

Daniel Favrat, Prof., Dr. Ing. dipl. EPF
Laboratoire d'Énergétique Industrielle (LENI)
EPFL
Station 9
1015 LAUSANNE
daniel.favrat@epfl.ch
<http://leni.epfl.ch>

20 ans de contribution du LENI-EPFL à la recherche sur les pompes à chaleur

Zusammenfassung

Das LENI-EPFL hat im Laufe der Jahre einen beträchtlichen Teil der Forschungsanstrengungen auf das Feld der Wärmepumpen konzentriert. In diesem Feld wurden sowohl Wärmepumpen für Raumwärme im häuslichen Bereich, für Fernwärmenetze als auch für Anwendungen in der Industrie untersucht. Die methodischen Forschungsbeiträge waren die Verbesserung der Formulierung von Exergy Indikatoren, auch für ein Gesetz zur Energie und der Energie Integration von industriellen Prozessen. Sogenannte „environomic“ Optimierungsanalysen von integrierten Systemen mit Wärmepumpen wurden veröffentlicht. Das LENI trug zudem einen beträchtlichen Anteil zu international preisgekrönten Veröffentlichungen zum Thema „tubular boiling“ von Kältemitteln mit einem neuen physikbasierten Ansatz bei. Die technologischen Innovationen umfassen wichtige Beiträge zu Scrollverdichtern, zweistufige Wärmepumpen und Beiträge zu kleinen Hochgeschwindigkeits-zentrifugalkompressoren mit Kühlmitteldampfschmierung. Neue Konzepte für Fernwärme- und Kältenetze mit zentralen und dezentralen Wärmepumpen wurden vorgeschlagen. Superkritische Wärmepumpenkreisprozesse für die Speicherung von elektrischem Strom wurden ebenfalls untersucht.

Abstract

Throughout the years LENI-EPFL spent a significant part of its research activities on heat pumps be it for industrial heat recovery or for domestic or district heating and cooling. Methodological contributions include the improvement of the formulation of the exergy efficiency indicators, including for a cantonal law on energy and in the energy integration techniques for industrial processes. Novel, so-called environomic, mono- and multi-objective optimisation analyses of large integrated systems with heat pumps, including for tri-generation have been published. LENI also contributed to a novel physically based correlation for tubular boiling of various refrigerants that received an international award. The main technological innovations include major contributions to scroll compressors with intermediate vapor injection, two-stage domestic heat pumps and small high speed radial compressors on self-acting refrigerant vapor bearings with direct thermal or electric drives. New concepts of district heating and cooling systems with centralized and decentralized heat pumps have been proposed. Supercritical heat pumps cycles for novel electricity storage concepts have also been studied.

Introduction

Résumer plus de 20 années de recherche dans un domaine en une présentation n'est pas une sinécure mais c'est aussi une chance, de se remémorer une vision initiale et sa confrontation à la réalité, de mesurer les défis accomplis et ceux qui sont en cours ou restent en gestation. Plus de 20 années, en fait près de 24 ans depuis les débuts du LENI avec trois axes principaux en matière de systèmes énergétiques :

1. améliorer les indicateurs de performances, notamment s'appuyant sur l'exergie (qui montrent que les pompes à chaleur (PAC) ont un grand rôle à jouer)
2. développer des méthodes de conception et d'optimisation de systèmes énergétiques intégrés sur des bases holistiques et notamment environnementales (prenant en compte les facteurs environnementaux, énergétique et économique)
3. contribuer au développement de meilleures technologies en vue d'une utilisation rationnelle de l'énergie, dont les PAC.

Pourquoi les PAC sont-elles si importantes dans nos activités. Une analyse élémentaire montre que la consommation d'énergie finale en Suisse pour du chauffage en cumulant la part des hydrocarbures liquides et gazeux et du bois est de l'ordre de 40% (Figure 1, [1]). Une grande partie de cette consommation est pour des besoins de chauffage à relativement basse température (maisons, eau chaude sanitaire) ou dans un cadre industriel où il existe encore un potentiel non négligeable de revalorisation par PAC de la chaleur résiduelle. L'homme a découvert le feu pour se chauffer il y a près de 400'000 ans. Depuis lors on a juste mis une boîte isolée autour et on appelle ce dispositif une chaudière auquel on ose attribuer un rendement proche de 100% (parce que basé seulement sur le premier principe de la thermodynamique). Est-ce vraiment une technologie du 21ème siècle? Mérite-t-elle un si bon indicateur de performance ? La réponse est bien sûr négative et la figure 2 montre qu'avec une même unité de combustible il est possible de générer au moins deux fois plus de chaleur utile en intégrant des PAC. Le potentiel de réduction de gaz à effet de serre et de notre dépendance énergétique en mettant en jeu des PAC est donc considérable.

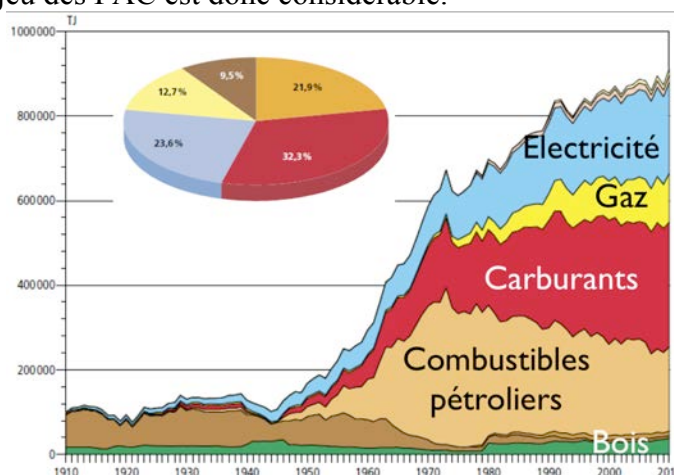


Figure 1: Consommation d'énergie finale en Suisse jusqu'en 2010 [1]

Contribution aux aspects méthodologiques et indicateurs

Dès les années 1990 un accent de la recherche a été mis sur les aspects méthodologiques en combinant premier et deuxième principes de la thermodynamique. Il s'agit d'une part de la théorie de l'exergie et d'autre part d'une approche simplifiée de celle-ci qui est l'intégration énergétique par la méthode du pincement appliquée non seulement aux procédés industriels, mais aussi à la conception de réseaux urbains ou de systèmes plus complexes de PAC.

Ce fut la réalisation du logiciel Pinchleni [2,3], un logiciel à vocation didactique mais aussi applicable à l'intégration de PAC industrielles dans des procédés en facilitant la synthèse par courbes composées et la conception de réseaux d'échangeurs. Les concepts de base de ce logiciel ont récemment été reprogrammés dans le logiciel désormais appelé PinCH par Olsen et al. [4].

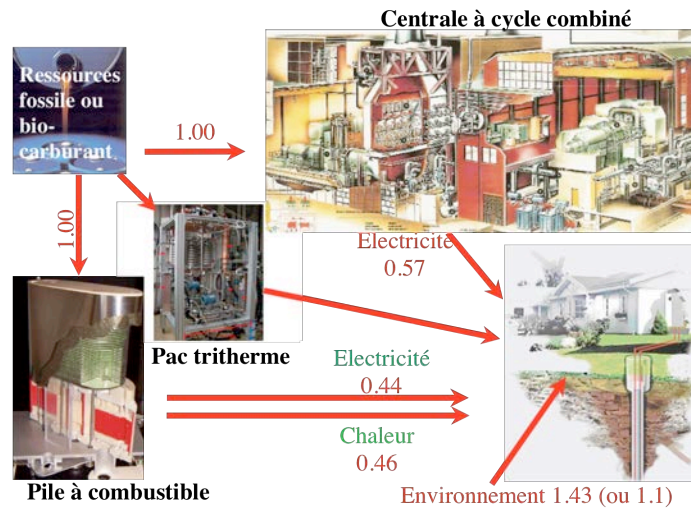


Figure 2: Trois différents types d'intégration de technologies avec PAC en vue d'une réduction de consommation et d'émissions de moitié

Une des contributions originales du LENI [5] a été l'extension de la méthode du pincement à la prise en compte de toutes les pertes exergétiques tout en étendant la synthèse aux besoins électriques également. Sur cette base, la figure 3 illustre les bénéfices attendus de l'intégration d'une PAC ouverte dans un procédé de distillation (recompression mécanique de vapeur). Le fait de remonter par compression de vapeur le plateau rouge de condensation au-dessus du plateau bleu d'évaporation, tel que représenté dans la figure de droite, permet une réduction des pertes exergétiques de 75%. L'introduction du diagramme supérieur (puissance électrique – Carnot facteur) permet de clairement représenter le bilan électrique résultant. D'autres exemples d'application également aux PAC fermées, notamment pour le séchage sont donnés dans les thèses Staine [6], Kruppenacher [7], et tout récemment Becker [8]. Cette dernière caractérise l'évolution des outils de conception développés au LENI, sous l'impulsion plus récente du Dr F. Maréchal, avec une forte imbrication entre la théorie du pincement et les algorithmes d'optimisation permettant d'aller jusqu'à la conception automatique de systèmes complexes incluant notamment des PAC et de la cogénération.

Un des développements cruciaux du LENI a été le développement d'un algorithme évolutif multi-objectifs parfaitement adaptés à l'optimisation environnisme de systèmes énergétiques complexes. Ce développement réalisé dans le cadre de projets de l'Alliance for Global Sustainability avec les EPF, MIT et l'Université de Tokyo a permis la réalisation d'analyses très fécondes, tant pour les systèmes incluant des PAC, que pour la conception intégrée de composants avancés. Cet algorithme d'optimisation résultant de deux thèses, est décrit, notamment dans la publication de Molyneaux et al. [9] en liaison avec les réseaux urbains équipés de PAC. Une des publications les plus internationalement citées utilisant cet algorithme est celle de Burer et al. [10] montrant l'importante réduction possible d'émissions de gaz à effet de serre en tri-génération pour un quartier urbain.

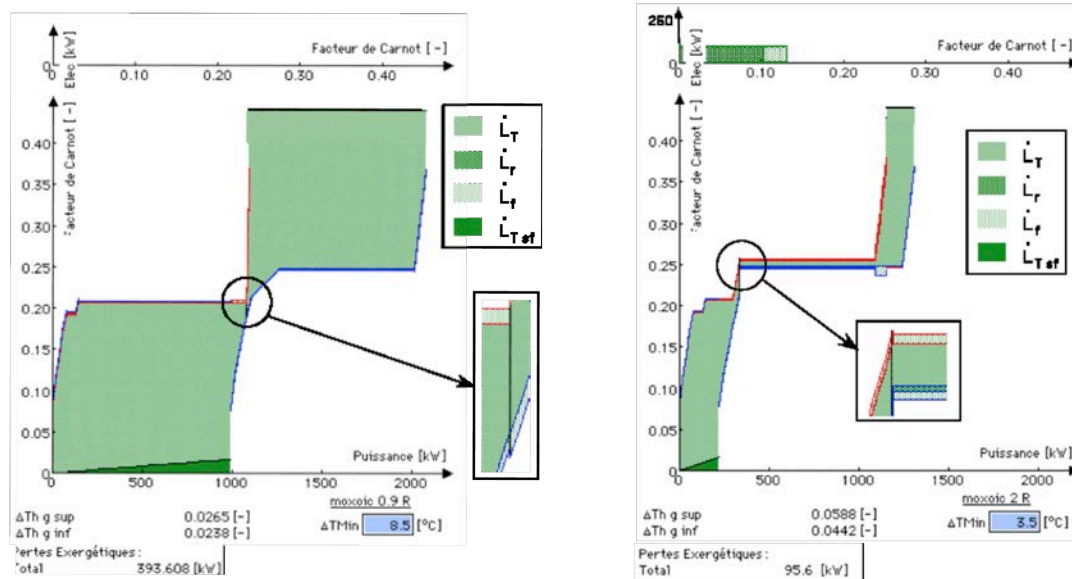


Figure 3: Méthode du pincement étendue appliquée à un procédé de distillation simple (à gauche) ou avec intégration d'une PAC ouverte (recompression mécanique de vapeur) (à droite). Les plages colorées illustrent les pertes exergetiques.

En matière d'exergie, certaines des contributions marquantes ont été :

- La refonte et la traduction anglaise des livres Borel, Favrat [11] avec notamment l'extension de la représentation graphique de la cuvette exergetique (figure 4) et une description plus précise du calcul des pouvoirs exergetiques. Cette dernière est particulièrement indiquée dans le cadre des systèmes de conversion plus complets incluant une séparation et l'éventuelle réutilisation du CO₂. Quant à la cuvette exergetique elle permet d'illustrer l'inévitable perte progressive de la valeur qualitative de l'énergie et l'intérêt de revaloriser l'énergie de l'environnement (état mort 1) avec des énergies aussi nobles que sont les combustibles ou l'électricité.

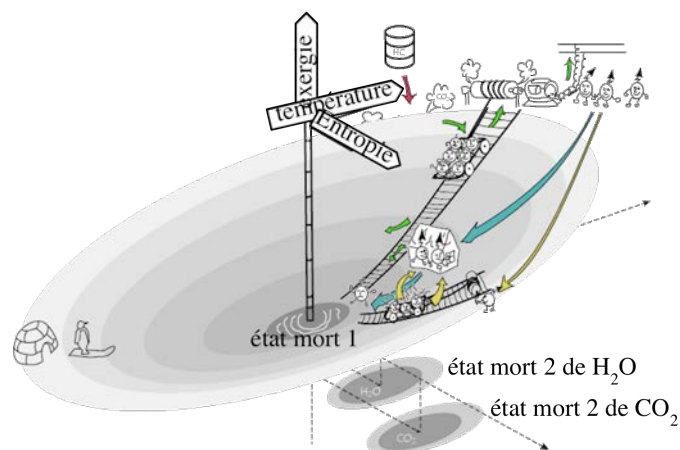


Figure 4: Représentation de la cuvette exergetique avec les différents modes de chauffage (chauffage électrique direct, chaudière simple, cogénération, PAC électrique) (l'état mort 1 caractérise l'équilibre thermo-mécanique avec l'atmosphère et l'état mort 2 l'équilibre complémentaire des concentrations dans l'atmosphère)[11]

- La contribution à l'introduction du rendement exergetique dans la loi genevoise sur l'énergie [12] (figure 4 et tableau 1) permettant d'étayer les recommandations les plus importantes telles que :

- Chauffer à la plus basse température possible
- Refroidir à la plus haute température possible

et de mettre en évidence l'intérêt des PAC. Cette introduction dans une loi, qui plus est votée par le peuple, provoque un intérêt international certain, même si on peut se prendre à regretter qu'elle n'ait pas encore été étendue à toute la Suisse !

Tableau 1: Rendement exergetique de différences technologies de chauffage [12]

| Technologies | Power plant | Dist. plant | Building plant | | | Room convector | | | Overall exergy efficiency (%) | | |
|--|-------------|-------------|----------------|---------|---------|----------------|---------|---------|-------------------------------|---------|---------|
| | | | 45°/35° | 65°/55° | 75°/65° | 45°/35° | 65°/55° | 75°/65° | 45°/35° | 65°/55° | 75°/65° |
| Supply/return temperatures | | | 45°/35° | 65°/55° | 75°/65° | 45°/35° | 65°/55° | 75°/65° | 45°/35° | 65°/55° | 75°/65° |
| Direct electric heating (nuclear power) | 0.32 | | | | | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 2.2 | 2.2 | 2.2 |
| Direct electric heating (combined cycle cogeneration) | | 0.55 | | | | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 3.7 | 3.7 | 3.7 |
| Direct electric heating (hydro power) | 0.88 | | | | | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 6.0 | 6.0 | 6.0 |
| District boiler | | 0.2 | 0.54 | 0.76 | 0.86 | 0.53 | 0.38 | 0.33 | 5.8 | 5.8 | 5.8 |
| Building non-condensing boiler | | | 0.11 | 0.16 | 0.18 | 0.53 | 0.38 | 0.33 | 6.1 | 6.1 | 6.1 |
| Building condensing boiler | | | 0.12 | | | 0.53 | | | 6.6 | | |
| District heat pump (nuclear power) | 0.32 | 0.61 | 0.54 | 0.76 | 0.86 | 0.53 | 0.38 | 0.33 | 5.6 | 5.6 | 5.6 |
| Domestic heat pump (nuclear power) | 0.32 | | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.53 | 0.38 | 0.33 | 7.6 | 5.4 | 4.8 |
| Domestic cogeneration engine and heat pump | | | 0.22 | 0.25 | 0.26 | 0.53 | 0.38 | 0.33 | 11.8 | 9.4 | 8.7 |
| District heat pump (combined cycle power) | 0.54 | 0.61 | 0.54 | 0.76 | 0.86 | 0.53 | 0.38 | 0.33 | 9.4 | 9.4 | 9.4 |
| Domestic heat pump (combined cycle power) | 0.54 | | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.53 | 0.38 | 0.33 | 12.9 | 9.2 | 8.1 |
| Domestic heat pump (cogeneration combined cycle power) | | 0.55 | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.53 | 0.38 | 0.33 | 13.2 | 9.4 | 8.3 |
| Cogeneration fuel cell and domestic heat pump | | | 0.25 | 0.27 | 0.28 | 0.53 | 0.38 | 0.33 | 13.4 | 10.4 | 9.5 |
| District heat pump (hydropower) | 0.88 | 0.61 | 0.54 | 0.76 | 0.86 | 0.53 | 0.38 | 0.33 | 15.4 | 15.4 | 15.4 |
| Domestic heat pump (hydropower) | 0.88 | | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.53 | 0.38 | 0.33 | 21.2 | 15.1 | 13.3 |

Le tableau 1 tiré de la publication [12] montre les rendements de chauffage pour trois différentes températures de réseaux de chauffages domestiques et indiquant clairement l'avantage des PAC.

Concepts avancés de composants et de pompes à chaleur

Venant d'un centre industriel de recherche, ayant apporté, dans les années 80, des contributions aux plus grandes PAC de réseaux de chauffage urbains (tri-étagées, 2 fois 45 MWth) installées à Goteborg, au développement de compresseur à vis sans huile pour la vapeur d'eau [13] (dont un exemplaire tourne toujours chez Lonza), aux premiers essais de compresseur scroll, et aux essais d'expandeurs biphasiques, mes premières préoccupations dans le monde académique et en matière de PAC ont été :

- a. De faire une synthèse des principales filières technologiques (compression, chimique, magnétique ou thermoélectrique) et de leur perspective dans un contexte de substitution des CFC. Cette synthèse a confirmé la poursuite de la domination des systèmes à compression de vapeur, car ils présentaient, et présentent toujours, des perspectives de rendements exergetiques largement supérieurs aux autres filières technologiques. [14]
- b. de clarifier les lacunes existantes dans les corrélations de transfert de chaleur en évaporation tubulaire notamment.
- c. de poursuivre la quête de compresseurs (et expandeurs) plus évolués, voire sans huile, permettant des cycles multiétagés plus performants.

Evaporateurs tubulaires

Concernant le point (b), un stand d'essai dit biphasé et permettant les essais dans n'importe quelle position de tubes d'évaporateur de 3m de longueur a été élaboré et monté (figure 5). Ce stand permet de visualiser les domaines d'écoulement lors de l'évaporation, soit dans un espace annulaire chauffé à contre-courant par de l'eau glycolée, soit dans des tubes équipés de voyants en leurs extrémités.

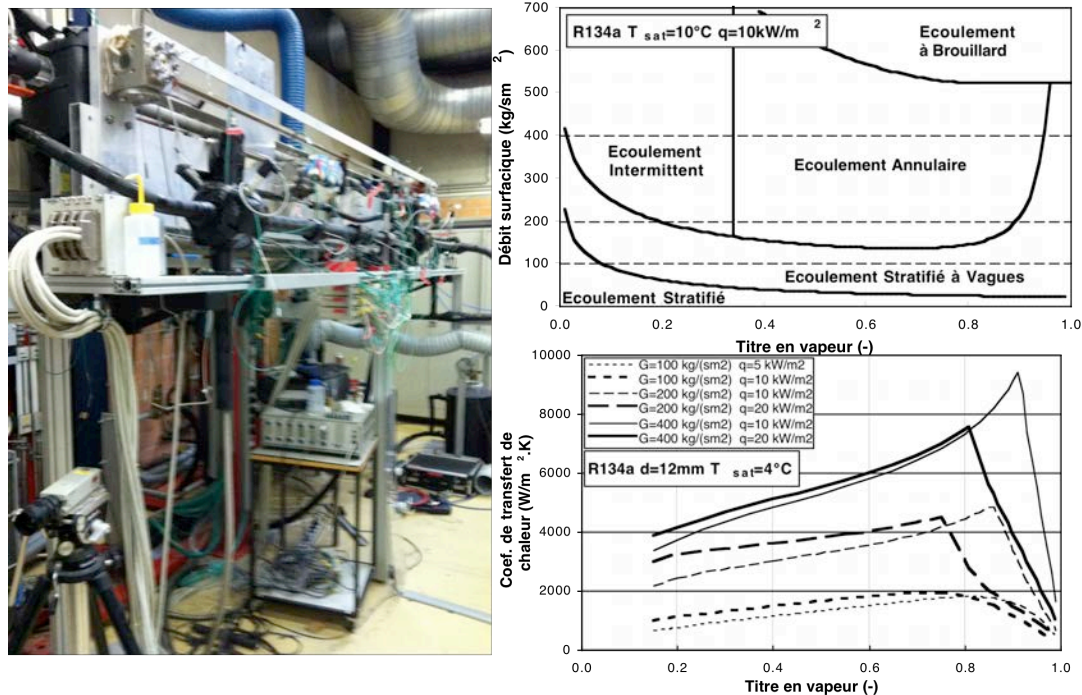


Figure 5: Stand d'essai (biphasé) d'évaporation tubulaire avec les résultats en terme de champ d'écoulement et de coefficient de transfert de chaleur pour du R134a pur [15].

Soutenus par l'OFEN et l'ASHRAE notamment des essais d'évaporation de plusieurs HFC ou d'ammoniac, en présence d'huile ou pas, ont permis de concevoir un nouveau type de corrélation de type physique de transfert de chaleur en évaporation tubulaire. Ces études, menées en collaboration avec John Thome, qui était alors scientifique invité occasionnel au LENI, ont été couronnées par le prix de la meilleure publication scientifique 1998 en transfert de chaleur de l'ASME (American Society of Mechanical Engineers). Cette publication en trois parties [16] fait l'objet de quelque 200 citations dans les journaux scientifiques et permet de prendre en compte plus précisément les différents champs d'écoulement avec l'état de mouillage des tubes en cours d'évaporation.

Ces études ont également permis d'évaluer expérimentalement l'influence de l'huile sur le transfert de chaleur en cours d'évaporation sur des tubes lisses et sur des tubes améliorés (Figure 6). Pour les tubes lisses, comme on le voit à gauche de la figure 6, l'influence n'est pas toujours claire sauf pour des titres élevés de vapeur où l'influence de l'huile est nettement préjudiciable. En ce qui concerne les tubes améliorés (figure 6 droite) la présence d'huile est toujours négative ce qui n'est pas surprenant puisque l'huile a tendance à se concentrer dans les cavités et à détruire l'effet d'amélioration.

Les corrélations obtenues ont par ailleurs été ultérieurement améliorées et étendues aux fluides frigorigènes différents des HFC comme l'ammoniac [18]. Ces différents efforts de compréhension des évaporateurs sont actuellement poursuivis notamment

pour les évaporateurs microtubaires dans le laboratoire du Prof Thome, fondé en 1998.

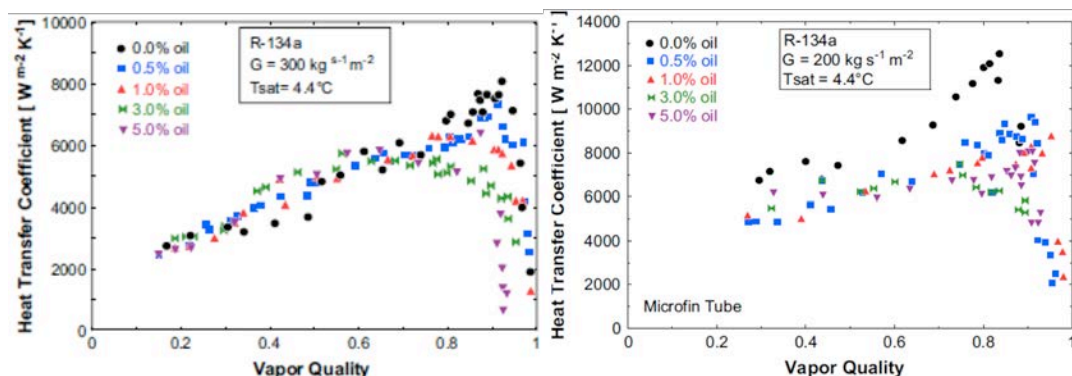


Figure 6: Effet sur le transfert de chaleur de la présence d'huile dans des tubes d'évaporateur, soit à surface plane [16], soit à micro-ailettes [17]

Vers des pompes à chaleur domestiques biétagées

Les PAC domestiques à entraînement électrique ont fait de grands progrès au début des années 90 grâce en particulier à l'introduction de compresseurs plus performants, notamment des compresseurs scroll. Les premières études au LENI portèrent sur le comportement des compresseurs scroll tant en compression biphasique [19], qu'en détente. Malheureusement les cycles monoétagés, en l'absence de turbines de détente biphasiques adéquates, représentent une sérieuse limitation à l'accroissement des performances de PAC, notamment pour les PAC air-eau à haute élévation de température. L'auteur avait déjà antérieurement essayé d'analyser les turbines de détente en lieu et place des vannes de détente. Toutefois les perspectives, en tout cas pour les turbines volumétriques, se sont avérées très limitées, en particulier en raison des phénomènes de retard à l'ébullition étudiés sous [20]. Restait donc la transition vers des cycles biétagés. Les premiers essais de PAC biétagée avec deux compresseurs hermétiques en série ont démontré le potentiel de gain en COP et en puissance de chauffage par rapport au cycle monoétagé (figure 7 [21]).

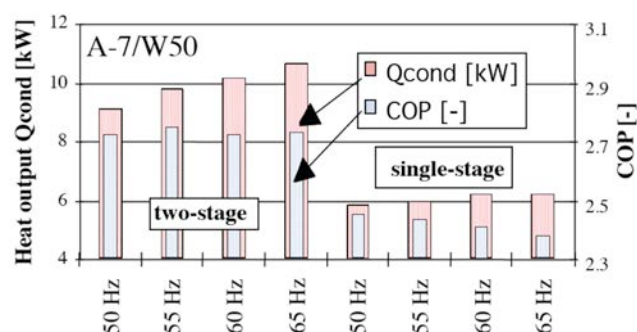


Figure 7: Comparaison des performances d'une PAC air-eau biétagée (avec le compresseur BP à vitesse variable) par rapport à une monoétagée [21]

Le problème principal était alors celui de la migration d'huile entre les deux compresseurs et, en général, les fabricants étaient peu disposés à envisager un système qui apparaissait comme trop compliqué. D'où une stratégie à deux volets :

- Simplifier le système en étudiant des cycles à deux étages mais avec un seul compresseur à injection intermédiaire de vapeur (compresseur dit à économiseur), même dans la faible gamme des compresseurs scroll.

b) Explorer des concepts de compresseurs sans huile qui permettraient de s'affranchir de la migration d'huile, tout en utilisant mieux les échangeurs à surfaces améliorées et en permettant des degrés de surchauffe plus faibles.

Compresseur scroll à injection intermédiaire de vapeur

Lors d'un séjour sabbatique au MIT en 1999, l'auteur est allé à la maison mère de Copeland les convaincre de participer à un projet commun visant à développer et à tester leurs compresseurs scroll avec des ports d'injection intermédiaire comme on peut les trouver sur les compresseurs à double-vis. Cette collaboration avec le soutien de l'OFEN et d'EDF et en collaboration avec un fabricant suisse de pompe à chaleur air-eau, a permis d'étendre la plage d'élévation de température et d'améliorer le coefficient de performance (COP) des PAC air-eau.

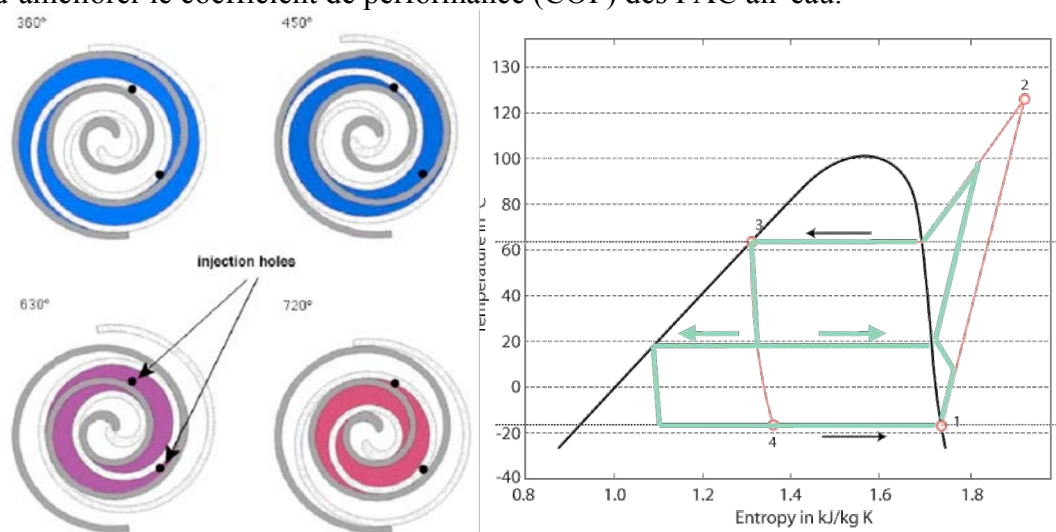


Figure 8: Représentation approximative de la position des ports d'injection intermédiaire dans un compresseur scroll et du cycle dans un diagramme T-s

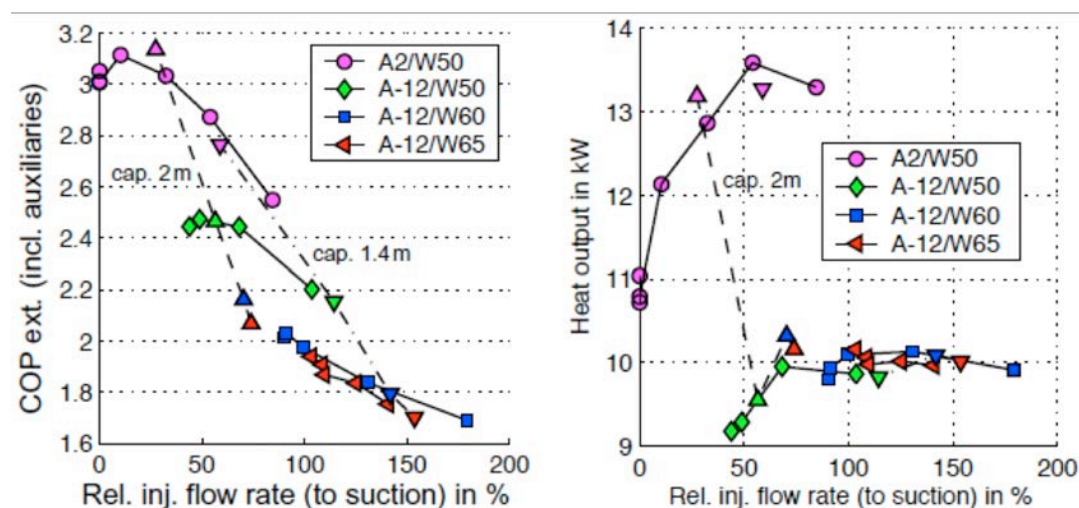


Figure 9: COP et puissance chaleur délivrée en fonction du débit d'injection (R407C) dans une PAC air-eau avec compresseur scroll et injection intermédiaire pour différentes longueurs de capillaires de première détente [22,23]

Les résultats expérimentaux montrent bien l'importance et le rôle de l'injection intermédiaire. Ces études furent un succès et ces compresseurs sont disponibles depuis lors sur le marché européen. Nous nous plaisons à qualifier les cycles de ce type, les cycles "bi-étages du pauvre" en raison de leur coût moindre par rapport à un vrai cycle biétagé!

Pac air-eau à cycle biétagé

Afin d'avoir une base de comparaison identique, les essais avec deux compresseurs scroll fonctionnant en cycle biétagé ont été repris sur le même stand d'essai. Les résultats de la figure 10 confirment les bénéfiques ceux des premières tentatives en 96-97 avec une augmentation substantielle du COP et de la puissance de chauffage. A noter aussi dans le cadre de ces efforts expérimentaux, la tentative réussie de mesurer on-line la concentration d'huile à l'amont de la vanne de détente au moyen d'un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier, résultats qui n'ont pour l'heure été publiés que dans la thèse Zehnder [22].

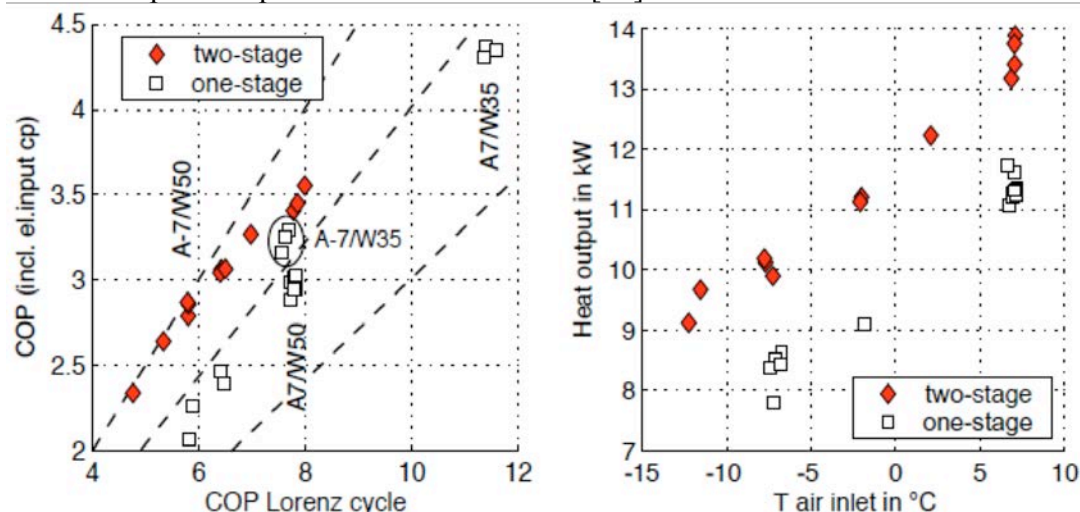


Figure 10: Comparaison des COP et de la puissance de chauffage entre cycle mono-étagé et biétagé [23]

Une autre tentative a également été entreprise, dans l'optique d'un accroissement de puissance de PAC air-eau pendant la pointe hivernale, de rajouter un compresseur booster en amont du compresseur principal. L'objectif était d'avoir un compresseur booster bon marché et à moindre durée de vie pour éviter l'utilisation de résistances électriques par temps très froids. Les essais ont été réalisés avec un compresseur ouvert de type scroll de climatisation automobile dont le rapport de volume installé avait été réduit [24]. Ces essais ont permis de montrer qu'avec la même pompe à chaleur mono-étagée initiale il était possible, sans changer l'évaporateur, ni le condenseur, de doubler la puissance de chauffage sans pertes importantes de COP.

Le problème essentiel est qu'un tel compresseur booster même tiré de la climatisation de véhicule, donc à durée de vie plus faible, revient tout aussi cher, voire plus qu'un compresseur hermétique, avec cependant les problèmes de retour d'huile en moins, mais l'inconvénient d'être un compresseur ouvert à joint d'arbre.

Compresseur radial à haute vitesse et sans huile

Le problème de la migration d'huile dans les cycles biétagés à double compresseur n'étant pas résolu sans complexité excessive, le LENI s'est penché très tôt sur la possibilité de développer des compresseurs entraînés par moteur électrique à haute vitesse et tournant sans huile sur paliers à vapeur de fluide frigorigène.

Les bases méthodologiques pour la conception très intégrée d'un tel compresseur, d'abord mono-étagé, ont été développées dans la thèse Schiffmann [25 à 28] finalisée en collaboration avec un leader suisse des broches de machine outil, Fischer AG à Herzogenbuchsee.

La démonstration expérimentale d'un compresseur mono-étagé de ce type au R134a, avec une roue de 20 mm de diamètre a conclu cette thèse avec des points à

210'000 t/min et un rapport de pression de 3.4 suffisant pour une pompe à chaleur saumure-eau avec chauffage au sol. Les efforts se concentrent depuis sur les essais d'une version biétagée avec le même entraînement moteur et des paliers à gaz similaires (paliers à gaz autonome à chevrons). Des résultats récents ont permis d'atteindre 176'000 t/min dans un concept de PAC compacte biétagée air-eau sans huile. Même si le chemin fut et sera encore parcouru d'embuches, nous estimons que l'avenir de ce type de compresseur révolutionnaire est prometteur en ouvrant la voie à de nouveaux concepts de systèmes intégrés avec pompes à chaleur compactes. Les essais continuent.

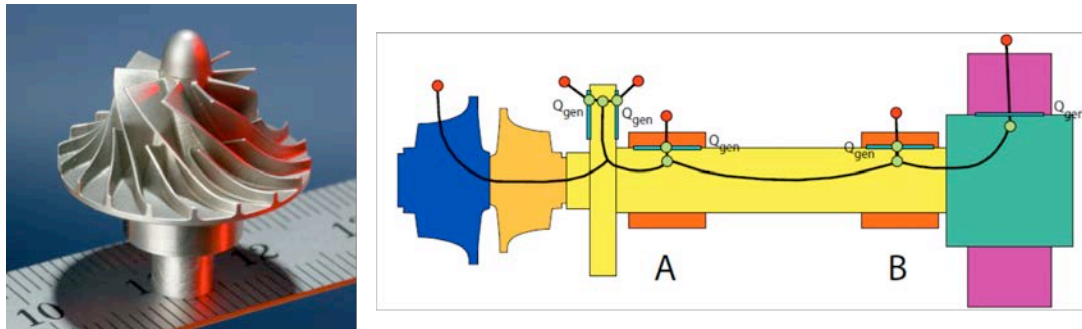


Figure 11: Vue d'une roue de compresseur et représentation schématique du concept biétagé pour le calcul de dynamique de rotor [24,25,26,27]

L'expertise en matière de petites turbomachines sur paliers à gaz est également utilisée dans un autre projet prometteur de PAC tritherme qui fait l'objet d'une autre présentation à ce symposium [29].

Par ailleurs un autre type de compresseur potentiellement sans huile mais volumétrique, le scroll co-rotatif sur roulement à billes céramiques refroidis par le fluide frigorigène lui-même a fait l'objet de travaux antérieurs [30, 31] dont certains ont été repris dans un autre cadre.

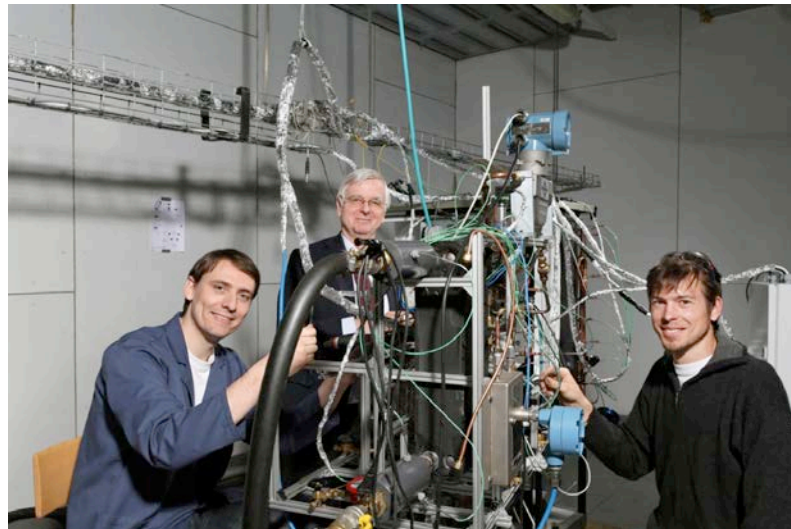


Figure 12: L'équipe du LENI travaillant sur la pompe à chaleur air-eau biétagée et sans huile (photo Alain Herzog)

Pompes à chaleur de réseaux urbains

Les milieux urbains représentent un secteur important de consommation énergétique et les PAC ont un potentiel considérable, particulièrement en Suisse où la plupart des villes sont localisées près de lacs ou de rivières importantes. Un concept préliminaire de réseaux de chauffage et de refroidissement utilisant un fluide frigorigène comme fluide de réseau en capitalisant sur les chaleur latentes au

lieu des chaleurs sensibles a été étudié au début des années 90 [32]. Cependant le contexte de substitution des fluides frigorigènes CFC et les difficultés perceptibles du point de vue de la toxicité avec l'ammoniac, nous ont conduit à abandonner provisoirement cette idée.

Une installation remarquable dans nos murs, la centrale de chauffe de l'EPFL avec deux pompes à chaleur de 3.9 MW sur l'eau du lac et deux turbines à gaz de cogénération a naturellement fait l'objet de plusieurs études qui restent pour une bonne part d'actualité. La première d'entre elle analyse l'optimisation thermoéconomique des opérations de la centrale avec ses possibilités de stockage thermique [33] et l'autre résume les résultats expérimentaux des performances de la centrale après onze années de fonctionnement [34].

Lorsqu'on considère des chauffages urbains avec PAC le niveau de température aller et retour est très important sur les performances. Au lieu de prévoir une distribution aller supérieure à la température des utilisateurs les plus exigeants, une approche alternative consiste à introduire des pompes à chaleur décentralisées pour ceux-ci en modérant la température moyenne de réseau. Le problème d'optimisation devient alors complexe avec plusieurs dizaines de variables de décision surtout si on veut aussi considérer des coûts de pollution en comparant les systèmes. Utilisant un algorithme génétique mono-objectif du MIT, Curti dans sa thèse [35] a permis de rationaliser les compromis à faire au niveau des investissements en démontrant le grand intérêt des pompes à chaleur urbaines. Ces résultats ont fait l'objet de deux publications fréquemment citées [36]. Le problème a été repris ultérieurement avec une vue plus complète grâce au nouvel algorithme développé dans la thèse Molyneaux et succinctement décrit dans [9].

Plus récemment deux nouvelles thèses ont permis d'une part de renforcer la structuration des besoins énergétiques d'un territoire urbain par Système d'Information Géographique (SIG) en prenant en compte les besoins en température (thèse Girardin décrite dans [37]) et de proposer notamment un nouveau concept original basé sur une distribution de CO₂ liquide et gazeux agissant en temps que source et puits de chaleur en milieu urbain (thèse Weber décrite dans [38]).

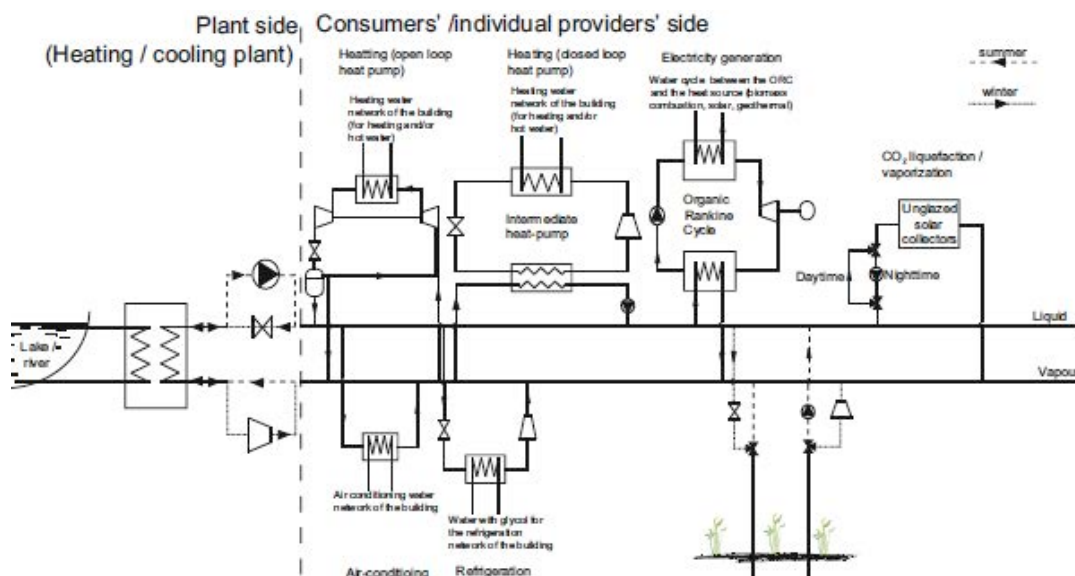


Figure 13: Réseau de chauffage et de refroidissement urbain avec distribution de CO₂ [38]

Cycle de pompe à chaleur pour du stockage d'électricité

Parmi les options de stockage d'électricité en dehors du pompage –turbinage ou de l'air comprimé, une autre approche consiste à alterner un cycle de PAC avec un cycle moteur en utilisant un stockage sous forme thermique par exemple. Dans le cadre d'une collaboration avec ABB Recherche, le LENI a contribué à l'optimisation thermoéconomique de ce type de concept [39,40]. Par ailleurs la contribution au stockage d'électricité par cycles impliquant des PAC fait l'objet d'une collaboration fructueuse avec l'institut KIMM en Corée du Sud [41].

Conclusions et Perspectives

Les pompes à chaleur ont un rôle clef à jouer dans les systèmes actuels et futurs, et les recherches entreprises au LENI mettent en évidence leur potentiel d'amélioration dans le domaine industriel, du confort domestique et des réseaux énergétiques urbains, allant même jusqu'au cycle de stockage d'électricité. Le futur est encore plus prometteur si l'erreur n'est pas commise de « se reposer sur ses lauriers » en renonçant à une recherche de pointe dans ce secteur crucial. Les collaborations internationales sont également à cultiver. Par ailleurs, il est également important de convaincre le public et les politiques que l'énergie de l'environnement, tout comme les rejets thermiques, font partie intégrante des énergies renouvelables et que leur valorisation passe par les PAC.

Remerciements

L'auteur remercie l'Office Fédéral de l'Energie, le NEFF, la CTI, EDF, ECLEER, Fischer Engineering, ABB, le SCANE, les SIG, ASHRAE et plusieurs autres industries et institutions pour leurs soutiens financiers aux différents projets mentionnés. Remerciements aussi à tous les collaborateurs du LENI impliqués dans les projets mentionnés dans cet article.

Sources

- [1] OFEN, "Statistique globale suisse de l'énergie 2010" Office Fédéral de l'Energie, 2010.
- [2] D.Favrat, F.Staine: "An interactive approach to the energy integration of thermal processes". *Int. Conf. on Computer Aided Learning and Instruction in Science and Engineering*, Lausanne, Sept 9-11, 1991.
- [3] F.Staine, "Logiciel Pinchleni". *Rapport OFEN*. ENET Art 30374, 1995.
- [4] D.Olsen, A.Egli, B.Wellig, "PinCH: an analysis tool for the process industries", *Conf. ECOS 2010*, Ed. D.Favrat et al., Lausanne.
- [5] F.Staine, D.Favrat, "Energy Integration of Industrial Processes Based on the Pinch Analysis Method Extended to Include Exergy Factors", *Journal of Applied Thermal Eng.*, vol.16, pp. 497–507, 1996.
- [6] F.Staine, "Intégration énergétique des procédés industriels par la méthode du pincement étendue aux facteurs exergétiques", *thèse EPFL 1318*, 1994.
- [7] P.Krummenacher, "Contribution to the heat integration of batch processes (with or without heat storage)", *thèse EPFL 2480*, 2001.
- [8] H.C.Becker, "Methodology and Thermo-Economic Optimization for Integration of Industrial Heat Pumps", *thèse EPFL 5341*, 2012
- [9] A.Molyneaux, G.B.Leyland, D.Favrat, "Environomic multi-objective optimisation of a district heating network considering centralized and

- decentralized heat pumps”. *Energy* 35(2) pp751-758, 2010.
- [10] M.Burer, D.Favrat et al. “Multicriteria optimisation of a district heating cogeneration plant integrating a Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine combined cycle, heat pumps and chillers”, *Energy* 28 (6) pp 497 – 518, 2003.
- [11] L.Borel, D.Favrat, “Thermodynamique et énergétique” vol. 1 et 2 , *PPUR* 2005 et 2007, traduit en anglais sous le titre “Thermodynamics and energy systems analysis” vol 1 and 2 *EPFL Press* , 2010 et 2012.
- [12] D.Favrat, F.Marechal, O.Epelly, “The challenge of introducing an exergy indicator in a local law on energy”. *Energy* 33 (2), pp130-136, 2008.
- [13] B.Degueurce, Banquet, J.P.Denisart, D.Favrat, “Use of a twin-screw compressor for steam recompression”. *BHRA Symposium on the Large Scale Application of Heat Pumps*, York, 1984 (reprinted in: *Hydraulic Pneumatic Mechanical Power and World Pumps Journal*, Dec. 1984).
- [14] D.Favrat, “Thermopompes et frigopompes: Filières technologiques et perspectives”. *Conférence sur "La couche d'ozone, sa sauvegarde et la santé"*, SWKI/SICC, EPFL, Nov. 1989.
- [15] N.Kattan, J.R.Thome, D.Favrat, “Flow Boiling in Horizontal Tubes. Parts 1 to 3”. *Journal of Heat Transfer*, Vol.120, N°1, pp.140-165, 1998.
- [16] O.Zürcher, J.R.Thome, D.Favrat, “Flow Boiling and Pressure Drop Measurements for R134a/Oil Mixtures. Part 2: Evaporation in a Plain Tube”. *HVAC&R Research*, ASHRAE, Vol.3, N°1, pp.54-64, 1997.
- [17] E.Nidegger, J.R.Thome, D.Favrat, “Flow Boiling and Pressure Drop Measurements for R134a/Oil Mixtures. Part 1: Evaporation in a Microfin Tube”. *HVAC&R Research*, ASHRAE, Vol.3, N°1, pp.38-53, 1997.
- [18] O.Zürcher, D.Favrat,J.R.Thome, “Evaporation of refrigerants in a horizontal tube: a new flow pattern dependent heat transfer model compared to ammonia data” *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol 45(2), pp 303-317, 2002.
- [19] Th.Afjei, P.Suter, D.Favrat “Experimental Analysis of an Inverter-Driven Scroll Compressor with Liquid Injection”. *Purdue Compressor Conference*, 1992.
- [20] D.Favrat, J.P.Denisart, I.Ryhming “Vaporization of superheated water under sudden depressurization”. *3rd Multiphase Heat and Mass Transfer Symposium*, Miami, 1982 (reprinted in: 1983 European Two-phase Flow Group Meeting).
- [21] D.Favrat, E.Nidegger, D.Reymond, G.Courtin “Comparison between a single-stage and a two-stage air to water domestic heat pump with one variable speed compressor. *IIR Conference on heat pump systems, energy efficiency and global warming*, Linz, Oct 1997.
- [22] M.Zehnder, D.Favrat et al. “High performance air-water heat pump with extended application range for residential heating, *7th IEA Heat Pump Conference*, Beijing, May 2002.
- [23] M.Zehnder, “Efficient air-water heat pumps for high temperature lift residential heating, including oil migration aspects”. *Thèse EPFL* 2998, 2004
- [24] M.Zehnder, J.Schiffmann, J.B.Carre, D.Favrat ”Implementation of a scroll booster compressor into a single-stage air-water heat pump for peak winter day”. *Int. conf. ECOS2010*, Lausanne (2010).
- [25] J.Schiffmann “Integrated design, optimisation and experimental investigation

- of a direct driven turbocompressor for domestic heat pumps". *Thèse EPFL* 4126, 2008.
- [26] J. Schiffmann and D. Favrat, "Experimental investigation of a direct driven radial compressor for domestic heat pumps," *International Journal of Refrigeration*, vol. 32, no. 8, pp. 1918-1928, 2009.
- [27] J. Schiffmann and D. Favrat, "Design, experimental investigation and multi-objective optimisation of a small-scale radial compressor for heat pump applications". *Energy* 35(1), pp 436-450 , 2010.
- [28] J. Schiffmann and D. Favrat, "Integrated design and optimisation of gas bearing supported rotors". *ASME Journal of Mechanical Design*, vol. 132, (5) , 2010
- [29] J. Demierre, "Theoretical and Experimental Study of a Thermally Driven Heat Pump Based on a Double Organic Rankine Cycle". *Thèse EPFL* 5201 , 2012.
- [30] A.Molyneaux, Zanelli R, "Externally pressurized and hybrid bearings lubricated with R134a for oil-free compressors". *Purdue Compressor Conference*, 1996.
- [31] A.Molyneaux, A.Merminod, D.Favrat et al, "Compresseur de réfrigérants hermétique et sans huile". Rapport NEFF , 1997.
- [32] D.Favrat, T.Grivel, "District Heating and Cooling with Heat Pumps and Refrigerant Networks: Utopia or Possibility?" *Int. Conf. on Conventional and Nuclear District Heating*, Lausanne, March 18-22, ed. G.Sarlos, D.Favrat, 1991.
- [33] M. von Spakovsky, M.Batato, V.Curti, "The Performance Optimization of a Gas Turbine Cogeneration / Heat Pump Facility with Thermal Storage", *Journal of engineering for gas turbines and power*, vol. 117, (2), p. 4-9, 1995.
- [34] X.Pelet, D.Favrat, A.Voegeli, "Performance of a 3.9 MW Ammonia Heat Pump in a District Heating Cogeneration Plant: Status after eleven years of operation", *Compression Systems with Natural Working Fluids, IEA Annex 22 Workshop*, Gatlinburg, TN, USA, Oct. 2-3, 1997.
- [35] V.Curti, "Modélisation et optimisation environomiques de systèmes de chauffage urbain alimentés par pompes à chaleur". *Thèse EPFL* 1776 ,1998.
- [36] V.Curti, D.Favrat, M. von Spakovsky, "An environomic approach for the modeling and optimization of a district heating network based on centralized and decentralized heat pumps, cogeneration and/or gas furnace: Parts 1&2: Methodology and results", *Int. journal of Thermal Sciences*, vol. 39, (7), 2000.
- [37] L.Girardin, F.Marechal, D., "Energis: a geographical information based system for the evaluation of integrated energy conversion systems in urban areas". *Energy*, 35(2), pp 830-840, 2010.
- [38] C.Weber, D.Favrat, "Conventional and advanced CO₂ based district energy systems. *Energy* 35(12), pp 5070-5081, 2010.
- [39] M.Morandin, F.Marechal, et al."Conceptual design of a thermo-electrical energy storage system based on heat integration of thermodynamic cycles". *Energy*, in print, 2012.
- [40] S.Henchoz, F.Buchter, D.Favrat et al."Thermoeconomic analysis of a solar enhanced energy storage concept based thermodynamic cycles. *Energy*, 41(1), pp 113-120, 2012.
- [41] Y.M. Kim, C.G. Kim, D.Favrat,"Transcritical or supercritical CO₂ cycles using both low- and -high temperature heat sources", *Energy*, in press, 2012.

