



Prof. Dr Daniel Favrat
Directeur du Laboratoire d'énergétique industrielle et de l'Institut des Sciences de l'énergie de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Pompes à chaleur

en constant progrès

Le potentiel d'économie d'énergie et d'émissions de CO₂ à travers le remplacement de chaudières traditionnelles par des pompes à chaleur (PAC) est énorme. Plusieurs filières existent, mais ce sont les PAC à compression de vapeur qui domineront, avec une amélioration de leur rendement par le développement de compresseurs bi-étagés. Les PAC seront aussi importantes pour les systèmes de chauffage et de refroidissement urbains qu'il convient de développer rapidement.

Le deuxième principe de la thermodynamique permet d'expliquer que la chaleur se transmet toujours du plus chaud au plus froid. L'idée de pomper de la chaleur du plus froid au plus chaud à l'aide d'une pompe à chaleur a constitué l'une des inventions majeures du 19^e siècle. Elle a permis de réaliser du froid artificiellement, de congeler pour la conservation des aliments, et de séparer les gaz de mélanges gazeux tels que l'air par séparation cryogénique. Elle a aussi permis de tendre vers des températures proches du zéro degré absolu (-273° C) avec notamment le domaine des supraconducteurs permettant les champs magnétiques nécessaires aux scanners.

Energie recyclée

Le même principe de pompe à chaleur (PAC) permet aujourd'hui d'exploiter le plus grand réservoir d'énergie renouvelable : l'environnement, trop longtemps considéré seulement comme dépotoir gratuit pour nos rejets y compris pour nos gaz d'échappement de voiture ou de cheminée. En fait, toute l'énergie que nous utilisons finit dans l'environnement. Une PAC de chauffage de bâtiment ou d'eau chaude sanitaire n'est donc rien d'autre qu'une installation de recyclage de l'énergie thermique que nous utilisons pour nous chauffer.

Le principe de la pompe à chaleur permet aujourd'hui d'exploiter le plus grand réservoir d'énergie renouvelable : l'environnement.

Compte tenu de l'existence de PAC efficaces, brûler du mazout ou du gaz dans une simple chaudière seulement pour du chauffage – ce qui représente près de 40% de l'énergie finale consommée en Suisse – est un énorme gaspillage de ressources comme nous l'avions montré dans un article précédent (*Les Cahiers de l'énergie* N° 64, novembre 2006, pp. 31-32).

Filières technologiques

Naturellement, le pompage de la chaleur ne peut se faire sans un apport d'énergie plus noble, c'est-à-dire soit de l'électricité, de l'énergie mécanique ou de la chaleur à un niveau de température supérieur. Il existe quatre filières de technologies de PAC, à savoir, dans l'ordre de rendement¹ et d'importance sur le marché :

- 1) Les PAC à compression de vapeur (a) ou de gaz (b)
- 2) Les PAC chimiques (absorption, diffusion)
- 3) Les PAC thermoélectriques
- 4) Les PAC magnétiques

Les **PAC thermoélectriques** (3) sont basées sur l'effet Peltier qui est le suivant : si l'on fait passer du courant électrique dans une jonction entre deux matériaux différents, l'un s'échauffe et l'autre se refroidit. Ce principe, conduisant à des installations de faible rendement, est essentiellement utilisé pour des applications de refroidissement de petite puissance, même si les progrès en cours dans le domaine des matériaux semi-conducteurs permettront un léger accroissement de performance.

Les **PAC à compression de vapeur** (1a) et à **absorption liquide** (2) utilisent le fait qu'un fluide, dit frigorigène, a une grande chaleur latente de changement de phase en cours d'évaporation à basse pression (captage de chaleur basse température) et de condensation à plus haute pression (rejet de chaleur utile à plus haute température). Un compresseur généralement entraîné électriquement dans le cas 1 ou un système plus complexe (d'absorbeur, pompe et bouilleur) dans le cas 2 permet le passage de l'évaporateur à basse pression (et température de l'environnement) au condenseur à plus haute pression (et température de chauffage).

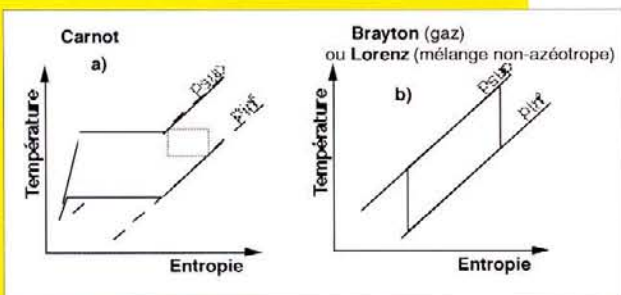


Fig. 1 : Diagramme T-s de différents cycles de PAC à compression (P_{sup} et P_{inf} étant des pressions) ou magnétique (P_{sup} et P_{inf} étant des niveaux de champ magnétique).

Malheureusement, la stabilité chimique des couples fluide frigorigène-solvant dans le cas des PAC à absorption limite la température du bouilleur à des températures inférieures à 200° C. Ceci se traduit par des rendements faibles en cas d'utilisation de mazout ou de gaz pour le chauffage du bouilleur, même si l'utilisation d'une telle PAC est déjà énergétiquement meilleure que le fait d'utiliser une simple chaudière. Les PAC à absorption sont surtout adaptées aux cas d'utilisation de rejets thermiques (par exemple de moteurs ou de piles à combustible de cogénération) ou d'énergie de capteurs solaires thermiques.

Les principaux cycles relatifs aux PAC à compression ou magnétiques sont représentés à la figure 1. Les principales PAC à compression de vapeur utilisent un cycle dérivé de celui de Carnot, dit de Rankine, entre deux niveaux de pression alors que les PAC magnétiques utilisent souvent un cycle de Brayton (ou pseudo-Brayton) entre deux niveaux différents de champ magnétique.

L'option magnétique : la grande inconnue

Le principe des PAC magnétiques est un réchauffement d'un matériau ferromagnétique lorsqu'il entre dans un champ magnétique suivi de son refroidissement à sa sortie du champ. Des transferts de chaleur intermédiaires après échauffement par magnétisation (côté chauffage) et après refroidissement par démagnétisation (côté environnement) permettent le pompage de la chaleur.

Faisant l'objet de développements depuis une trentaine d'années, ces filières souffrent de la faible différence de température possible en pompage de chaleur malgré des champs magnétiques très élevés (de l'ordre de 1 à 6 teslas). Outre la recherche de nouveaux matériaux, les voies de développement comprennent le recours à des cycles régénératifs avec des échanges de chaleur internes importants ou à des cycles superposés, tous deux générateurs de pertes non négligeables.

De nombreuses questions quant aux performances réellement possibles pour une gamme d'élévation de température réaliste,

à la durée de vie voire à la toxicité et aux relations efficacité-coûts des matériaux, ainsi qu'aux effets des champs magnétiques dans un contexte domestique, sont encore ouvertes.

Marché de remplacement

Au vu du tour d'horizon ci-dessus, les PAC à compression de vapeur vont rester la filière technologique très largement dominante, ce d'autant que leur rendement (COP/COPth) est déjà souvent supérieur à 40% et que la marge de progression est encore substantielle. Si le marché des PAC de maisons individuelles ou mitoyennes se développe de façon remarquable en Suisse pour les constructions neuves à chauffage à basse température, le grand marché de la substitution des chaudières requérant des différences de température plus importantes a un potentiel considérable de développement.

Les PAC actuelles sont essentiellement basées sur un cycle mono-étagé (figure 2) avec successivement le compresseur (1-2'), le désurchauffeur-condenseur (2'-3'), la vanne de détente (3'-4') et l'évaporateur (4'-1). Pour des PAC en substitution de chaudière, c'est-à-dire avec une différence de température élevée entre condenseur et évaporateur, le cycle mono-étagé conduit à des pertes importantes, à raison de près de 50% dans le compresseur, 35% dans la vanne de détente et 15% dans les échangeurs.

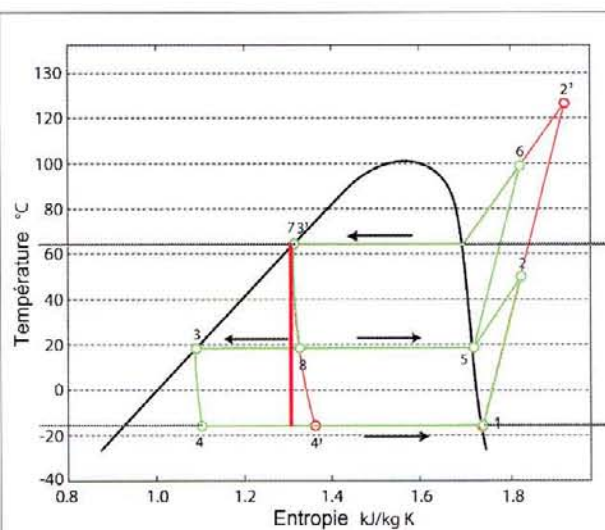


Fig. 2 : Représentation de cycles de pompe à chaleur à compression de vapeur de type mono- (rouge) et bi-étagé (vert).

Vers un meilleur rendement

La situation peut être légèrement améliorée par l'utilisation de compresseurs à injection intermédiaire de vapeur récemment introduits sur le marché à la suite d'une recherche commune EPFL-EDF-Copeland et SATAG. Il s'agit alors de ce que l'on peut appeler un cycle bi-étagé du pauvre dans la mesure où un seul compresseur assume imparfaitement les fonctions de deux étages de compression. Toutefois, l'objectif, à notre sens, doit désormais être le développement de cycles vraiment bi-étagés (1-2-5-6-7-8-3-4, figure 2) qui permettraient de faire un saut en rendement de quelque 10 à 20%.

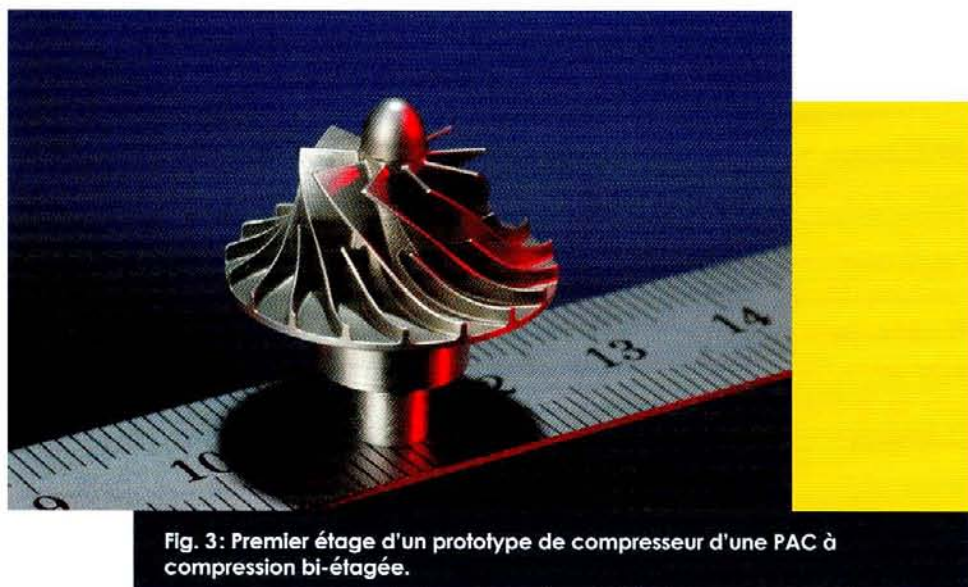


Fig. 3: Premier étage d'un prototype de compresseur d'une PAC à compression bi-étagée.

Un projet de recherche en cours à l'EPFL en collaboration avec un industriel suisse vise à développer un compresseur bi-étagé miniature et sans huile pour de telles PAC. Les avantages de ce futur concept comprennent : la miniaturisation de l'unité de compression (figure 3²), l'absence d'huile favorisant l'efficacité des surfaces améliorées de transfert de chaleur, un net gain de performance, une facilité de recyclage du fluide frigorigène et un suivi de charge en continu limitant les pointes électriques et les pertes par cyclage. Ce type d'amélioration pourra être utilisé aussi bien pour des fluides frigorigènes synthétiques de type HFC (hydrofluorocarbures) que des fluides naturels comme le butane.

Fluides frigorigènes

La problématique des fluides frigorigènes (voir encadré p. 32) fait malheureusement l'objet d'une réglementation confuse et à nos yeux largement inadaptée. Aux termes de l'accord de Kyoto, les émissions de gaz à effet de serre que sont le CO₂ et les HFC sont traitées de façon séparée, apparemment sans effort de cohérence en tout cas au sein de la communauté

européenne dont la Suisse dépend.

La figure 4 illustre les effets directs et indirects sur le réchauffement global liés à une chaudière et à une pompe à chaleur rendant le même service de chauffage. La courbe du bas montre l'effet de serre lié à la production d'électricité (dans le cas d'un mix américain) pendant la durée de vie de la PAC. La courbe supérieure montre l'effet de la chaudière. Le cas hypothétique où le fluide de travail de la PAC serait relâché à l'atmosphère, contrairement aux règles professionnelles en vigueur, est représenté par le petit triangle qui est pratiquement négligeable.

Autant dire que c'est l'arbre qui cache la forêt. D'un côté, on élabore des règlements et lois pour restreindre les fluides frigorigènes les plus efficaces et de l'autre on tolère sans complexe l'énorme gaspillage que représentent les simples chaudières. Il existe bien sûr des alternatives sous forme de fluides frigorigènes naturels que sont l'ammoniac NH₃ (toxique et modérément inflammable), les principaux hydrocarbures (butane et propane qui sont inflammables) et le CO₂.

Le CO₂ est désormais sérieusement considéré, mais le domaine de température requis pour le chauffage et la préparation d'eau chaude nous amène dans le domaine supercritique avec un fort gradient de température au niveau de l'échangeur de chauffage qui remplace désormais le condenseur. La préparation d'eau chaude sanitaire est le principal service qui soit bien adapté au fort gradient en jeu et pour autant que des précautions soient prises pour assurer un chauffage en partant de l'eau froide directement. La figure 5 illustre le cycle dans un diagramme thermodynamique.

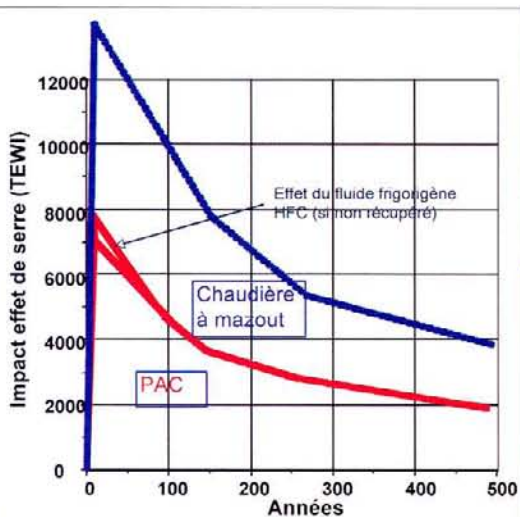


Fig. 4 : Comparaison de l'effet de serre entre une pompe à chaleur alimentée à l'électricité (mix américain) et une chaudière effectuant la même fonction de chauffage (ligne pointillée). Avec un mix de production suisse, la différence serait encore considérablement plus marquée.

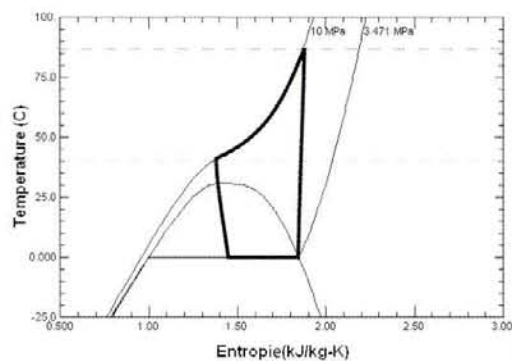
PAC à CO₂

Des installations de chauffage d'eau sanitaire fonctionnant avec PAC à CO₂ sont déjà disponibles au Japon et leur apparition sur le marché européen est en cours. Malheureusement, les systèmes de chauffage eux-mêmes sont actuellement basés sur une faible différence de température aller-retour (typiquement <10° C) qui rend le cycle mono-étagé à CO₂ particulièrement peu efficace. Il est donc important pour le CO₂, encore plus que pour les autres fluides, de s'orienter vers des cycles multi-étagés, voire même avec un étage de turbine pour accroître les performances.

A vrai dire, l'intérêt de concevoir des systèmes de chauffage notamment d'immeubles à haut gradient de températures de chauffage, tel que suscité par l'utilisation de CO₂, convie à une réflexion intéressante s'étendant jusqu'à une meilleure utilisation des réseaux de chauffage à distance qui devraient dans le futur être en grande partie alimentés par pompe à chaleur. Ceci pourrait par exemple impliquer de rénover en basse température seulement la partie basse des immeubles en limitant ainsi les coûts.

Par ailleurs, des concepts originaux de systèmes de chauffage et de refroidissement urbains s'appuyant sur le CO₂ sont à l'étude notamment à l'EPFL. Ces concepts pourraient favoriser une trigénération³ efficace dans nos villes, qui présentent un énorme potentiel d'économie d'énergie et d'émissions de CO₂ grâce aux pompes à chaleur. Il faut espérer que ces technologies ne seront pas prises en otage politique entre des approches environnementales partielles (problème des HFC) ou sectaires (n'acceptant pas l'énergie de l'environnement en tant qu'énergie renouvelable sous prétexte que de l'électricité doit être utilisée pour sa valorisation).

Fig. 5 : Cycle simple de PAC à CO₂.



Références

¹ Les indicateurs de performance des PAC sont:

- le coefficient de performance COP (ou efficacité), qui est défini comme le rapport entre l'énergie de chauffage et l'énergie fournie (électricité, combustible ou énergie thermique de rejet ou solaire).
- le rendement exergétique, qui peut être approximé comme étant le rapport entre le coefficient de performance réel et le coefficient de performance idéal théorique (COP/COP_{th}).

² Voir aussi la fig. 3 du N° 64 des *Cahiers de l'énergie*, p. 32.

³ La trigénération est la fourniture des services énergétiques principaux que sont le chaud, le froid et l'électricité.