



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN

Rapport annuel 14 décembre 2009

Pompe à chaleur thermique à double cycle de Rankine

Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de recherche «Pompes à chaleur, CCF, froid»
CH-3003 Berne
www.bfe.admin.ch

Cofinancement:

EPFL, STI-IGM-LENI, CH-1015 Lausanne

Mandataire:

EPFL, STI-IGM-LENI
EPFL, LENI, Bât. ME A2
Station 9
CH-1015 Lausanne
leni.epfl.ch

Auteurs:

Jonathan Demierre, EPFL, Jonathan.Demierre@epfl.ch
Prof. Dr. D. Favrat

Responsable de domaine de l'OFEN: Andreas Eckmanns

Chef de programme de l'OFEN: Thomas Kopp

Numéro du contrat et du projet de l'OFEN: 153662 / 102846

L'auteur de ce rapport porte seul la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

Abstract

Une version simplifiée de la partie ORC moteur du système a été construite et instrumentée de manière à pouvoir tester la pompe à membrane et l'échangeur DTC (Dual Tube Coil) comme évaporateur supercritique. Même si la pompe à membrane utilisée n'est pas tout à fait adaptée, elle fonctionne de manière acceptable dans les conditions de fonctionnement requises. Des mesures ont été effectuées sur l'échangeur DTC en évaporation supercritique, afin de le caractériser. Il apparaît que le coefficient de transfert de chaleur global mesuré est proche (erreur relative d'env. 5%) de ce qui est prédit par le modèle d'échangeur DTC qui avait été développé en 2008. Deux échangeurs supplémentaires ont été commandés pour le prototype d'ORC-ORC complet.

Les éléments fixes de la partie turbine (volute, aubes directrices, joint labyrinthe, ...) ont été conçus. Le carter d'un prototype de compresseur entraîné électriquement a été modifié pour accueillir la turbine à la place du moteur. Les contraintes mécaniques et les déplacements ont été évaluées pour les pièces critiques (carter, volute, rotor de la turbine et arbre), afin d'assurer le bon fonctionnement de l'ensemble. Toutes les pièces ont été usinées et le montage est prévu en janvier prochain.

Summary

Single combustion in boilers is a very inefficient way of heating. The higher cost of fuels and pollution concerns are likely to put more and more political pressure to prevent the use of boilers for most heating purposes. Alternatives are all linked to heat pumps allowing the upgrading of renewable heat from the environment. Thermally driven heat pumps from a variety of fuels including wood pellets or natural gas are usually realized using an absorption heat pump or by a combination of heat engine cycle with a compression heat pump cycle or a combination of both.

The concept studied in this project is a low power ORC-ORC system (about 20 kW heat at the condenser) which is composed of an ORC engine cycle driving a reversed ORC heat pump cycle, both using the same fluid. The radial compressor and turbine are directly coupled on the same shaft rotating on refrigerant gas bearings. This gives the system the advantage of being oil-free, fully hermetic and with low maintenance costs. The objectives of this project are the theoretical study of such systems and the conception and test of a prototype. Preliminary calculations show that COP's higher than 1.6 could be expected which would be competitive with absorption heat pump alternatives.

The main tasks accomplished this year are the development and the testing of a simplified version of the ORC engine cycle of the system, and the development of the compressor-turbine unit. The tests on the ORC engine cycle allowed to characterize the DTC (Dual Tube Coil) heat exchanger (as supercritical evaporator) and verify that the diaphragm pump can work under the required conditions. The different parts of the turbine and the housing of the unit have been designed. Almost all parts have been machined. The unit will be soon assembled and balanced.

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).

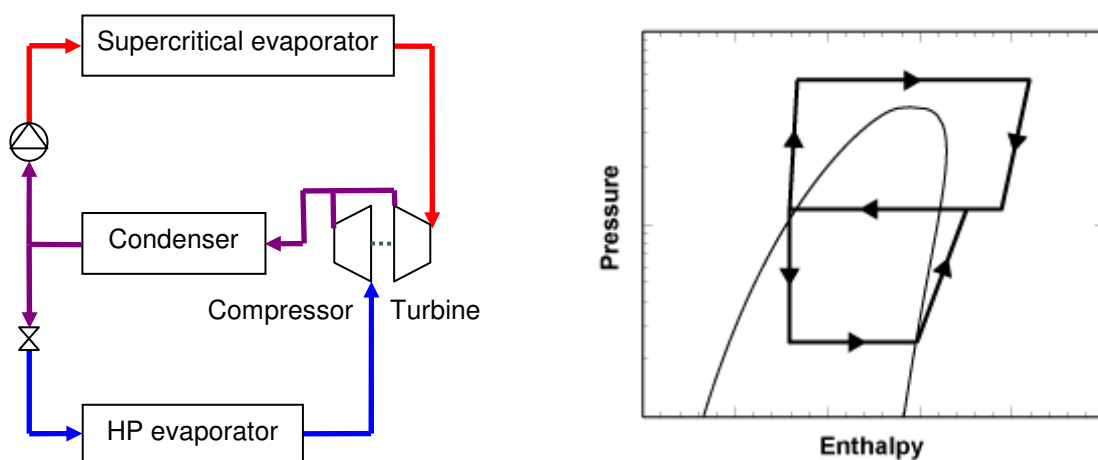


Fig. 1 : diagramme des flux et diagramme Log P –h d'une unité de pompe à chaleur ORC-ORC simple

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

Développement d'un outil d'analyse de turbines radiales

L'objectif était de finaliser le développement du 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. Les différents éléments de la turbine (volute, aubes directrices, rotor et diffuseur) devaient être modélisés en utilisant une approche proposée par Whitfield et Baines[1]. Le modèle de turbine devait être, ensuite, implémenté en *Matlab*[2], puis, couplé avec un modèle de compresseur radial et un modèle des pertes liées à l'arbre, développés lors d'une thèse précédente[4], afin de modéliser l'unité compresseur-turbine complète.

Réactualisation du banc d'essai de pompes à chaleur

La nouvelle chaîne et le nouveau logiciel d'acquisition de données et de contrôle devaient être mis en place. Des essais complémentaires du banc d'essai avec le nouveau système d'acquisition de données et de contrôle devaient être réalisés.

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

Le but était de finaliser le développement d'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. Le modèle détaillé de l'unité compresseur-turbine devait être intégré au modèle du système complet.

Etude théorique et optimisation de concepts d'ORC-ORC

Une première étude avait été réalisée durant l'année 2008 sur un système ORC-ORC avec un cycle pompe à chaleur mono-étagé pour des conditions de fonctionnement à régime nominal. Pour 2009, il a été prévu d'étudier un système avec un cycle pompe à chaleur bi-étagé, le fonctionnement à charge partielle ainsi que la possibilité d'utiliser d'autres fluides de travail que le R134a.

Développement d'un prototype expérimental d'ORC-ORC

Dans un premier temps, l'objectif était de construire et d'instrumenter une version simplifiée de la partie ORC moteur du système, avec une vanne de détente à la place de la turbine, de manière à pouvoir tester la pompe et l'évaporateur supercritique qui avaient été choisis.

Il était prévu de concevoir et fabriquer les éléments statiques de la turbine ainsi que concevoir, fabriquer, assembler et équilibrer l'unité compresseur-turbine. La partie compresseur de l'unité, le carter ainsi que les paliers sont les mêmes que ceux développés dans le cadre d'une thèse précédente[4].

Ensuite, le système ORC-ORC complet avec l'unité compresseur-turbine devait être construit et instrumenté.

Tests du prototype expérimental d'ORC-ORC

La version simplifiée de la partie ORC moteur était prévue d'être testée de manière à caractériser l'évaporateur supercritique et tester la pompe à membrane.

Pour la suite, il avait été planifié d'effectuer les premiers tests sur le prototype complet.

Calibration et validation des modèles développés

Il était prévu de calibrer et valider le modèle d'évaporateur supercritique DTC (Dual Tube Coil) développé dans le cadre d'un projet d'étudiant[5] en 2008 avec les mesures effectuées sur la version simplifiée de la partie ORC moteur.

Une première comparaison entre le modèle de l'unité compresseur-turbine et les premières mesures effectuées sur le prototype d'ORC-ORC complet avait été planifiée.

Travaux effectués et résultats acquis

Développement d'un outil d'analyse de turbines radiales

Une première version du modèle de turbines a été implémentée en *Matlab*[2]. A ce stade, uniquement les vitesses des sections d'entrée et de sortie du rotor, et les pertes liées à ce dernier sont calculées. Le modèle permet d'évaluer les performances (rendement et puissance), de calculer le débit et les valeurs des différentes pertes pour des conditions de fonctionnement et une géométrie données. Le modèle ne permet pas actuellement de traiter les cas transsoniques. Un exemple de carte de turbine calculée avec le modèle *Matlab*[2] est donné à la Fig. 2.

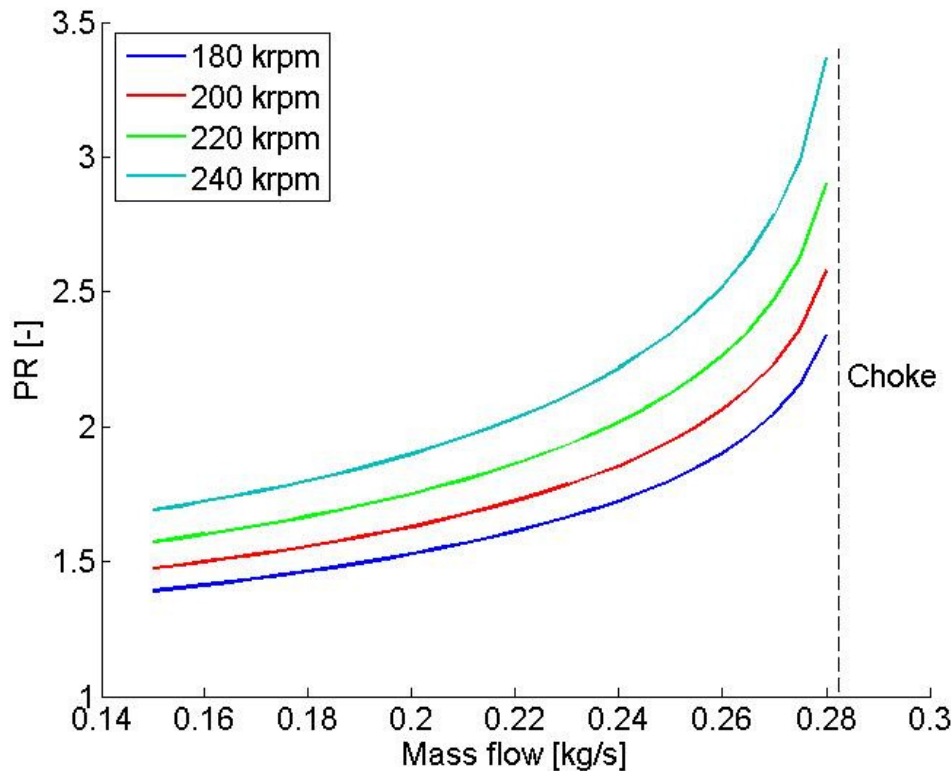


Fig. 2 : carte de turbine calculée avec le modèle Matlab pour la turbine développée pour le prototype d'ORC-ORC (pression totale en entrée $P00 = 50$ bar, température totale en entrée $T00 = 150^{\circ}\text{C}$)

Réactualisation du banc d'essai de pompes à chaleur

La nouvelle chaîne et le nouveau logiciel d'acquisition de données et de contrôle ont été mis en place.

Le banc d'essai a été testé avec une pompe à chaleur commerciale (SAPAC). Il a été utilisé, ensuite, pour des tests sur une pompe à chaleur expérimentale. Le banc d'essai avec le nouveau système d'acquisition et de contrôle fonctionne correctement.

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

Un outil de conception de systèmes ORC-ORC avait été développé en 2008. L'outil de conception se basait sur un modèle d'ORC-ORC développé sur un logiciel de flowsheeting commercial, *Vali-Belsim*[3]. Un nouveau modèle d'ORC-ORC a été développé sur *Matlab*[2] et va permettre, d'une part, de réduire les temps de calcul et, d'autre part, d'intégrer les modèles de compresseur, de turbine et de pertes liées à l'arbre de manière plus aisée.

Les interfaces pour intégrer les modèles de turbine et de compresseur ont été implémentées.

Etude théorique et optimisation de concepts d'ORC-ORC

Durant cette année, les études théoriques d'ORC-ORC n'ont pas été poussées plus loin. Les prochaines études seront réalisées une fois que le nouveau modèle d'ORC-ORC, et les modèles détaillés de compresseur et de turbine auront été intégrés à l'outil de conception de pompes à chaleur ORC-ORC.

Développement d'un prototype expérimental d'ORC-ORC

Une version simplifiée de la partie ORC moteur du système a été conçue, construite et instrumentée. Le schéma de l'installation est donné à la Fig. 3. Le but de cette installation est de pouvoir tester l'évaporateur supercritique, de type « spiral à tubes coaxiaux » (DTC), et la pompe à membrane avec du R134a, comme fluide de travail, à des conditions supercritiques (> 41 bar). L'évaporateur supercritique, les éléments qui n'étaient pas disponibles au laboratoire, et le système d'acquisition et de contrôle ont été commandés. L'ensemble a été mis en place (voir Fig. 4). Un programme d'acquisition des données et de contrôle de la pompe a été implémenté sur le logiciel *LabView*[7].

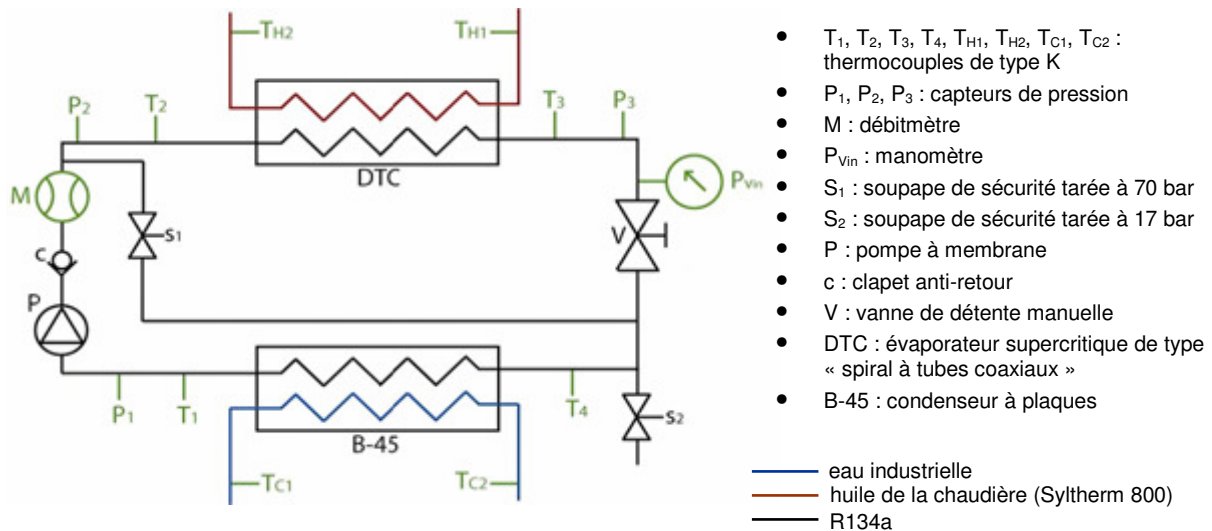


Fig. 3 : schéma de l'installation expérimentale de test de la pompe à membrane et de l'évaporateur supercritique

La conception des éléments fixes de la turbine (volute et aubes directrices) a été réalisée. En ce qui concerne les aubes directrices, un logiciel commercial, *AxCent* de *Concepts NREC*[6], a été utilisé pour le design et l'analyse CFD. Le nombre d'aubes directrices est de 5, ce qui est assez peu. Ce choix se justifie par le fait qu'on veut éviter d'atteindre des fréquences propres des aubes du rotor. La fréquence d'excitation f_e des aubes du rotor est donnée par :

$$f_e = f_{rotor} \cdot Nb_{ad} \quad \text{avec} \quad f_{rotor} : \text{la fréquence de rotation du rotor en tr/s}$$

$$Nb_{ad} : \text{le nombre d'aubes directrices}$$

En tournant à 250'000 tr/min, ce qui est la vitesse maximum qui doit être atteinte, f_e est égale à 20,83 kHz et ne dépasse pas la première fréquence propre des aubes du rotor qui a été évaluée à 32 kHz. La forme des aubes directrices a été définie de manière à ce que l'écoulement soit le plus régulier possible à l'entrée du rotor.

Pour le design de la volute, un programme de calcul de l'écoulement en incompressible implémenté en *Matlab*[2] a été utilisé.

Une fois les géométries définies, ces éléments ont été dessinés sur *CATIA*[9].

L'ensemble des pièces du côté turbine de l'unité compresseur-turbine a été conçu. Du côté compresseur, les éléments sont repris tel quel d'un compresseur entraîné électriquement qui a été développé lors d'une thèse précédente[4]. Le carter de ce compresseur a été modifié de façon à accueillir la turbine à la place du moteur électrique. Une coupe de l'unité, côté turbine, est montrée à la Fig. 5.

La conception des différentes pièces a été dictée par des contraintes d'assemblage et d'usinabilité, ainsi que par la grande précision requise de leur alignement les unes par rap-

port aux autres. Chaque pièce s'aligne sur une seule autre. La volute est divisée en deux parties pour des questions d'usinabilité.

Les o-rings sélectionnés pour le côté turbine sont composés d'un noyau en élastomère silicone enveloppé de PFE (téflon). Ces o-rings présentent une bonne compatibilité chimique avec le R134a et peuvent être utilisés à plus de 200 °C. Du côté compresseur, où il n'y a pas de problème de températures élevées, des o-rings standards en NBR seront utilisés.

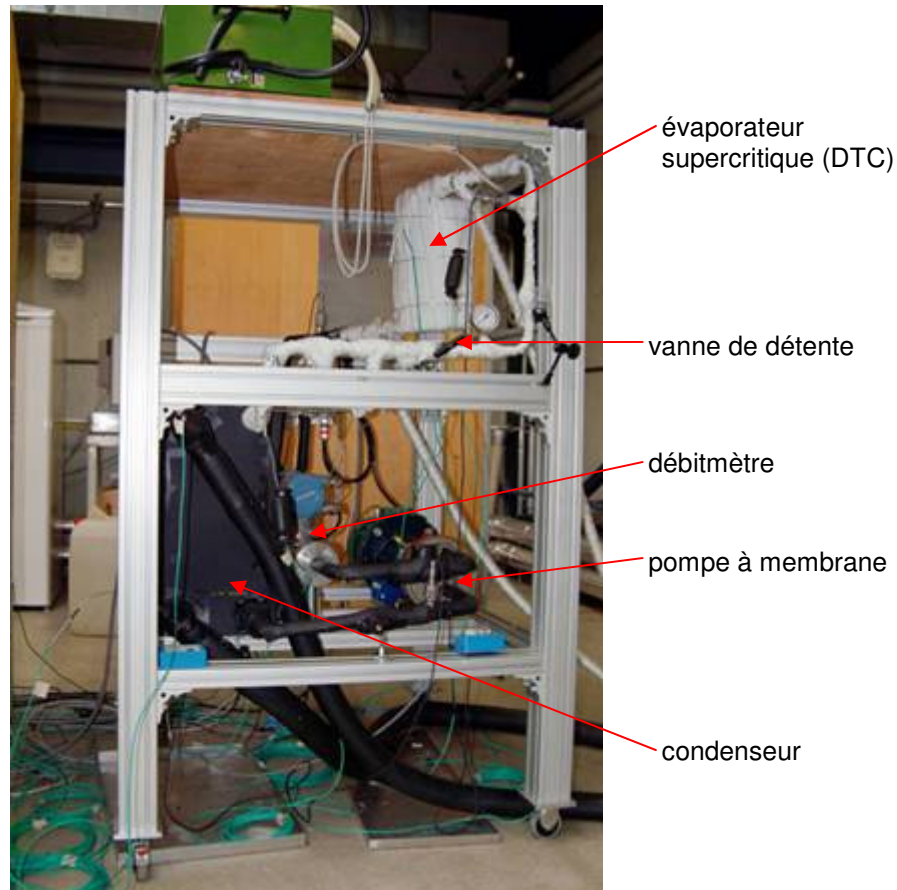


Fig. 4 : photo de l'installation expérimentale de test de la pompe à membrane et de l'évaporateur supercritique

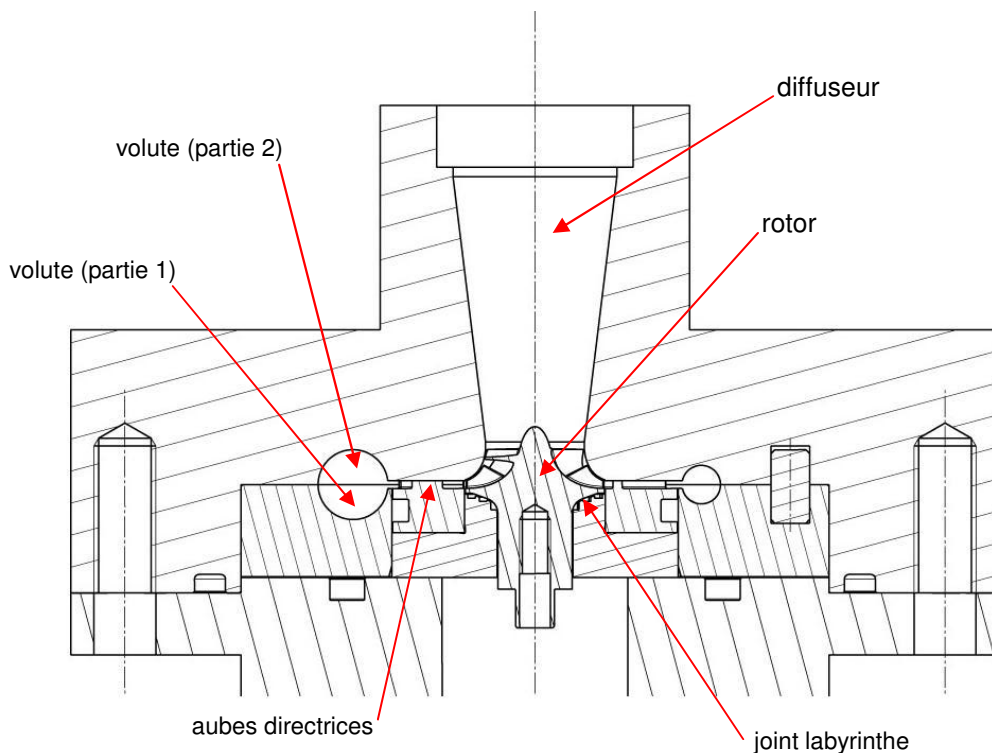


Fig. 5 : vue en coupe du côté turbine de l'unité compresseur-turbine

Des analyses éléments finis sur ANSYS[8] ont été réalisées sur certaines pièces pour contrôler que les contraintes ne dépassent pas les limites élastiques, et que les déplacements sont suffisamment faibles pour éviter les contacts entre le rotor et les éléments fixes. Les contraintes dans l'assemblage rotor-arbre ont été évaluées. Comme le rotor est en acier et l'arbre est en céramique (le coefficient de dilatation thermique de l'acier est plus élevé que celui de la céramique), lorsque la température de l'ensemble augmente, des contraintes assez élevées apparaissent au niveau du contact entre ces deux pièces. Les contraintes évaluées par calcul éléments finis restent bien plus faibles que les limites élastiques des deux matériaux. La tenue en pression du côté turbine de l'unité, qui sera soumis à une pression allant jusqu'à 70 bar, a été contrôlée. Un résultat de simulation pour une pression dans l'unité égale à 70 bar est donné à la Fig. 5.

Les différentes pièces de la turbine et le carter ont été usinés (voir Fig. 6), à l'exception de celle qui comprend le diffuseur et la deuxième partie de la volute qui est encore en cours d'usinage.

Le layout du prototype d'ORC-ORC complet a été défini. Suite aux résultats des mesures qui ont été réalisées sur l'échangeur DTC en évaporation supercritique, il a été décidé d'utiliser trois échangeurs de ce type pour la partie évaporation supercritique du prototype complet.

En parallèle, une pré-étude de la modification d'une chaudière à gaz pour introduire un évaporateur supercritique en lieu et place du serpentin de chauffage d'eau a été réalisée.

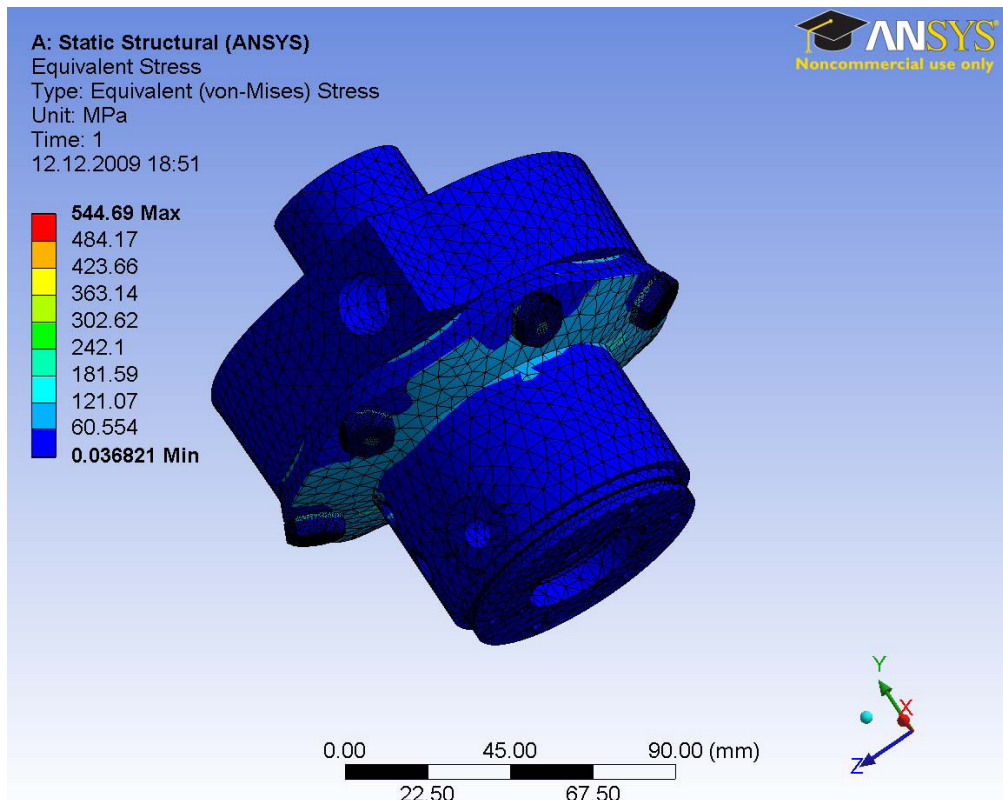


Fig. 5 : résultat d'une simulation effectuée sur ANSYS[8] de mise sous pression de l'unité compresseur-turbine (pression : 70 bar)

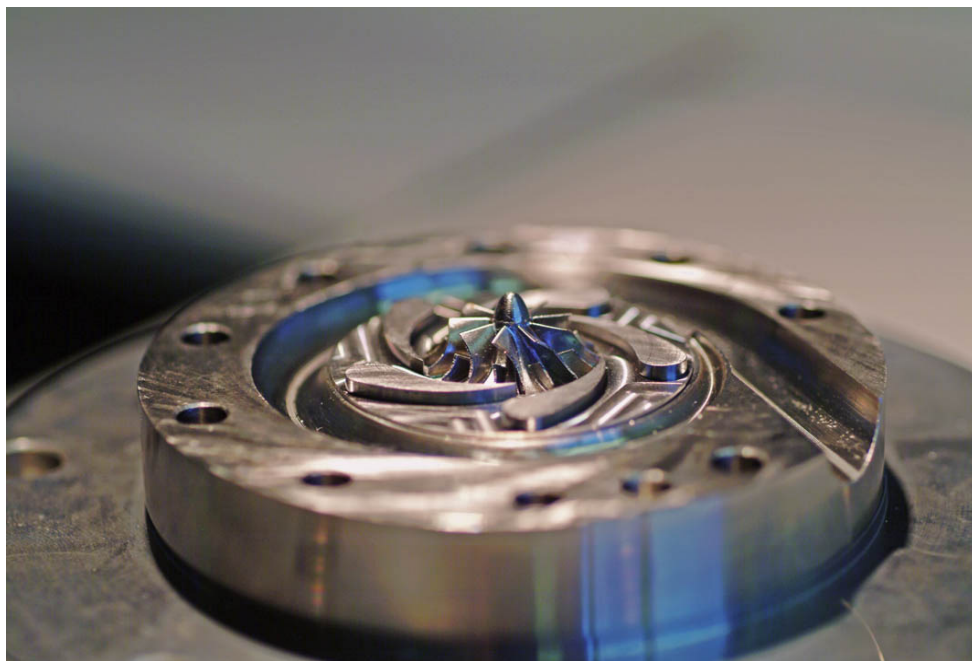




Fig. 6 : pièces usinées du côté turbine de l'unité compresseur-turbine

Tests du prototype expérimental d'ORC-ORC

La version simplifiée de la partie ORC moteur du système a été testée. Dans un premier temps, il y a eu un problème de contrôle de la montée en pression dans la partie haute pression du système. Il s'est avéré que le problème venait de la vanne de détente qui n'était pas adaptée aux conditions de fonctionnement. A la place de cette dernière, une autre vanne de détente a été installée. Avec cette nouvelle vanne, le système a montré une bonne contrôlabilité. Un autre problème quant au moteur de la pompe a été identifié. Comme les débits nécessaires étaient assez faibles, mais une grande différence de pression était demandée, le moteur devait tourner lentement, mais fournir un grand couple à la pompe. Par conséquent, le courant électrique du moteur était très élevé et, donc, le moteur s'échauffait trop et se déclenchait. Quelques réglages du variateur de fréquence qui alimente le moteur ont permis d'améliorer la situation. Après avoir réglé ces problèmes, des mesures sur l'évaporateur supercritique ont été effectuées pour différentes conditions de fonctionnement (voir Tab. 1). La discussion des résultats est faite au paragraphe suivant.

Paramètres	Valeurs
Débit R134a [kg/s]	0.05 / 0.08 / 0.1 / 0.13
Température de l'huile à l'entrée de l'évaporateur [°C]	50 / 120 / 180 / 220
Pression du R134a à l'entrée de l'évaporateur [bar]	45 / 55 / 65

Tab. 1 : valeurs des différents paramètres pour la caractérisation de l'échangeur DTC en évaporation supercritique

Calibration et validation des modèles développés

L'échange de chaleur prévu par le modèle d'échangeur DTC développé lors d'un projet d'étudiant en 2008[5] et l'échange de chaleur calculé avec les mesures correspondent bien. La différence relative ne dépasse pas 5.2%. Une comparaison des coefficients de transfert de chaleur globaux calculés avec le modèle et ceux mesurés est donnée à la Fig. 7.

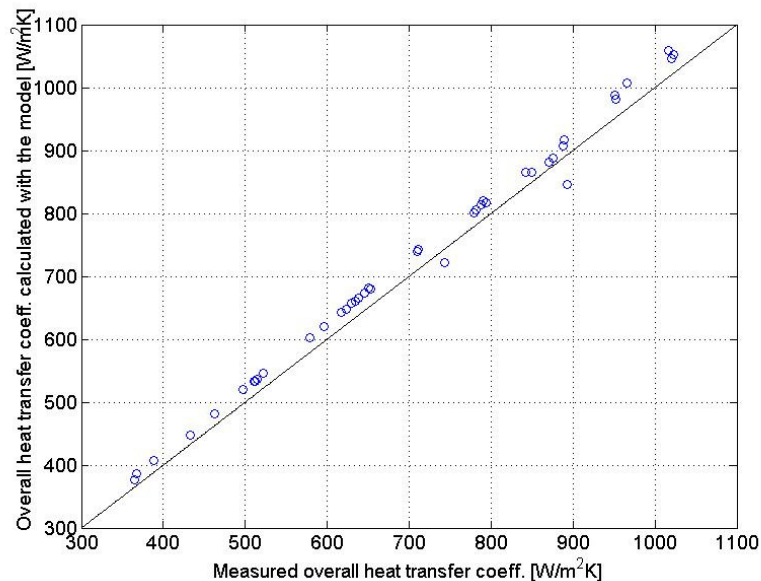


Fig. 7 : comparaison des coefficients de transfert de chaleur globaux calculés avec le modèle et ceux calculés à partir des mesures

Collaboration nationale

Les paliers à gaz de l'unité compresseur-turbine sont fournis par l'entreprise *Fischer Engineering Solutions AG*. L'assemblage et l'équilibrage de l'unité seront effectués, aussi, par cette entreprise.

Évaluation de l'année 2009 et perspectives pour 2010

Développement d'un outil d'analyse de turbines radiales

Une première version d'un programme de simulation de turbines radiales a été implémenté et donne des résultats réalistes. Les prochaines étapes sont l'implémentation de modèles des éléments fixes de la turbine (volute, aubes directrices et diffuseur) et l'adaptation du programme pour traiter les écoulements transsoniques.

Réactualisation du banc d'essai de pompes à chaleur

Les modifications sur le banc d'essai de pompes à chaleur sont terminées. Suite aux tests opérés sur ce dernier, il apparaît que tout fonctionne correctement.

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

Un modèle d'ORC-ORC a été implémenté sur *Matlab*[2] et viendra remplacer, dans l'outil de conception de pompe à chaleur ORC-ORC, le modèle développé précédemment sur un logiciel commercial de flowsheeting. Le modèle *Matlab* a l'avantage d'être plus rapide au niveau du temps de calcul. L'étape suivante sera d'intégrer les modèles détaillés de compresseur et de turbine au modèle du système complet.

Etude théorique et optimisation de concepts d'ORC-ORC

Les études théoriques n'ont pas été poursuivies cette année. Les prochaines études théoriques seront réalisées une fois que le modèle *Matlab*[2] d'ORC-ORC, et les modèles détaillés

de compresseur et de turbine auront été intégrés à l'outil de conception de pompes à chaleur ORC-ORC. Les systèmes avec un cycle pompe à chaleur bi-étagé, ainsi que le fonctionnement à charge partielle et avec d'autres fluides de travail que le R134a seront étudiés. Des designs optimisés de pompes à chaleur ORC-ORC pourront être proposés.

Développement d'un prototype expérimental d'ORC-ORC

Le développement de la partie turbine de l'unité compresseur-turbine s'est avéré complexe et plusieurs itérations ont été nécessaires pour obtenir un concept satisfaisant au niveau de l'usinabilité et qui permet de garantir les précisions d'alignement nécessaires des différentes pièces. Ce développement a, donc, pris plus de temps que prévu. Les prochaines étapes, en ce qui concerne l'unité compresseur-turbine, seront l'assemblage et l'équilibrage.

Les différents éléments manquants pour la construction du prototype d'ORC-ORC complet seront commandés, puis le tout sera assemblé.

Tests du prototype expérimental d'ORC-ORC

Les tests sur la version simplifiée de la partie ORC moteur du système ont permis de vérifier que la pompe à membrane et l'échangeur pour l'évaporation supercritique pouvaient fonctionner dans les conditions requises. Des mesures sur la pompe à membrane seront encore effectuées, afin de déterminer si l'utilisation de pompes à piston serait plus avantageuse au niveau de l'efficacité.

Dès que le prototype complet sera construit, les essais débiteront. Etant donné que le développement de l'unité compresseur-turbine a pris plus de temps que prévu, la période dédiée aux essais du prototype complet sera plus courte qu'initialement prévue.

Calibration et validation des modèles développés

Le modèle d'échangeur DTC développé lors d'un projet de semestre[5] permet d'évaluer correctement le transfert de chaleur entre le R134a et l'huile de la chaudière.

Après que les premiers essais du prototype d'ORC-ORC complet auront été effectués, les modèles détaillés du compresseur et de la turbine seront calibrés.

Suite aux essais, la comparaison entre le modèle d'ORC-ORC et les mesures sera effectuée.

Références

- [1] Whitfield A., Baines N.C. 1990. "Design of Radial Turbomachines," Essex, Longman Scientific & Technical.
- [2] The MathWorks, Inc, 2006. Matlab R2006b. <http://www.mathworks.com>.
- [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] Henchoz S. 2008. "Study of a Supercritical Evaporator for an ORC-ORC Thermally Driven Heat-Pump," student semester project, Laboratory for Industrial Energy Systems, EPFL.
- [6] Concepts NREC, 2007. AGILE Engineering Design System. <http://www.conceptsnrec.com>.
- [7] [National Instruments](http://www.ni.com), 2008. LabView 8.x. <http://www.ni.com>.
- [8] ANSYS Inc., 2009. ANSYS 12.0. <http://www.ansys.com>.
- [9] DASSAULT SYSTEMES, 2004. CATIA 5.15. <http://www.3ds.com>.