



POMPE A CHALEUR THERMIQUE A DOUBLE CYCLE DE RANKINE

Rapport annuel 2008

Auteur et coauteurs	J. Demierre, D. Favrat, J. Jakubowski
Institution mandatée	EPFL, STI-IGM-LENI
Adresse	EPFL, LENI, Bât. ME A2, Station 9, CH-1015 LAUSANNE
Téléphone, e-mail, site Internet	021 693 67 29, jonathan.demierre@epfl.ch, http://leni.epfl.ch
N° projet / n° contrat OFEN	102846 / 153662
accompagnateur OFEN du projet	Th.Kopp Programme R&D 'Pompes à chaleur, CCF, froid'
Durée prévue du projet (de - à)	Du 1.9.2008 au 30.11.2010
Date	11 décembre 2008

RÉSUMÉ

Les résultats principaux de 2008 découlent de l'étude système d'une pompe à chaleur ORC-ORC résidentielle permettant à partir d'une source thermique (gaz de combustion ou solaire) et de l'environnement (air ou sol) de chauffer un immeuble. Les calculs préliminaires montrent que des COP de plus de 1.6 pourraient être atteints (COP calculé à partir de l'énergie primaire). Ces résultats indiquent qu'une telle technologie pourrait concurrencer les pompes à chaleur à absorption avec l'avantage d'un encombrement moindre et d'un suivi de charge plus aisé. Les résultats de l'optimisation bi-objectif sur le COP et la vitesse de rotation de l'unité compresseur-turbine soulignent le compromis qui existe entre ces deux paramètres. L'importance vis-à-vis du COP de disposer d'un fluide de travail pouvant être utilisé à haute température a été montrée. Les résultats montrent aussi que des unités compresseur-turbine à haute vitesse efficaces pour des systèmes ORC-ORC de faible puissance sont réalisables.

Buts du projet

La combustion simple dans une chaudière est un moyen de chauffage très inefficace. Le prix de plus en plus élevé des combustibles et les considérations liées à la pollution tendent à faire pression au niveau politique pour éviter l'usage de chaudières dans la plupart des applications de chauffage. Les alternatives sont toutes liées aux pompes à chaleur qui permettent de valoriser l'énergie thermique renouvelable de l'environnement. Les pompes à chaleur entraînées thermiquement peuvent fonctionner avec différents types de combustibles comme les pellets de bois ou le gaz naturel et sont généralement réalisées en utilisant un cycle à absorption ou une combinaison d'un cycle moteur thermique avec un cycle pompe à chaleur à compression ou encore une combinaison des deux. Dans le cadre de ce projet, un concept de la deuxième catégorie est étudié. Le système est composé d'un cycle ORC moteur entraînant un cycle ORC inversé (pompe à chaleur), les deux utilisant le même fluide, avec une unité compresseur-turbine dynamique à haute vitesse, sans huile, sur paliers à vapeur de fluide frigorigène (voir Fig. 1).

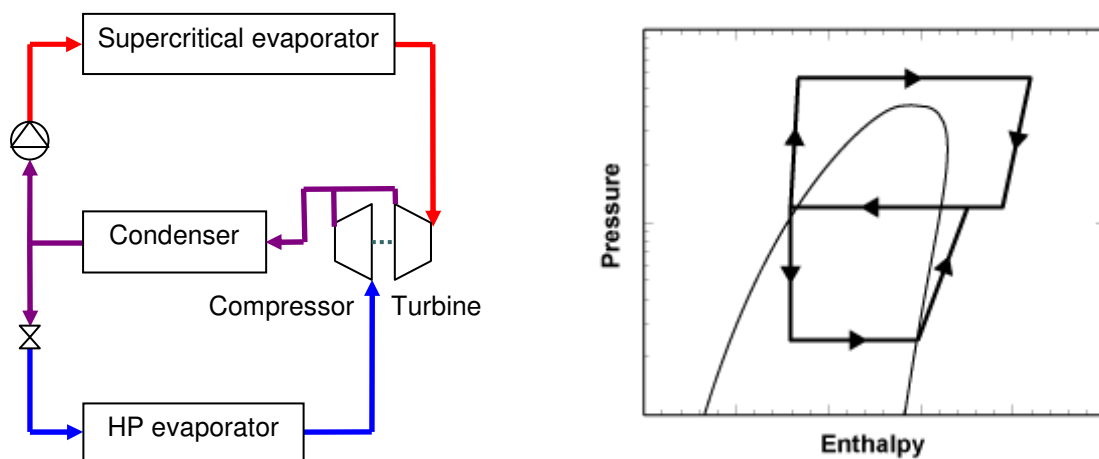


Figure 1 : Diagramme des flux et diagramme Log P –h d'une unité de pompe à chaleur ORC-ORC simple

Les différentes tâches qui avaient été planifiées pour cette année sont les suivantes :

Développement d'un outil d'analyse de turbines radiales

L'objectif est de développer un modèle de turbine radiale qui doit permettre l'évaluation rapide des performances (rendement, puissance, etc) à partir d'une géométrie et de conditions de fonctionnement données. Par la suite, ce modèle sera utilisé, avec un modèle de compresseur radial et un modèle des pertes liées à l'arbre développés lors d'une thèse précédente[4], pour modéliser l'unité compresseur-turbine complète.

Réactualisation du banc d'essai de pompes à chaleur

Le stand d'essai pompe à chaleur fournit une source d'eau froide et une source d'eau chaude, dont les températures peuvent être régulées. La modernisation de ce stand comprend le remplacement de la chaîne d'acquisition de données actuelle (hardware d'acquisition, ordinateur et software d'acquisition) et la validation de la nouvelle chaîne d'acquisition sur une pompe à chaleur test.

Développement d'un outil de design de pompes à chaleur ORC-ORC

Le but est de développer un outil permettant de faire le design optimal d'un ORC-ORC (niveaux de température et de pression, et design de l'unité compresseur-turbine) pour un service de chaleur et des sources de chaleur donnés.

Etude théorique et optimisation de designs d'ORC-ORC

L'étude a pour objectif d'analyser la faisabilité et le potentiel des pompes à chaleur ORC-ORC avec une unité compresseur-turbine à haute vitesse pour des applications résidentielles. Différentes configurations seront étudiées et des designs seront proposés.

Développement d'un prototype expérimental d'ORC-ORC

L'objectif est de mettre au point un prototype entièrement instrumenté, d'une puissance d'environ 20kW, avec des cycles mono-étagés et utilisant, dans un premier temps, du R134a comme fluide de travail. D'autres fluides à faible coefficient de réchauffement global sont aussi explorés sur le plan théorique.

Travaux effectués et résultats acquis

Développement d'un outil d'analyse de turbines radiales

La méthode choisie pour le calcul des performances d'une turbine est la modélisation monodimensionnelle de l'écoulement. La méthode se base sur le calcul des vitesses moyennes à l'entrée et à la sortie des différents éléments (volute, aubes directrices, rotor et diffuseur) et sur l'estimation des pertes à l'aide de corrélations simples. A ce stade, l'algorithme de calcul a été défini et les corrélations de pertes ont été sélectionnées pour l'élément principal, le rotor. Les corrélations de pertes choisies sont celles proposées par Whitfield et Baines (1990)[1].

Réactualisation du banc d'essai de pompes à chaleur

L'ancienne chaîne d'acquisition a été remise en état (pour servir de système de secours) et a été testée sur une pompe à chaleur électrique commerciale. Ses performances se sont montrées insuffisantes pour l'acquisition de données à haute fréquence et justifient le remplacement de l'ancien matériel. La nouvelle chaîne d'acquisition a été choisie et commandée. Le nouveau software d'acquisition a été développé.

Développement d'un outil de design de pompes à chaleur ORC-ORC

Un modèle d'ORC-ORC a été développé en utilisant un logiciel commercial de flowsheeting, *Vali-Belsim*[3]. *REFPROP*[2] est utilisé pour calculer les propriétés thermodynamiques du fluide de travail. Dans un premier temps, les pertes de charge dans les échangeurs de chaleur et les conduites, ainsi que les pertes thermiques sont négligées. La détente dans la vanne est considérée comme isenthalpe. Le rendement isentropique de la pompe est considéré comme constant et égal à 0.5. Les pertes liées à l'arbre compresseur-turbine sont calculées à l'aide d'un modèle développé dans le cadre d'une thèse précédente[4]. Une approximation polynomiale de la corrélation de Rohlik (1968)[1] est utilisée pour modéliser le rendement isentropique de la turbine. Le rendement isentropique du compresseur est modélisé, suivant une méthode similaire, en utilisant une corrélation adaptée de Balje (1981)[1]. La taille optimale des roues de turbine et de compresseur est aussi évaluée.

Les flux liés aux sources de chaleur, au service de chaleur et à l'ORC-ORC sont intégrés en utilisant un logiciel d'intégration énergétique de notre laboratoire, *Easy* (Maréchal F. et al.1998). Les débits-masse de l'ORC-ORC sont fixés et ceux liés aux sources de chaleur, au service de chaleur sont calculés afin de maximiser le COP.

Un outil d'optimisation multi-objectif de notre unité, *MOO*, qui est basé sur un algorithme génétique, est utilisé pour générer des solutions optimales. Une plateforme logiciel développée dans notre unité, *Osmose*, permet une communication efficace entre les différents programmes (*Vali-Belsim*, *Easy* et *MOO*).

Etude théorique et optimisation de designs d'ORC-ORC

Une étude d'une pompe à chaleur ORC-ORC pour une application résidentielle (environ 20kW) a été réalisée et a fait l'objet d'un article pour le journal GWA[5]. Dans cette étude, deux sources de chaleur sont définies. La première est représentée par les gaz de combustion résultants d'une combustion stœchiométrique de méthane qui se refroidissent jusqu'à une température aussi basse que possible (par exemple, jusqu'à 4°C en hiver dans nos calculs). La seconde source de chaleur est l'eau glycolée d'une sonde géothermique (qui se refroidit de 4°C à 0°C dans nos calculs). Les besoins en énergie chaleur incluent l'eau chaude sanitaire (ECS) et l'eau de chauffage. L'ECS est chauffée de 10°C à 60°C et l'eau pour le chauffage au sol est chauffée de 30°C à 35°C. Une optimisation bi-objectif sur le COP et la vitesse de rotation de l'unité compresseur-turbine a été réalisée et souligne le compromis qui existe entre ces deux paramètres. La sensibilité du COP à la température en entrée de turbine a été étudiée. L'importance vis-à-vis du COP de disposer d'un fluide de travail pouvant être utilisé à haute température a été montrée. Les résultats montrent que des bons COP peuvent être obtenus avec des systèmes ORC-ORC de faible puissance et que des unités compresseur-turbine à haute vitesse efficaces pour ces applications semblent réalisables. Pour cette étude présentée dans l'article pour le journal GWA, les pertes liées à l'arbre compresseur-turbine n'avaient pas encore été prises en compte. Par la suite, une optimisation bi-objectif sur le COP et la vitesse de rotation de l'unité compresseur-turbine en intégrant les pertes liées à l'arbre compresseur-turbine a été réalisée (voir Fig. 2).

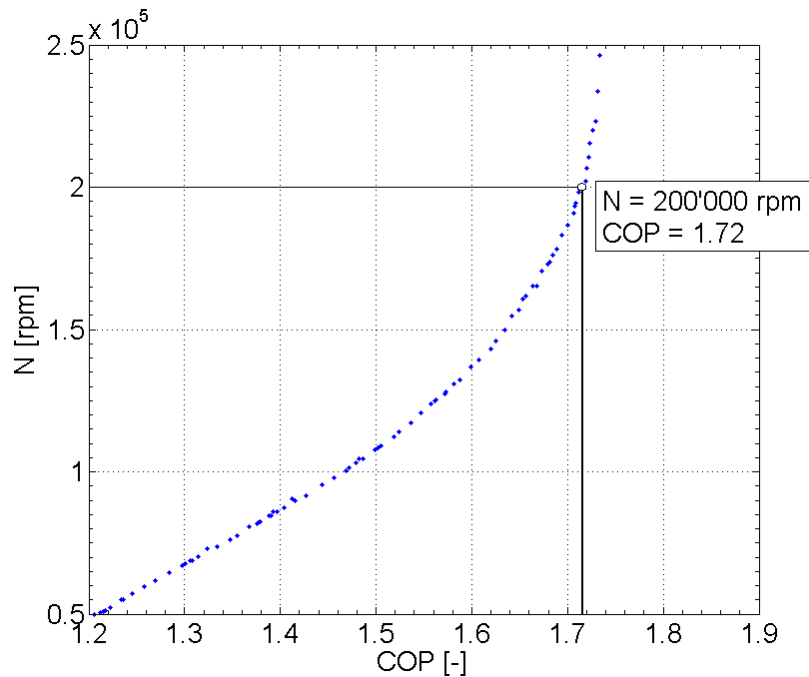


Figure 2 : Courbe de Pareto de l'optimisation avec le COP et la vitesse de rotation comme objectifs

Développement d'un prototype expérimental d'ORC-ORC

Le rotor d'une turbine (puissance nominale env. 3kW) conçu à l'aide d'un logiciel commercial, *Concepts NREC*[6], a été usiné (voir Fig. 3). Cette turbine sera couplée à un compresseur déjà existant développé lors d'une thèse précédente[4].

Après avoir passé en revue différents types d'échangeur de chaleur susceptibles d'être utilisés comme évaporateur supercritique (pression jusqu'à 70 bar et température jusqu'à 200 °C), le type « spiral à tubes coaxiaux » a été sélectionné. Un modèle de ce type d'échangeur permettant de calculer le transfert de chaleur lors d'une évaporation supercritique a été développé.

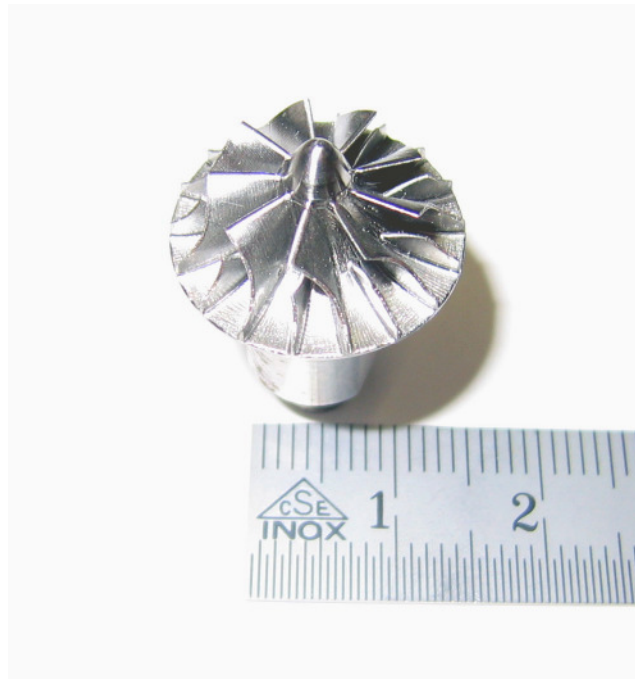


Figure 3 : Rotor de turbine (puissance nominale env. 3kW) pour le prototype expérimental d'ORC-ORC

Évaluation de l'année 2008 et perspectives pour 2009

Développement d'un outil d'analyse de turbines radiales

La prochaine étape sera d'implémenter le programme de calcul du rotor. Il sera fait de même pour les éléments statiques (volute, aubes directrices et diffuseur). Par la suite, le modèle sera calibré sur les mesures effectuées sur le prototype expérimental.

Réactualisation du banc d'essai de pompes à chaleur

Les essais complémentaires du banc d'essai avec sa nouvelle chaîne, son nouveau logiciel d'acquisition de données et de contrôle seront finalisés. Les performances du stand seront évaluées; en cas de besoin, le stand sera modifié.

Développement d'un outil de conception de pompes à chaleur ORC-ORC

Les modèles détaillés de compresseur et de turbine seront intégrés au modèle du système complet.

Etude théorique et optimisation de concepts d'ORC-ORC

Une prochaine étude portera sur un système ORC-ORC avec un cycle pompe à chaleur bi-étagé. Il est prévu d'étudier le système fonctionnant avec d'autres fluides de travail que le R134a. L'intégration des modèles détaillés de compresseur et de turbine au modèle du système complet permettra d'analyser le fonctionnement hors du point nominal.

Développement d'un prototype expérimental d'ORC-ORC

Les prochaines étapes seront la conception et l'usinage des éléments statiques, suivis de la conception et de la fabrication de l'unité compresseur-turbine. Les différents capteurs (pression, température,...) et l'équipement (échangeurs de chaleur, vannes,...) devront être sélectionnés. Finalement, l'ensemble sera assemblé.

Références

- [1] Whitfield A., Baines N.C. 1990. "Design of Radial Turbomachines," Essex, Longman Scientific & Technical.
- [2] Lemmon E., McLinden M., Huber M. 2002. "NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties - REFPROP, Version 7.0," National Institute of Standards and Technology.
- [3] Belsim, 2006. Vali IV. <http://www.belsim.com>.
- [4] Schiffmann J. 2008. "Integrated design, optimization and experimental investigation of a direct driven turbocompressor for domestic heat pumps," PhD thesis, EPFL.
- [5] Demierre J., Favrat D. 2008. "Systèmes ORC-ORC de petite puissance pour des applications de pompe à chaleur," soumis à GWA
- [6] Concepts NREC, 2007. AGILE Engineering Design System. <http://www.conceptsnrec.com>.