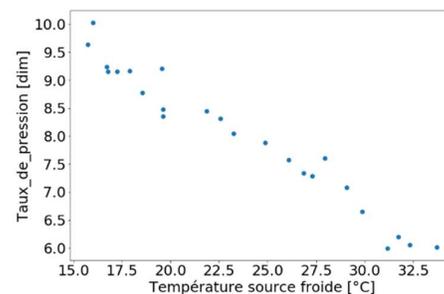


Figure 9 : Taux de pression de la turbine en fonction de la température de source froide

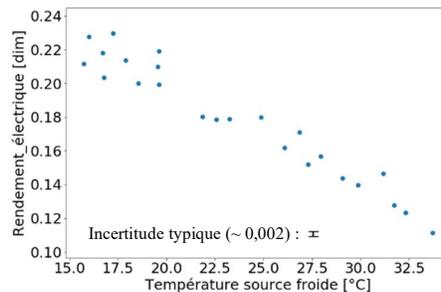


Figure 10 : Rendement électrique en fonction de la température de source froide

3.3. Analyse des résultats

Comme montré dans les parties précédentes, le rendement électrique de la turbine est très sensible aussi bien au débit du fluide qu'à la température de source froide. Ces deux éléments sont inclus dans deux paramètres adimensionnelles usuels des turbomachines que sont la vitesse spécifique et le taux de pression. [20]

Dans un premier temps, notre modèle ne prend en compte que les essais en monophasique (84 essais). Avec ce modèle (eq 7), l'indicateur de régression linéaire R² est de 0,979 (Figure 11). Les constantes sont obtenues par régression linéaire au sens des moindres carrés.

L'idée a ensuite été d'inclure les essais diphasiques (33 essais) dans cette corrélation. Pour ce faire le paramètre du titre a été ajouté à l'équation (7). Avec ce nouveau modèle (eq 8), l'indicateur de régression linéaire R² est de 0,977 (Figure 12).

$$\pi = P_{in}/P_{out} \quad (5) \quad N_s = N_{rota} \cdot q_{out,is}^{0.5} / \Delta H_{is}^{0.75} \quad (6)$$

$$\eta_{tur} = a \cdot N_s + b \cdot N_s^2 + \frac{c}{\pi} + \frac{d}{\pi^2} \quad (7) \quad \eta_{tur} = a \cdot N_s + b \cdot N_s^2 + \frac{c}{\pi} + \frac{d}{\pi^2} + e \cdot (1 - x_{in,tur}) \quad (8)$$

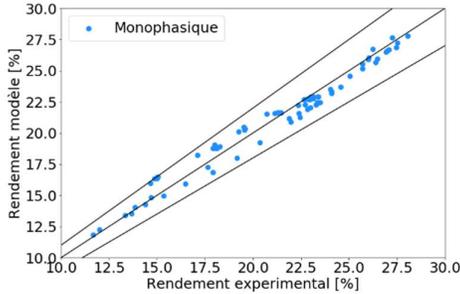


Figure 11: Rendement modèle (eq4) en fonction du rendement expérimental (monophasique, +/- 10%)

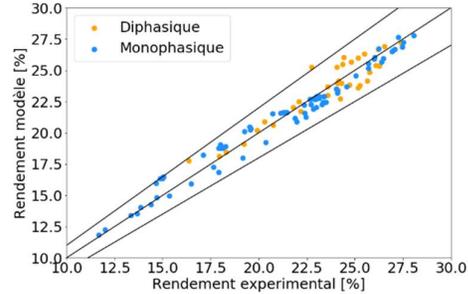


Figure 12 : Rendement modèle (eq5) en fonction du rendement expérimental (monophasique et diphasique, +/- 10%)

4. Conclusion

Dans le cadre du couplage entre un condenseur de sureté servant à refroidir le cœur du réacteur en situation accidentelle de type SBO, et d'un ORC, il est nécessaire d'analyser la robustesse et la fiabilité de l'ORC. Pour ce faire, deux situations hors nominales sont identifiées et étudiés expérimentalement.

La première situation se place dans le cas d'une entrée de fluide à l'état diphasique dans une micro turbine axiale. L'étude se concentre sur le rendement et la puissance produite. Il en est conclu que lorsque le débit de vapeur reste constant, mais que le débit de liquide entrant augmente, la puissance produite diminue légèrement, tandis que le rendement de la turbine chute. Une estimation quantitative de cet effet a été fourni via une approche corrélative. La deuxième situation analysée expérimentalement, correspondant au cas où la température de la source froide augmente. Cette étude montre que la source froide a un impact important sur la production finale d'électricité : le passage de 13 à 35 °C de source froide, diminue par deux la puissance produite par l'ORC. Une caractérisation étendue de la turbine a été réalisée en faisant varier vitesse de rotation, débit du fluide et pressions, permettant d'aboutir à une corrélation du rendement valable sur une large gamme de fonctionnement.

Références :

- [1] T.-D. Huynh, « JEFF 3 ET LES CALCULS DE LA PUISSANCE RÉSIDUELLE », p. 405.
- [2] C.-Y. Xie, H.-Z. Tao, W. Li, et J.-J. Cheng, « Numerical simulation and experimental investigation of heat pipe heat exchanger applied in residual heat removal system », *Ann. Nucl. Energy*, vol. 133, p. 568-579, nov. 2019, doi: 10.1016/j.anucene.2019.07.009.
- [3] J. Xing, D. Song, et Y. Wu, « HPR1000: Advanced Pressurized Water Reactor with Active and Passive Safety », *Engineering*, vol. 2, n° 1, p. 79-87, mars 2016, doi: 10.1016/J.ENG.2016.01.017.
- [4] T. L. Schulz, « Westinghouse AP1000 advanced passive plant », *Nucl. Eng. Des.*, vol. 236, n° 14, p. 1547-1557, août 2006, doi: 10.1016/j.nucengdes.2006.03.049.
- [5] H. Ayhan et C. N. Sökmen, « Investigation of passive residual heat removal system for VVERs: Effects of finned type heat exchanger tubes », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 108, p. 466-474, sept. 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.07.128.
- [6] « te_1624_web.pdf ». Consulté le: 5 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1624_web.pdf
- [7] « Cycle Organique de Rankine ORC », *La librairie ADEME*. <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/195-cycle-organique-de-rankine-orc.html> (consulté le janv. 13, 2022).
- [8] A. Landelle, N. Tauveron, P. Haberschill, R. Revellin, et S. Colasson, « Organic Rankine cycle design and performance comparison based on experimental database », *Appl. Energy*, vol. 204, p. 1172-1187, oct. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.04.012.
- [9] S. Quoilin, M. V. D. Broek, S. Declaye, P. Dewallef, et V. Lemort, « Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, p. 168-186, juin 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.028.
- [10] N. Tauveron, S. Colasson, et J.-A. Gruss, « Available systems for the conversion of waste heat to electricity », 2014, vol. 6A. doi: 10.1115/IMECE2014-37984.
- [11] C. Wieland, F. Dawo, C. Schiffelechner, et M. Astolfi, « MARKET REPORT ON ORGANIC RANKINE CYCLE POWER SYSTEMS: RECENT DEVELOPMENTS AND OUTLOOK », p. 10, 2021.
- [12] Q. Blondel, « Etude et optimisation énergétique des mélanges zéotropes pour les cycles thermodynamiques de Rankine », These de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2021. Consulté le: 11 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2021GRALI021>
- [13] « United Nations Climate Change, Kyoto Protocol Reference Manual on Accounting of Emissions and Assigned Amounts, 2008 ». Consulté le: 6 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf
- [14] W. W. Husband et A. Beyene, « Low-grade heat-driven Rankine cycle, a feasibility study », *Int. J. Energy Res.*, vol. 32, n° 15, p. 1373-1382, 2008, doi: 10.1002/er.1442.
- [15] G. Qiu, Y. Shao, J. Li, H. Liu, et S. B. Riffat, « Experimental investigation of a biomass-fired ORC-based micro-CHP for domestic applications », *Fuel*, vol. 96, p. 374-382, juin 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2012.01.028.
- [16] A. Landelle, N. Tauveron, R. Revellin, P. Haberschill, S. Colasson, et V. Roussel, « Performance investigation of reciprocating pump running with organic fluid for organic Rankine cycle », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 113, p. 962-969, févr. 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.096.
- [17] « 3m-novec-engineered-fluid-649.pdf ». Consulté le: 7 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://multimedia.3m.com/mws/media/569865O/3m-novec-engineered-fluid-649.pdf>
- [18] « EES: Engineering Equation Solver | F-Chart Software: Engineering Software ». <https://fchartsoftware.com/ees/> (consulté le juill. 12, 2021).
- [19] M. Z. Stijepovic, P. Linke, A. I. Papadopoulos, et A. S. Grujic, « On the role of working fluid properties in Organic Rankine Cycle performance », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 36, p. 406-413, avr. 2012, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.10.057.
- [20] « Contrôle et l'optimisation de l'architecture dans un système de récupération de la chaleur par cycle de Rankine dans un véhicule poids lourd – LAGEPP ». <https://lagepp.univ-lyon1.fr/these/contrôle-et-optimisation-de-l'architecture-dans-un-système-de-récupération-de-la-chaleur-par-cycle-de-rankine-dans-un-vehicule-poids-lourd/> (consulté le janv. 13, 2022).

Remerciements :

Les auteurs souhaitent remercier le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives ainsi que l'Electricité de France (EDF).