



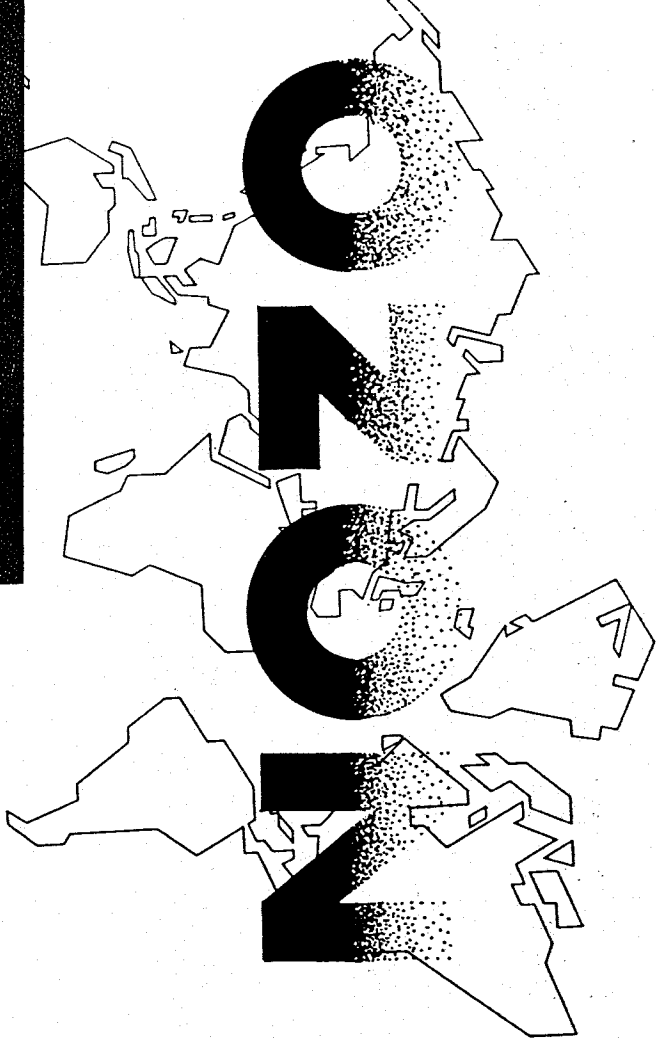
SCHWEIZERISCHER VEREIN VON WÄRME- UND KLIMA-INGENIEUREN
SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS EN CHAUFFAGE ET CLIMATISATION
SOCIETÀ SVIZZERA DEGLI INGEGNERI TERMICI E CLIMATICI



ASSOCIATION DES INGÉNIEURS EN CHAUFFAGE ET VENTILATION
DE FRANCE



ASSOCIAZIONE ITALIANA
CONDIZIONAMENTO DELL'ARIA
RISCALDAMENTO, REFRIGERAZIONE



septembre 1989
auswirkungen

Journée SICCC du 24 novembre 1989

«La couche d'ozone, sa sauvegarde et la santé»



Daniel FAVRAT

né à Lausanne en 1948, originaire d'Epalinges, diplômé en mécanique de l'EPFL, titulaire d'un doctorat en sciences techniques de l'Université de Lausanne, obtient son doctorat en sciences techniques en 1976 avec un travail dans le domaine des compresseurs transsoniques.

De 1976 à 1978 il est employé comme ingénieur de recherche au centre de recherche d'Esso Canada à Calgary.

De retour en Suisse, il occupe successivement les positions d'ingénieur de recherche puis de manager au Centre Européen de recherche Atlas Copco à Ecublens. Il collabore à de nombreux projets de recherche dans le domaine des compresseurs volumétriques et des pompes à chaleur, appliquées aux réseaux de chauffage urbain notamment.

Il est nommé professeur extraordinaire à l'EPFL en septembre 1988 où il occupe le poste de directeur du Laboratoire d'énergie industrielle.

THERMOPOMPES ET FRIGOPOMPES: FILIERES TECHNOLOGIQUES ET PERSPECTIVES

Introduction

La découverte et l'utilisation du feu ont joué un rôle considérable dans l'évolution du genre humain en lui assurant une meilleure protection face aux éléments naturels et en permettant le façonnage d'une nouvelle génération d'outils. La maîtrise du domaine des températures sous-atmosphériques a été beaucoup plus tardive et limitée pendant plusieurs millénaires à un stockage saisonnier de glace naturelle. La production artificielle de froid amorcée avec la machine frigorifique à compression de Perkins ne date guère que du siècle passé et a néanmoins permis une évolution considérable dans des secteurs aussi divers que l'alimentation, la médecine, le confort et la séparation des gaz par exemple. Le principe technologique de "pompage" de la chaleur est remarquable car il n'est pas limité au domaine sous-atmosphérique mais peut être étendu à toute la gamme des températures en permettant de revaloriser une part importante de l'énergie thermique.

A l'heure où nous sommes contraints de prendre conscience des limites de notre planète, tant en ce qui concerne ses ressources naturelles que dans sa capacité d'absorption de nos rejets (couche d'ozone, effet de serre), il me paraît judicieux de rappeler que les pompes à chaleur représentent la seule voie technologique qui nous permette de récupérer, à des fins de chauffage, plus d'énergie que nous n'en consommons sous forme primaire.

Parmi les filières technologiques possibles, les pompes à chaleur à compression jouant sur le changement de phase liquide-vapeur d'un fluide de travail, tout comme la pompe à chaleur originale de Perkins, se sont progressivement imposées. Cette évolution s'est encore accentuée à l'apparition de toute une famille de réfrigérants très commodes, les chlorofluorocarbones (CFC). Ces CFC ont été considérés comme des réfrigérants "idéaux" pendant plus d'un demi-siècle et ont très largement contribué à l'essor de l'industrie du froid artificiel avec ses dizaines de millions d'installations produites chaque année. Les mesures récentes semblent confirmer qu'une grande partie de ces réfrigérants, dont les plus courants, sont aujourd'hui responsables d'atteintes graves à la couche d'ozone et contribuent de façon non négligeable à l'hypothétique effet de serre. Le problème est aggravé par les constantes de temps très longues liées à l'extrême stabilité chimique de certains de ces composants et à leur caractère artificiel que l'on ne retrouve pas dans les planètes environnantes parfois utilisées pour caler nos modèles de simulation de l'effet de serre (réf. 1).

Certes, il convient de relever que les CFC utilisés par les pompes à chaleur ne représentent qu'une faible proportion de la consommation annuelle totale de CFC et, qui plus est, dans des systèmes relativement contrôlables parce qu'hermétiquement fermés. Cependant l'enjeu est tel qu'il convient d'étendre rapidement les mesures de récupération pour les dispositifs en exploitation et d'adapter au plus vite les nouveaux équipements. Un tel objectif est réalisable mais avant de nous pencher sur la

modification des systèmes à compression traditionnels, je vous propose de prendre un peu de recul et de faire un tour d'horizon prospectif en analysant, à la lumière des développements les plus récents, les principales filières technologiques identifiées ce jour pour "pomper" de la chaleur. Sans prétendre être exhaustif nous mentionnerons les pompes à chaleur à compression de type Brayton ou Stirling, pompes à chaleur magnétiques et les pompes à chaleur chimiques à absorption de hydrures métalliques.

Cycles à compression

Les principaux concepts de pompes à chaleur consistent à soumettre une matière travail (généralement un fluide dit réfrigérant) à un cycle de transformation successives tout en transférant de la chaleur avec au moins deux sources extérieures d'énergie thermique à des niveaux de température différents. La première figure illustre schématiquement, dans un diagramme température-entropie, quelques-uns des cycles idéaux parmi les plus connus. Dans le cas de pompes à chaleur à gaz à vapeur, chaque cycle est représenté entre deux niveaux de pression arbitrairement fixés. (A titre de rappel et de façon simplifiée, l'entropie est une fonction d'état thermodynamique du réfrigérant qui est proportionnelle à l'énergie thermique reçue par le réfrigérant de l'extérieur ou proportionnelle aux pertes en cours de compression adiabate).

L'efficacité (coefficient de performance-COP) des pompes à chaleur correspond au rapport entre la prestation fournie (énergie chaleur en mode de chauffage ou énergie de refroidissement en mode de réfrigération) et l'énergie à haute valeur reçue par le système (électricité, gaz, etc.). L'efficacité est d'autant meilleure que l'intervalle de température entre les sources est faible. L'efficacité des cycles réels est également fortement influencée par le rendement des machines (compresseur ou turbine s'il y a lieu) et par les pincements des échangeurs, c'est-à-dire l'écart minimal de température requis dans les échangeurs de chaleur pour les transferts de chaleur thermique. En règle générale, le cycle sera d'autant plus efficace que sa surface de transfert de chaleur sera grande et étalée selon l'échelle entropique et que les coefficients de transferts de chaleur seront élevés.

Le cycle théorique de référence le plus connu est le cycle de Carnot (2 isothermes et 2 isentropes) et il permet de déterminer aisément l'efficacité maximale de systèmes de frigopompes (Tréf. / ΔT) ou de systèmes de thermopompes (Tchauf. / ΔT)

La figure 1a permet immédiatement de constater que le cycle de Carnot, comparé à d'autres cycles, ne présente pas d'intérêt pour un gaz sans changement de phase. En effet, l'utilisation d'un fluide présentant un changement de phase dans les gammes de pression et de température voulues, comme l'eau à moyenne température ou le CFC et l'ammoniac à basse température, permet d'approcher un cycle de Carnot surface raisonnable. Les performances de ce type de cycle, modifiées en pratique une fois que l'on passe à des cycles réels, sont d'autant meilleures que les coefficients de transfert de chaleur sont nettement plus favorables en présence de changements

phase qu'en phase gazeuse uniquement. Ces raisons expliquent pour une grande part la large prédominance de tels systèmes aujourd'hui. Ces cycles sont particulièrement bien adaptés aux applications traditionnelles de réfrigération où les températures des sources froides (chambre frigorifique) et chaudes (atmosphère) sont relativement constantes.

Toutefois si les sources à refroidir ou à réchauffer présentent un gradient de température important comme dans le cas de chauffage d'eau sanitaire par exemple, il est souhaitable de limiter le pincement moyen dans les échangeurs en utilisant un mélange de fluides présentant, en cours de changement de phase, un gradient de température du même ordre. Les mélanges non azéotropes de différents réfrigérants permettent d'approcher de tels cycles dits de Lorenz (fig1b) qui conduisent théoriquement à de meilleures efficacités qu'un cycle simple approchant Carnot dans les mêmes conditions. Les cycles de Lorenz offrent également l'avantage de permettre l'introduction d'échanges de chaleur internes. La confirmation expérimentale de l'augmentation d'efficacité de ce type de cycle, essentiellement réalisée à l'aide de mélanges de CFC, n'est encore que très partiellement établie. De fait les cycles de Lorenz ne sont qu'une prolongation intéressante des techniques à compression traditionnelle mais la problématique du choix de réfrigérants en relation avec les atteintes de la couche d'ozone reste du même ordre que pour les cycles à réfrigérant simple.

Restent donc, parmi les cycles à compression, des cycles à gaz de type Brayton ou Stirling, utilisant comme fluide de travail de l'air ou un gaz léger. Ces cycles permettent un transfert de chaleur interne (régénération ou récupération) avec, pour le dernier d'entre eux, un potentiel d'efficacité semblable au cycle de Carnot. Cependant en raison de la faible capacité thermique et des caractéristiques défavorables de transfert de chaleur des gaz, ces cycles sont, en règle générale, mieux adaptés à des pompes à chaleur à larges différences de température de sources pour lesquelles l'importance relative du pincement des échangeurs est moindre.

En pratique, les cycles de Brayton ont une efficacité relativement faible et ne sont encore communément appliqués que pour des usages particuliers comme en cryogénie ou pour la climatisation des avions par exemple. Dans de tels cas, l'emploi de petites turbomachines tournant à haute vitesse sur des paliers à air leur confère des avantages d'encombrement et de poids très concurrentiels. Le handicap de surconsommation d'énergie (de l'ordre au moins d'un facteur 2) est cependant tel que leur application à grande échelle en substitution des cycles à CFC s'avère peu souhaitable.

La question est différente pour les cycles Stirling qui ont une efficacité théorique supérieure et qui pourraient être, avec les pompes à chaleur magnétiques, les plus grands bénéficiaires de l'évolution technologique dans le domaine des matériaux notamment. La réalisation de pistons en céramique à faible inertie et haute stabilité dimensionnelle, l'amélioration des éléments d'étanchéité en polymère ainsi que la conception de régénérateur à haute performance devraient favoriser leur développement. Plusieurs concepts à piston libre très compacts destinés à

fonctionner en pompe à chaleur à entraînement thermique sont notamment à l'ordre du jour dans notre laboratoire. Une efficacité de cycle de pompe à chaleur d'ordre de 46 % de l'efficacité équivalente de Carnot a été obtenue avec un prototype de laboratoire travaillant entre -3 et 47°C (réf.2), confirmant ainsi le potentiel de cette filière technologique.

LABORATOIRE D'ÉNERGIE

INDUSTRIELLE

Ecole Polytechnique F

LENI-ME (Ecole)

Pompes à chaleur magnétiques

L'exploitation de l'effet magnéto-calorique de substances ^{Changements de phase} nouveaux mais a été essentiellement appliqué au domaine des températures avoisinant le zéro absolu. La découverte de nouvelles céramiques supraconductrices à températures critiques plus élevées avec le potentiel de développement de nouveaux électro-aimants à supraconducteurs ouvre de nouvelles perspectives de cette filière.

Le principe des pompes à chaleur magnétiques consiste à soumettre, cycliquement un champ magnétique élevé un matériau ferromagnétique à température proche point de transition appelé point de Curie. En cours de magnétisation, les magnétisations s'orientent avec les lignes du champ externe en provoquant un réchauffement du matériau, et en cours de démagnétisation, les magnétisations perdent leur orientation provoquant un refroidissement du matériau de travail. Si le matériau communiquant cette énergie thermique à une source externe avant la phase démagnétisation on obtient un refroidissement dit de désaimantation adiabatique peut être utilisé à des fins de réfrigération. Un cycle de pompe à chaleur peut être réalisé en déplaçant, par exemple, un matériau magnétique en forme de dans l'entrefer d'un électroaimant (fig.2). Le transfert de chaleur avec les sources externes peut alors être réalisé à l'aide d'un liquide circulant en sens inverse dans canaux internes à la dite roue.

On peut établir une analogie directe entre les cycles à gaz et les cycles magnétiques en assimilant compression à magnétisation dans le diagramme de la figure 1 lignes isobares sont alors remplacées par des lignes à champ magnétique constant variant typiquement entre 0 et 5 à 8 Tesla. Le cycle de Carnot correspond toujours des transformations isothermes et isentropes mais se présente comme pour les non condensables avec une surface petite et un intervalle de température sans grand intérêt. Dans le même ordre d'idée, le cycle de Brayton correspond à transformations à champ constant et deux isentropes et le cycle de Stirling à transformations à magnétisation constante et deux isothermes. Il existe au moins un prototype de chacun de ces cycles (réf.3 à 5) fonctionnant tous avec transfert de chaleur interne (récupération ou régénération) de façon à accroître l'élévation température utile. Le matériau utilisé est le gadolinium qui a son point de Curie à 293K et possède autour de ce point une résistivité électrique élevée permettant limiter les pertes par courant de Foucault.

Hormis la question préoccupante de la mise en place et de la maîtrise de champs magnétiques aussi importants, la densité de puissance attendue est faible puisqu'une puissance de l'ordre du KW devrait pouvoir être obtenue à l'aide de

roue en gadolinium de 10cm de diamètre (réf.3) tournant à quelques tours par minute. De même les perspectives d'efficacité sont pour l'heure à l'optimisme avec des valeurs citées de l'ordre de 50 % de l'efficacité de Carnot.

Cette filière technologique est en principe adaptable aux principaux domaines de réfrigération et de chauffage car des matériaux ayant des points de Curie entre 24 et 336 K ont été identifiés. Elle est cependant trop embryonnaire pour pouvoir évaluer correctement ses perspectives. Sous réserve de nouveaux pas importants du côté des matériaux notamment, la simple exigence d'électro-aimants supraconducteurs ne permet guère d'imaginer cette filière opérationnelle dans nos segments d'application avant le siècle prochain.

Pompes à chaleur chimiques

L'idée maîtresse consiste à mettre à profit l'énergie thermique de réaction chimique lors de mélange ou de séparation de couples de fluides. Les équipements les plus connus de cette filière sont les pompes à chaleur à absorption qui occupent une position dominante de la production de froid au cours de la deuxième moitié du siècle passé et qui ne représentent plus à l'heure actuelle qu'une faible part du marché. Le schéma du cycle peut être représenté dans le diagramme température-entropie de la figure 3. Au lieu de comprimer la vapeur à l'aide d'un compresseur, celle-ci est absorbée par un solvant et la pression significative du mélange liquide résultant peut être élevée par une pompe ou simplement par effet géodésique, ou encore par changement de concentration vis-à-vis d'un troisième composant. En chauffant alors le mélange à cette nouvelle pression par une source de chaleur externe, dans un bouilleur, il est possible de reséparer la vapeur de réfrigérant pour en récupérer la chaleur latente de condensation. Ce type de pompe à chaleur thermique comporte au minimum deux niveaux de pression et trois niveaux de température et peut être schématiquement représenté par deux cycles de Carnot superposés et liés (fig.3).

Il s'agit de pompes à chaleur idéales pour toutes les applications où la principale énergie externe fournie est de l'énergie thermique à moyenne température provenant de rejets industriels, d'unités de cogénération ou de capteurs solaires. Pour ces cas particuliers, l'efficacité peut être similaire ou supérieure à celle d'une pompe à chaleur à compression entraînée par moteur thermique.

En revanche l'efficacité de réfrigération, en particulier, devient substantiellement plus faible si l'énergie thermique fournie au bouilleur est intégralement sous forme électrique ou est le résultat direct d'une combustion. Ceci est dû aux pertes thermodynamiques entre la température de la flamme et la température du bouilleur qui sont alors considérables. Or pour des raisons, entre autres, de stabilité chimique des fluides existants, les températures de bouilleur ne peuvent à l'heure actuelle guère dépasser les 220 C et sont généralement situées entre 100 et 150 C. Pour des applications de réfrigération électrique stationnaire (réfrigérateur, congélateur, etc), il n'est donc pas énergétiquement raisonnable de compter substituer ce type de

pompes à chaleur aux pompes à chaleur à compression (surconsommation d'ordre de 2 à 4).

Il en va différemment des applications de chauffage communément couvertes de chaudères à combustibles fossiles où les pompes à chaleur à absorption nouvelles générations pourraient permettre des économies d'énergie supérieure 50% par rapport aux nouvelles chaudères à condensation. Dans ce domaine compte tenu de leur fonctionnement plus silencieux, les thermopompes à absorption pourraient être techniquement à même de concurrencer les thermopompes entraînées par moteur thermique et de jouer ainsi un certain rôle de substitution des CFC. Il en va de même au niveau mondial pour les applications de réfrigération et de chauffage actives par énergie solaire.

Pour les applications industrielles et commerciales, en Suisse notamment, une gestion énergétique devrait nous conduire à une plus grande intégration des dispositifs permettant de satisfaire les différents besoins (chauffage, réfrigération, climatisation, production d'électricité, etc.). La conception de telles installations autonomes pour une large part, devrait également accorder une place négligeable aux pompes à chaleur à absorption. Ces dernières permettent une utilisation efficace des rejets thermiques à moyenne température comme l'énergie gaz d'échappement ou des dispositifs de refroidissement des équipements mécaniques et électriques. Un excellent exemple de dispositif à applications intégrées est le récent développement au Japon d'unités de climatisation à absorption-production d'eau chaude intégrée (réf.6). D'autres concepts récents, dits hybrides, absorption-compression, consistent à effectuer une recompression mécanique de la vapeur du générateur et permettent de favoriser l'utilisation de l'eau comme réfrigérant (réf.7). Ces concepts souffrent cependant de leur inhérente complexité de l'absence de compresseurs adéquats sur le marché. Au niveau industriel, le concept pourrait également s'avérer intéressant pour élever la température des pompes à chaleur à absorption, dites de classe 2 ou transformateurs d'énergie, qui permettent de revaloriser environ 30 à 40 % du débit d'un effluent thermique moyenne température en rejetant le solide à une source froide.

Les principaux couples de réfrigérants utilisés actuellement sont l'eau-bromure de lithium à pression généralement sous-atmosphérique ou l'ammoniac-essence de soufre. Même s'il ne s'agit pas d'une grande proportion, il convient cependant de relever que certains CFC sont parfois envisagés comme réfrigérants de pompe à chaleur à absorption (réf.8), en raison notamment de leur très faible toxicité.

Il existe encore plusieurs autres filières chimiques à l'étude, basées soit sur des cycles successifs de réactions chimiques endo- et exothermiques, soit sur des phénomènes de sorption et désorption. Ces techniques sont souvent développées en conjonction avec des concepts de stockage. Nous pouvons citer les pompes à chaleur à ab- ou adsorbants solides tels que les zéolites (réf.9) ou les pompes à chaleur à hydrures métalliques basées sur l'absorption et la désorption de l'hydrogène dans des réseaux cristallins (réf.10). La difficulté première de ce type de systèmes est d'assurer un transfert de chaleur efficace entre gaz et solide, ce qui est

généralement à des fréquences de cycle faibles et un encombrement important. Ce type de filière ne devrait pas pouvoir dans l'immédiat jouer un rôle substantiel de substitution des CFC.

Pompes à chaleur à compression de vapeur

A l'image des moteurs à combustion en technique automobile, les pompes à chaleur conventionnelles à compression de vapeur de réfrigérants dont les CFC, ont atteint un niveau de maturité technologique élevé avec une infrastructure de distribution et de maintenance importante au niveau mondial. Leur niveau d'efficacité énergétique est supérieur à celui des autres filières technologiques actuelles pour la majorité des installations, qui sont à entraînement électrique et de petites puissances. L'urgence remise en question des CFC complètement halogénés doit-elle remettre en cause cette prédominance?

La figure 4 résume les performances maximales théoriquement réalisables avec un cycle standard (c.s.) et différents réfrigérants, en supposant un rendement de compression de 70%. Le critère de comparaison adopté est le rapport entre l'efficacité du cycle et l'efficacité d'un cycle idéal de Carnot et ce, pour un cas de thermopompe et un cas de frigopompe. A noter sur ce diagramme l'efficacité nettement inférieure d'un cycle alternatif à air (R728). Nous pouvons ainsi constater entre les CFC des écarts qui, traduits en consommation énergétique annuelle, peuvent jouer un rôle non négligeable. Dans la pratique, il convient cependant de relativiser ces différences comme le montre la figure 5 qui regroupe les performances d'une dizaine de pompes à chaleur du marché suisse mesurées sur le même stand d'essai à l'IEPFL à différents points de fonctionnement. Ce diagramme, avec une telle dispersion de points, met en évidence l'importance de la conception des équipements qui, dans une certaine mesure, relativise l'importance des réfrigérants d'une même famille. Un certain nombre d'autres facteurs de comparaison des réfrigérants comme la puissance spécifique par unité de volume aspiré au compresseur ou le rapport des chaleurs spécifiques sont résumés dans un tableau comparatif.

Il existe par ailleurs encore plusieurs possibilités d'améliorations comme le passage à des cycles bi-étages, qui peuvent être mis en oeuvre pour compenser énergétiquement le comportement thermodynamiquement moins performant d'un réfrigérant de substitution comme le 134a. Des gains de performance compensatoires peuvent également être attendus de la mise en service de tubes échangeurs à surface améliorée permettant un accroissement substantiel du transfert de chaleur en présence de changement de phase (réf.11).

La question est différente pour l'ammoniac (R717) qui sort toujours très favorablement d'une analyse thermodynamique et même constructive et économique (réf.12). S'il occupe toujours une part prépondérante du marché de la réfrigération industrielle, l'ammoniac est fortement attaqué pour sa toxicité et son explosivité, cette dernière étant d'ailleurs très hypothétique en pratique compte tenu du seuil de concentration

très élevé requis. Contrairement aux principaux CFC, l'ammoniac est plus léger, plus facile à détecter à des concentrations extrêmement faibles, qualités qui permettent une utilisation plus étendue et en faire un candidat sérieux à la substitution des CFC. Il est vrai que l'ammoniac présente encore deux autres inconvénients sérieux: son incompatibilité avec les matériaux cuivreux et un échauffement important en cours de compression. Ces inconvénients devraient pouvoir être corrigés par des techniques modernes des moteurs électriques étanches et le passage à des cycles bi-étages. Le mélange ammoniac-eau est également très prometteur dans le cas des pompes à chaleur à compression pour approcher notamment les cycles de Lorrain. Limiter les niveaux et les rapports de pression (réf.13). Ce mélange, ainsi qu'il est tout simplement, ont d'excellentes caractéristiques pour se substituer au R717 et 114 et couvrir efficacement le domaine des pompes à chaleur industrielles à température moyenne, certes encore peu répandues (réf.14).

La substitution des CFC complètement halogénés dans la majeure partie des nouveaux équipements est donc possible et peut être rapide en ce qui concerne la transition au R22, même si elle doit être provisoire.

Malheureusement, force est de reconnaître que les avertissements de Molinard (réf.15) concernant l'impact des CFC sur la couche d'ozone il y a 15 ans n'ont eu, de manière générale et jusqu'à maintenant, que peu d'effets tangibles. C'est également vrai pour les pompes à chaleur. J'en veux pour preuve le diagramme de la figure 6 qui montre l'évolution du choix des réfrigérants pour les nouvelles thermopompes importantes installées en Europe. Ironie du sort, dès 1974, date de la parution de l'article de Molinard et Rowland, la part des réfrigérants peu ou moyennement nocifs à l'ozone (R22, ammoniac) a constamment régressé pour atteindre de 30% en 1984, et tout porte à croire que cette tendance s'est poursuivie dans les années suivantes.

Plus positifs ont été les efforts visant à réduire l'inventaire par l'introduction de mélanges de réfrigérants diminuant la part du R12 ou encore l'introduction d'un stockage journalier de froid sous forme de glace contribuant à diminuer la puissance nominale des installations de climatisation. Ou encore tout récemment la mise en place au niveau communal de procédures de récupération des équipements contenant du CFC.

Conclusions

Même si nous avons tout un inventaire de filières technologiques en matière de pompes à chaleur, les filières classiques à absorption ou à compression de vapeur continueront à jouer un rôle prépondérant en cette fin de 20ème siècle. Le problème urgent de la substitution des réfrigérants CFC ne devrait pas remettre en cause la prédominance des pompes à chaleur à compression de vapeur qui, par leur performance énergétique sont les mieux à même de répondre à nos besoins de production de froid et d'économie d'énergie de chauffage.

De grands espoirs sont placés dans l'industrie chimique pour obtenir des réfrigérants aussi proches que possible des CFC et ne nécessitant pas de modifications substantielles des équipements. Cependant il serait néanmoins sage de développer rapidement, et en parallèle, d'autres alternatives comme des unités hermétiques à l'ammoniac pour augmenter nos chances de succès dans cette bataille pour l'ozone. De telles voies ne seront cependant industriellement poursuivies que s'il existe une volonté claire de maîtriser toutes les autres sources de dissémination des CFC dont certaines sont beaucoup plus importantes que le domaine des thermopompes ou des frigopompes aujourd'hui.

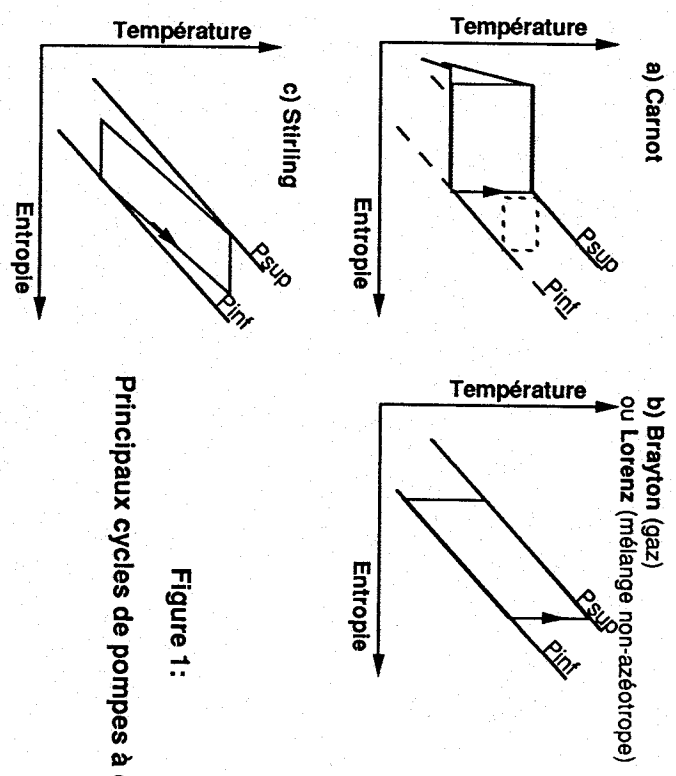


Figure 1:
Principaux cycles de pompes à chaleur

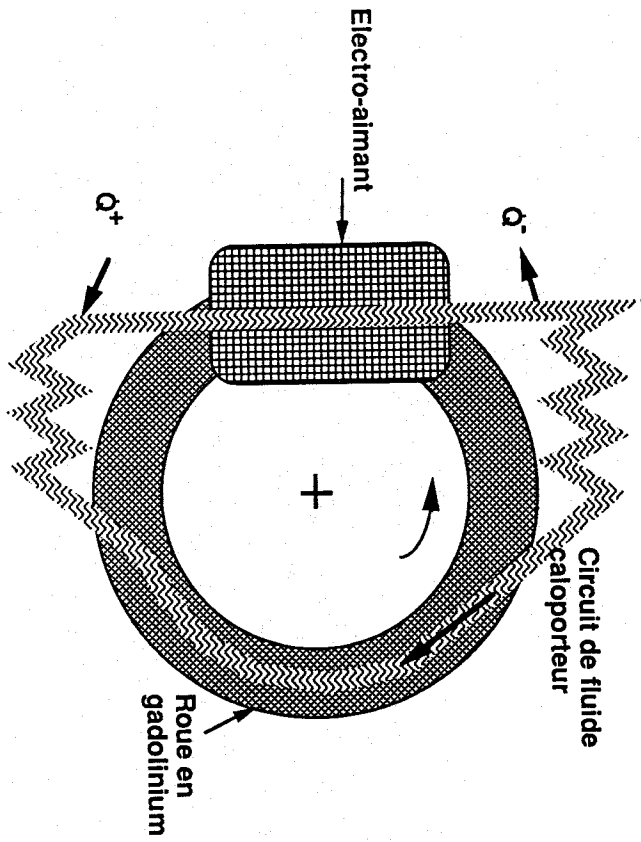


Figure 2: Schéma d'une pompe à chaleur magnétique

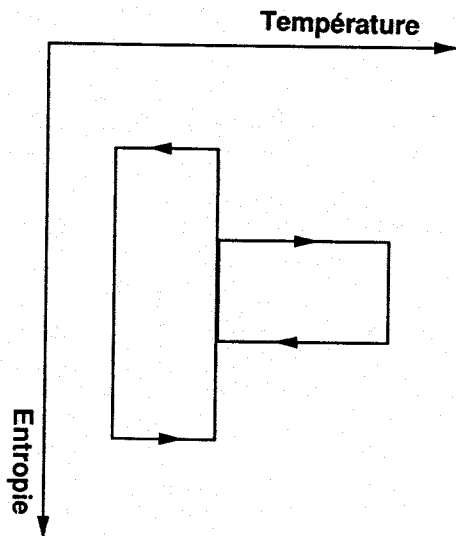
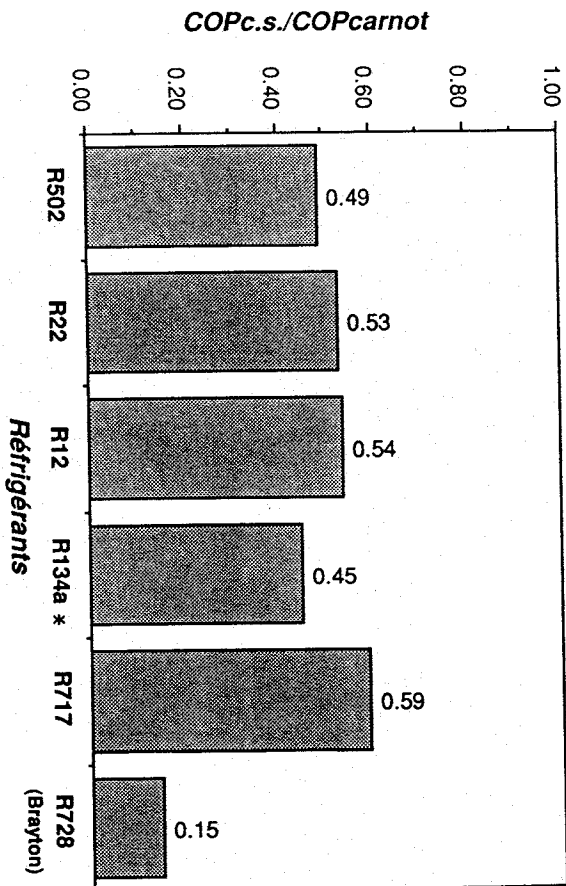


Figure 3:

Représentation schématique d'un cycle de pompe à chaleur à absc

a) COPc.s./COPcarnot de frigopompe

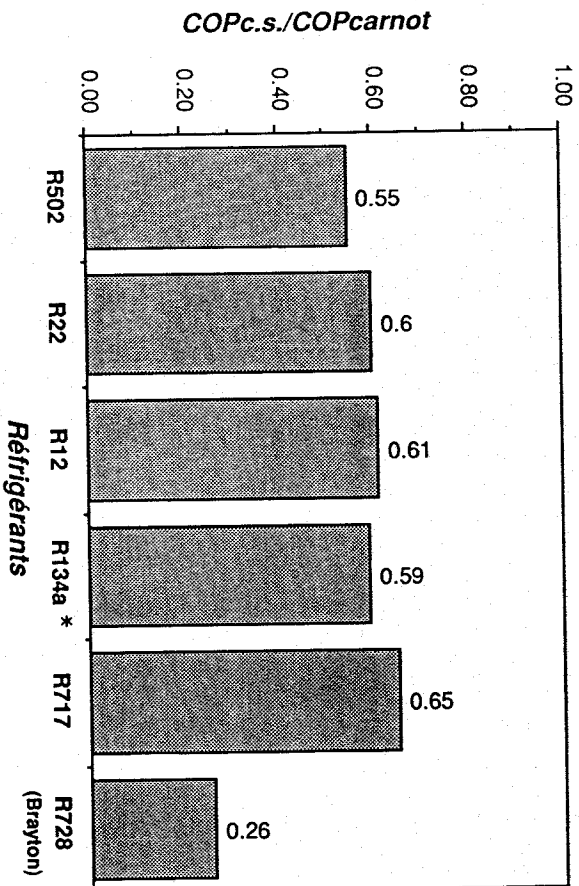
-30°C / 30°C



* d'après réf.17

b) COPc.s./COPcarnot de thermopompe

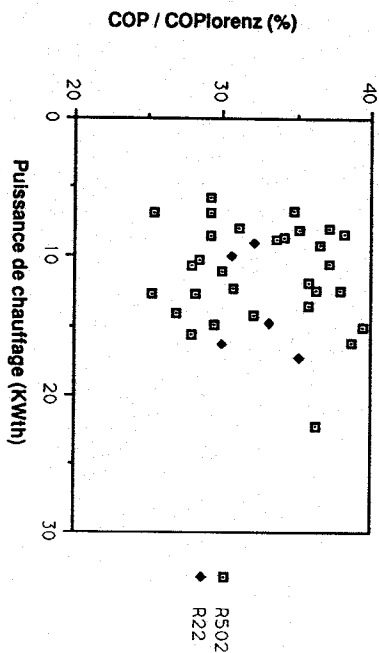
0°C / 50°C



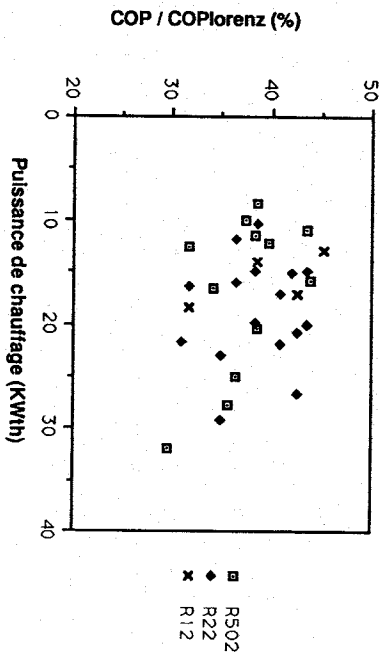
* d'après réf.18

Figure 4 : Performances théoriques de pompes à chaleur (Cycle de Rankine standard, rendement de compression de 0.7)

a) Essais EPFL PAC Air-Eau



b) Essais EPFL Pac Eau-Eau



$$COP_{\text{biens}} = \frac{T_{\text{sortie cond.}}}{(T_{\text{sortie cond.}} - T_{\text{entrée évap.}})}$$

Figure 5:

Performances comparatives de pompes à chaleur sur le marché s (réf.16)

Références

1. Idso S.B.
The CO2 greenhouse effect on mars, earth, and Venus
The Science of the total Environment, 77
(1988)291-294
2. Beale W. et al.
Duplex Stirling heat pump development
1983 Int. Gas Research Conf. London.
Magnetic heat pumps for near-room-temperature applications
Energy vol. 14, No 4, 1989, p177-185
3. Hull J.R. et Uherka K.L.
Rotary recuperative magnetic heat pump
Advanced Cryogen. Eng. 33, 1988, 757-765
Magnetic heat pumping near room temperature
Journ. of Applied Physics, vol 47, No 8, 1976
Current and future perspectives of absorption heat pumps in commercial applications in Japan
JAR Intern. Symposium March 9-10, 1988 Tokyo
Advanced heat pump and air-conditioning cycles for the working pair H2O/LiBr
ASHRAE Annual Meeting, Honolulu, 1985
Development of a residential gas absorption heat pump
18th Intersociety Energy Conv. Eng. Conf., 1983
Heat pumps in Japan: Products and technological trends
Heat pump Technology Center of Japan, dec. 1988
Conception de machines thermodynamiques utilisant les hydrures métalliques
Rev. gén. de thermique No 257, mai 1983
Theoretical model for the heat transfer on an enhanced condenser tube
Proc. TEC88-Conference on recent advances in heat exchangers, Grenoble, 1988
Ammonia: an excellent alternative
IIF Commissions B1, B2, E1, E2, Purdue 1988-2
4. Kiroi L.D. et Dacus M.W.
Rotary recuperative magnetic heat pump
Advanced Cryogen. Eng. 33, 1988, 757-765
Magnetic heat pumping near room temperature
Journ. of Applied Physics, vol 47, No 8, 1976
Current and future perspectives of absorption heat pumps in commercial applications in Japan
JAR Intern. Symposium March 9-10, 1988 Tokyo
Advanced heat pump and air-conditioning cycles for the working pair H2O/LiBr
ASHRAE Annual Meeting, Honolulu, 1985
Development of a residential gas absorption heat pump
18th Intersociety Energy Conv. Eng. Conf., 1983
Heat pumps in Japan: Products and technological trends
Heat pump Technology Center of Japan, dec. 1988
Conception de machines thermodynamiques utilisant les hydrures métalliques
Rev. gén. de thermique No 257, mai 1983
Theoretical model for the heat transfer on an enhanced condenser tube
Proc. TEC88-Conference on recent advances in heat exchangers, Grenoble, 1988
Ammonia: an excellent alternative
IIF Commissions B1, B2, E1, E2, Purdue 1988-2
5. Brown G.V.
Magnetic heat pumping near room temperature
Journ. of Applied Physics, vol 47, No 8, 1976
Current and future perspectives of absorption heat pumps in commercial applications in Japan
JAR Intern. Symposium March 9-10, 1988 Tokyo
Advanced heat pump and air-conditioning cycles for the working pair H2O/LiBr
ASHRAE Annual Meeting, Honolulu, 1985
Development of a residential gas absorption heat pump
18th Intersociety Energy Conv. Eng. Conf., 1983
Heat pumps in Japan: Products and technological trends
Heat pump Technology Center of Japan, dec. 1988
Conception de machines thermodynamiques utilisant les hydrures métalliques
Rev. gén. de thermique No 257, mai 1983
Theoretical model for the heat transfer on an enhanced condenser tube
Proc. TEC88-Conference on recent advances in heat exchangers, Grenoble, 1988
Ammonia: an excellent alternative
IIF Commissions B1, B2, E1, E2, Purdue 1988-2
6. Kurosawa S.
Magnetic heat pumping near room temperature
Journ. of Applied Physics, vol 47, No 8, 1976
Current and future perspectives of absorption heat pumps in commercial applications in Japan
JAR Intern. Symposium March 9-10, 1988 Tokyo
Advanced heat pump and air-conditioning cycles for the working pair H2O/LiBr
ASHRAE Annual Meeting, Honolulu, 1985
Development of a residential gas absorption heat pump
18th Intersociety Energy Conv. Eng. Conf., 1983
Heat pumps in Japan: Products and technological trends
Heat pump Technology Center of Japan, dec. 1988
Conception de machines thermodynamiques utilisant les hydrures métalliques
Rev. gén. de thermique No 257, mai 1983
Theoretical model for the heat transfer on an enhanced condenser tube
Proc. TEC88-Conference on recent advances in heat exchangers, Grenoble, 1988
Ammonia: an excellent alternative
IIF Commissions B1, B2, E1, E2, Purdue 1988-2
7. Alerfeld G. et Ziegler F.
Magnetic heat pumping near room temperature
Journ. of Applied Physics, vol 47, No 8, 1976
Current and future perspectives of absorption heat pumps in commercial applications in Japan
JAR Intern. Symposium March 9-10, 1988 Tokyo
Advanced heat pump and air-conditioning cycles for the working pair H2O/LiBr
ASHRAE Annual Meeting, Honolulu, 1985
Development of a residential gas absorption heat pump
18th Intersociety Energy Conv. Eng. Conf., 1983
Heat pumps in Japan: Products and technological trends
Heat pump Technology Center of Japan, dec. 1988
Conception de machines thermodynamiques utilisant les hydrures métalliques
Rev. gén. de thermique No 257, mai 1983
Theoretical model for the heat transfer on an enhanced condenser tube
Proc. TEC88-Conference on recent advances in heat exchangers, Grenoble, 1988
Ammonia: an excellent alternative
IIF Commissions B1, B2, E1, E2, Purdue 1988-2
8. Murphy K.P.
Magnetic heat pumping near room temperature
Journ. of Applied Physics, vol 47, No 8, 1976
Current and future perspectives of absorption heat pumps in commercial applications in Japan
JAR Intern. Symposium March 9-10, 1988 Tokyo
Advanced heat pump and air-conditioning cycles for the working pair H2O/LiBr
ASHRAE Annual Meeting, Honolulu, 1985
Development of a residential gas absorption heat pump
18th Intersociety Energy Conv. Eng. Conf., 1983
Heat pumps in Japan: Products and technological trends
Heat pump Technology Center of Japan, dec. 1988
Conception de machines thermodynamiques utilisant les hydrures métalliques
Rev. gén. de thermique No 257, mai 1983
Theoretical model for the heat transfer on an enhanced condenser tube
Proc. TEC88-Conference on recent advances in heat exchangers, Grenoble, 1988
Ammonia: an excellent alternative
IIF Commissions B1, B2, E1, E2, Purdue 1988-2
9. Shiraiishi et al.
Magnetic heat pumping near room temperature
Journ. of Applied Physics, vol 47, No 8, 1976
Current and future perspectives of absorption heat pumps in commercial applications in Japan
JAR Intern. Symposium March 9-10, 1988 Tokyo
Advanced heat pump and air-conditioning cycles for the working pair H2O/LiBr
ASHRAE Annual Meeting, Honolulu, 1985
Development of a residential gas absorption heat pump
18th Intersociety Energy Conv. Eng. Conf., 1983
Heat pumps in Japan: Products and technological trends
Heat pump Technology Center of Japan, dec. 1988
Conception de machines thermodynamiques utilisant les hydrures métalliques
Rev. gén. de thermique No 257, mai 1983
Theoretical model for the heat transfer on an enhanced condenser tube
Proc. TEC88-Conference on recent advances in heat exchangers, Grenoble, 1988
Ammonia: an excellent alternative
IIF Commissions B1, B2, E1, E2, Purdue 1988-2
10. Blondeau et al.
Magnetic heat pumping near room temperature
Journ. of Applied Physics, vol 47, No 8, 1976
Current and future perspectives of absorption heat pumps in commercial applications in Japan
JAR Intern. Symposium March 9-10, 1988 Tokyo
Advanced heat pump and air-conditioning cycles for the working pair H2O/LiBr
ASHRAE Annual Meeting, Honolulu, 1985
Development of a residential gas absorption heat pump
18th Intersociety Energy Conv. Eng. Conf., 1983
Heat pumps in Japan: Products and technological trends
Heat pump Technology Center of Japan, dec. 1988
Conception de machines thermodynamiques utilisant les hydrures métalliques
Rev. gén. de thermique No 257, mai 1983
Theoretical model for the heat transfer on an enhanced condenser tube
Proc. TEC88-Conference on recent advances in heat exchangers, Grenoble, 1988
Ammonia: an excellent alternative
IIF Commissions B1, B2, E1, E2, Purdue 1988-2
11. Lin CC et Berghmans J.
Magnetic heat pumping near room temperature
Journ. of Applied Physics, vol 47, No 8, 1976
Current and future perspectives of absorption heat pumps in commercial applications in Japan
JAR Intern. Symposium March 9-10, 1988 Tokyo
Advanced heat pump and air-conditioning cycles for the working pair H2O/LiBr
ASHRAE Annual Meeting, Honolulu, 1985
Development of a residential gas absorption heat pump
18th Intersociety Energy Conv. Eng. Conf., 1983
Heat pumps in Japan: Products and technological trends
Heat pump Technology Center of Japan, dec. 1988
Conception de machines thermodynamiques utilisant les hydrures métalliques
Rev. gén. de thermique No 257, mai 1983
Theoretical model for the heat transfer on an enhanced condenser tube
Proc. TEC88-Conference on recent advances in heat exchangers, Grenoble, 1988
Ammonia: an excellent alternative
IIF Commissions B1, B2, E1, E2, Purdue 1988-2
12. Lorenzen G.
Magnetic heat pumping near room temperature
Journ. of Applied Physics, vol 47, No 8, 1976
Current and future perspectives of absorption heat pumps in commercial applications in Japan
JAR Intern. Symposium March 9-10, 1988 Tokyo
Advanced heat pump and air-conditioning cycles for the working pair H2O/LiBr
ASHRAE Annual Meeting, Honolulu, 1985
Development of a residential gas absorption heat pump
18th Intersociety Energy Conv. Eng. Conf., 1983
Heat pumps in Japan: Products and technological trends
Heat pump Technology Center of Japan, dec. 1988
Conception de machines thermodynamiques utilisant les hydrures métalliques
Rev. gén. de thermique No 257, mai 1983
Theoretical model for the heat transfer on an enhanced condenser tube
Proc. TEC88-Conference on recent advances in heat exchangers, Grenoble, 1988
Ammonia: an excellent alternative
IIF Commissions B1, B2, E1, E2, Purdue 1988-2
13. Bergmann Gy. et Hivessy G.
Magnetic heat pumping near room temperature
Journ. of Applied Physics, vol 47, No 8, 1976
Current and future perspectives of absorption heat pumps in commercial applications in Japan
JAR Intern. Symposium March 9-10, 1988 Tokyo
Advanced heat pump and air-conditioning cycles for the working pair H2O/LiBr
ASHRAE Annual Meeting, Honolulu, 1985
Development of a residential gas absorption heat pump
18th Intersociety Energy Conv. Eng. Conf., 1983
Heat pumps in Japan: Products and technological trends
Heat pump Technology Center of Japan, dec. 1988
Conception de machines thermodynamiques utilisant les hydrures métalliques
Rev. gén. de thermique No 257, mai 1983
Theoretical model for the heat transfer on an enhanced condenser tube
Proc. TEC88-Conference on recent advances in heat exchangers, Grenoble, 1988
Ammonia: an excellent alternative
IIF Commissions B1, B2, E1, E2, Purdue 1988-2
14. Yuan Q.S. et Blaise J.C.
Magnetic heat pumping near room temperature
Journ. of Applied Physics, vol 47, No 8, 1976
Current and future perspectives of absorption heat pumps in commercial applications in Japan
JAR Intern. Symposium March 9-10, 1988 Tokyo
Advanced heat pump and air-conditioning cycles for the working pair H2O/LiBr
ASHRAE Annual Meeting, Honolulu, 1985
Development of a residential gas absorption heat pump
18th Intersociety Energy Conv. Eng. Conf., 1983
Heat pumps in Japan: Products and technological trends
Heat pump Technology Center of Japan, dec. 1988
Conception de machines thermodynamiques utilisant les hydrures métalliques
Rev. gén. de thermique No 257, mai 1983
Theoretical model for the heat transfer on an enhanced condenser tube
Proc. TEC88-Conference on recent advances in heat exchangers, Grenoble, 1988
Ammonia: an excellent alternative
IIF Commissions B1, B2, E1, E2, Purdue 1988-2
15. Molina M.J. and Rowland F.S.
Magnetic heat pumping near room temperature
Journ. of Applied Physics, vol 47, No 8, 1976
Current and future perspectives of absorption heat pumps in commercial applications in Japan
JAR Intern. Symposium March 9-10, 1988 Tokyo
Advanced heat pump and air-conditioning cycles for the working pair H2O/LiBr
ASHRAE Annual Meeting, Honolulu, 1985
Development of a residential gas absorption heat pump
18th Intersociety Energy Conv. Eng. Conf., 1983
Heat pumps in Japan: Products and technological trends
Heat pump Technology Center of Japan, dec. 1988
Conception de machines thermodynamiques utilisant les hydrures métalliques
Rev. gén. de thermique No 257, mai 1983
Theoretical model for the heat transfer on an enhanced condenser tube
Proc. TEC88-Conference on recent advances in heat exchangers, Grenoble, 1988
Ammonia: an excellent alternative
IIF Commissions B1, B2, E1, E2, Purdue 1988-2
16. Matthey P.
chlorine atom catalyzed destruction of ozone Nature vol 249, 1974, pp810-812
Essais comparatifs pompes à chaleur air-eau OFQC Janv. 1987, EDMZ No de command 724.532.1
Essais comparatifs pompes à chaleur eau-OFQC août 1983, EDMZ No de command 724.532
Propriétés thermophysiques des réfrigérants R124a et R134a
XVIIIème Congrès Int. du froid, Vienne, 1988
Thermodynamic properties of a new stratospherically safe working fluid- réfrigérant 134a
ASHRAE Transactions 1988, V.94, Pt 2
17. Arnaud D. et Tanguy J.C.
chlorine atom catalyzed destruction of ozone Nature vol 249, 1974, pp810-812
Essais comparatifs pompes à chaleur air-eau OFQC Janv. 1987, EDMZ No de command 724.532.1
Essais comparatifs pompes à chaleur eau-OFQC août 1983, EDMZ No de command 724.532
Propriétés thermophysiques des réfrigérants R124a et R134a
XVIIIème Congrès Int. du froid, Vienne, 1988
Thermodynamic properties of a new stratospherically safe working fluid- réfrigérant 134a
ASHRAE Transactions 1988, V.94, Pt 2
18. Wilson D.P. et Basu R.S.
chlorine atom catalyzed destruction of ozone Nature vol 249, 1974, pp810-812
Essais comparatifs pompes à chaleur air-eau OFQC Janv. 1987, EDMZ No de command 724.532.1
Essais comparatifs pompes à chaleur eau-OFQC août 1983, EDMZ No de command 724.532
Propriétés thermophysiques des réfrigérants R124a et R134a
XVIIIème Congrès Int. du froid, Vienne, 1988
Thermodynamic properties of a new stratospherically safe working fluid- réfrigérant 134a
ASHRAE Transactions 1988, V.94, Pt 2