

Cherslecteurs.

Je quitte l'HF après avoir été pendant 5 ans Directeur de l'HF mais aussi Directeur de la Publication du Bulletin. J'espère que vous apprécierez la richesse de cette revue : un article de synthèse, des informations inégalées sur les conférences de l'HF, sur celles patronnées par l'HF et sur des événements organisés par d'autres organismes, et surtout, des centaines de références qui viennent s'ajouter à notre base de données Fridoc. Vous savez sans doute que la mission de l'HF est de promouvoir les technologies frigorifiques efficaces et respectueuses de l'environnement, et de diffuser les connaissances. Le Bulletin s'inscrit parfaitement dans cette mission...

Nous avons le plaisir de publier ci-dessous la lettre que j'ai adressée à l'occasion de mon départ à tous les membres du réseau de l'HF le 27 septembre 2004.

Chers Collègues et Amis,

A l'occasion de mon départ, je tiens à remercier tous les membres du vaste réseau de l'HF constitué par les Délégués des pays membres, les membres du Conseil Science et Technologie, les Présidents des groupes de travail, les membres de commission et enfin les membres bienfaiteurs, collectifs et individuels, pour le soutien sans faille que vous m'avez apporté tout au long de mon mandat. L'activité de l'HF reposant essentiellement sur celle de ses membres, votre concours a été essentiel.

L'HF, organisation intergouvernementale, a une structure originale, puisqu'elle repose sur 3 niveaux de membres : les pays membres représentés par leurs Délégués, le Conseil Science et Technologie et son vaste réseau de membres de commission et enfin les membres bienfaiteurs, collectifs et individuels. Cette structure doit être préservée. Elle constitue une richesse indéniable pour l'HF.

Grâce à vous, grâce à la réflexion stratégique et grâce au personnel permanent de l'HF, des progrès notables ont été accomplis, essentiellement dans 4 directions :

- La diffusion de l'information: c'est une mission essentielle de l'HF. Depuis 5 ans, les 2010 communications présentées lors de conférences et congrès de l'HF, les 16 000 articles introduits dans notre base de données Fridoc, et enfin les 420 nouveaux articles de la Revue Internationale du Froid publiés depuis 1999 sont dorénavant plus accessibles, par voie électronique, grâce à la mise en ligne de Fridoc sur Internet en mars 2001.
- La communication sur nos activités a été développée grâce au lancement de la Newsletter de l'HF en novembre 2000 et grâce à l'ouverture du nouveau site Web en mars 2001 et à la mise à jour permanente de son contenu.
- L'ouverture de l'HF vers l'extérieur, grâce à la signature et à la mise en œuvre d'accords de partenariat avec 6 organisations internationales, régionales ou nationales.
- Enfin la participation de l'HF à la réflexion sur les grands sujets de préoccupation de notre société: développement durable, réchauffement climatique, sécurité alimentaire, etc., sujets sur lesquels il donne son avis régulièrement à travers des communiqués, des notes de position ou des notes d'information.

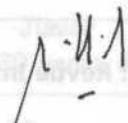
J'ai, maintenant, le plaisir de présenter mon successeur Didier Coulomb qui a été élu par le Comité Exécutif au mois d'août 2003 à Washington. Membre du Comité de Direction, il est au fait des activités de l'HF. Nous avons, par ailleurs, préparé depuis plusieurs mois cette succession par des réunions de travail fréquentes. Didier est diplômé de l'École Polytechnique, considérée comme la meilleure école française. Il a une expérience dans de nombreux domaines:

- En qualité de Sous-directeur de l'innovation et du développement technologique au Ministère de l'éducation nationale, de la recherche et de la technologie, à la tête d'une équipe de 70 personnes, pendant 5 ans, il a acquis une très bonne connaissance des différentes composantes de la recherche technologique et de ses modes de financement;
- En sa qualité de Secrétaire Général du CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), responsable de la gestion d'environ 2000 personnes, il s'est rodé au management des ressources humaines et des finances dans un organisme de développement en agroalimentaire, orienté vers l'international.
- Enfin, il a acquis une expérience associative et notamment celle de la gestion de membres bénévoles en présidant 2 associations d'ingénieurs en France.

Bien qu'étant diplômés de la même école d'application, l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Didier et moi avons des profils et des carrières très différents et je suis convaincu que l'HF bénéficiera de cette diversité.

Pour ma part, j'aurai tout loisir de repenser à tous les moments forts de mon passage à l'HF ainsi qu'à tous les amis que j'y ai connus, en reprenant contact avec la nature, sur le Chemin de Saint-Jacques-de-Compostelle (El Camino pour nos amis espagnols).

Bien cordialement



François Billiard

Hermann Halozan a reçu son diplôme en génie mécanique le l'Université technologique de Graz (Autriche) en 1965. Après une année passée dans l'industrie, il est retourné à son Université comme professeur adjoint à l'Institut de génie mécanique. En 1974, il a reçu son Doctorat en Sciences techniques, avec une thèse sur la stabilité statique et dynamique de l'écoulement diphasique dans les générateurs de vapeur; en 1980, il a reçu le titre de *venia legendi* (Univ. Doz.) Il est Directeur adjoint de l'Institut de génie mécanique et Chef du département chauffage, ventilation et conditionnement d'air depuis 1981. Il a été nommé professeur en 1996. La conservation d'énergie, avec l'accent mis sur les systèmes à pompes à chaleur, constitue sa spécialité; il a écrit un grand nombre de communications et a également donné des conférences sur la gestion de la maintenance des bâtiments, les technologies des pompes à chaleur, le chauffage, la ventilation et le conditionnement d'air, et l'efficacité énergétique. En dehors de ses activités universitaires, Hermann Halozan a une activité de conseil dans l'industrie et auprès des organisations gouvernementales.

Il est membre de l'Association du froid et du conditionnement d'air autrichien (ÖKKV), de l'Association de l'industrie des pompes à chaleur autrichienne (LGW), de l'Association du froid allemand (DKV), de l'European Heat Pump Association (EHPA) et de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). Au sein des activités de l'AIE en Autriche, il est l'un des Délégués de l'IEA Working Party on End-Use Energy Technologies et membre du Comité Exécutif et délégué (et président de 1998 à 2001) de l'Implementing Agreement on Advanced Heat Pumping Technologies (IEA Heat Pump Programme [Programme pompes à chaleur de l'AIE]), et président de l'équipe nationale autrichienne du Heat Pump Centre de l'AIE. Hermann Halozan est président de la Commission E2, Pompes à chaleur, récupération d'énergie, depuis 1999. Il est également membre du Comité de Direction de l'IIF.

Hermann Halozan a reçu son diplôme en génie mécanique le l'Université technologique de Graz (Autriche) en 1965. Après une année passée dans l'industrie, il est retourné à son Université comme professeur adjoint à l'Institut de génie mécanique. En 1974, il a reçu son Doctorat en Sciences techniques, avec une thèse sur la stabilité statique et dynamique de l'écoulement diphasique dans les générateurs de vapeur; en 1980, il a reçu le titre de *venia legendi* (Univ. Doz.) Il est Directeur adjoint de l'Institut de génie mécanique et Chef du département chauffage, ventilation et conditionnement d'air depuis 1981. Il a été nommé professeur en 1996. La conservation d'énergie, avec l'accent mis sur les systèmes à pompes à chaleur, constitue sa spécialité; il a écrit un grand nombre de communications et a également donné des conférences sur la gestion de la maintenance des bâtiments, les technologies des pompes à chaleur, le chauffage, la ventilation et le conditionnement d'air, et l'efficacité énergétique. En dehors de ses activités universitaires, Hermann Halozan a une activité de conseil dans l'industrie et auprès des organisations gouvernementales.

Il est membre de l'Association du froid et du conditionnement d'air autrichien (ÖKKV), de l'Association de l'industrie des pompes à chaleur autrichienne (LGW), de l'Association du froid allemand (DKV), de l'European Heat Pump Association (EHPA) et de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). Au sein des activités de l'AIE en Autriche, il est l'un des Délégués de l'IEA Working Party on End-Use Energy Technologies et membre du Comité Exécutif et délégué (et président de 1998 à 2001) de l'Implementing Agreement on Advanced Heat Pumping Technologies (IEA Heat Pump Programme [Programme pompes à chaleur de l'AIE]), et président de l'équipe nationale autrichienne du Heat Pump Centre de l'AIE. Hermann Halozan est président de la Commission E2, Pompes à chaleur, récupération d'énergie, depuis 1999. Il est également membre du Comité de Direction de l'IIF.

Systemes efficaces du point de vue énergétique pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments

Le deuxième principe de la thermodynamique permet de démontrer les avantages de la pompe à chaleur, au moyen d'un système de recompression mécanique de vapeur à cycle fermé, au mieux, un taux énergétique primaire (PER) de 105%, (c'est-à-dire l'efficacité de la chaudière η_B ; le maximum théorique serait 110%, basé sur le pouvoir calorifique le plus bas). Les pompes à chaleur atteignent 200% et davantage. Actuellement, environ 130 millions de pompes à chaleur avec un rendement thermique de 1300 TWh/an sont utilisées, réduisant les émissions de CO₂ de 0,13 GT/an. Le potentiel de réduction des émissions de CO₂ est de 6% des émissions totales de CO₂ mondiales, soit 22 Gt/an, en supposant que 30% des technologies utilisées dans le secteur du bâtiment sont des technologies disponibles actuellement. Des réductions jusqu'à 16% semblent possibles avec l'utilisation de technologies futures. Ainsi, les pompes à chaleur constituent l'une des technologies clés pour la conservation de l'énergie et la réduction des émissions de CO₂.

La production de froid, au moyen d'un système de recompression mécanique de vapeur à cycle fermé, a aussi été utilisée pour produire de la chaleur utile. Essentiellement, après la Seconde Guerre mondiale, les systèmes à pompe à chaleur pour le conditionnement d'air des maisons et des différentes pièces sont devenus courants, les systèmes « réversibles » pour chauffer mais aussi refroidir et déshumidifier sont apparus un peu plus tard, et, après la crise du pétrole de 1973, les pompes à chaleur utilisées uniquement pour chauffer dans des climats tempérés et froids ont également été développées.

Les frigorigènes (fluides actifs) utilisés jusqu'au milieu des années 30 étaient l'ammoniac, le dioxyde de carbone et d'autres fluides souvent toxiques et/ou inflammables; plus tard, les « frigorigènes surs » (chlorofluorocarbures, CFC et hydrofluorocarbures, HCFC), ont rapidement pris une place importante sur le marché. Il en est resté ainsi jusqu'au Protocole de Montréal en 1987, qui limite et finalement interdit la production future de CFC. Quelques années plus tard (Copenhague, 1992) un accord pour limiter

INTRODUCTION

Alors que le principe thermodynamique du procédé des pompes à chaleur a été trouvé au début

Hermann Halozan et René Rieberger

Institute of Thermal Engineering, Graz University of Technology, Graz, Austria
 Fax: (+43) 316 873 7305 e-mail: halozan@iwt.tu-graz.ac.at

la production de HCFC a également été signé. Le premier choix pour des fluides de substitution s'est porté sur les HFC (hydrofluorocarbures sans chlore) et leurs mélanges. Cependant, bien que ceux-ci n'ont aucun ODP (potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone), ils ont un GWP (potentiel de réchauffement planétaire) relativement élevé. Donc, certains pays, en particulier en Europe, ont tendance à reprendre l'utilisation des fluides actifs « naturels ». Le propane et l'isobutane (inflammables), le CO₂ et l'eau sont déjà couramment utilisés, ainsi que le NH₃ (toxique et inflammable), qui n'a jamais cessé d'être employé dans les grandes installations d'entrepôts frigorifiques.

Ainsi, les pompes à chaleur ont subi et subissent encore des changements dans leur conception et dans les fluides utilisés. Cependant, aujourd'hui, l'efficacité est généralement meilleure qu'avant ces changements, et continue à être améliorée. Ainsi, non seulement les effets sur l'environnement dus aux émissions directes des fluides actifs sont réduits, mais également les émissions indirectes grâce à des SPF (facteurs de performances saisonniers) plus élevés, des efficacités plus élevées des centrales de production d'énergie (τ_{pp}), et le mélange de sources d'énergie ayant des émissions de CO₂ inférieures. Le TEWI (impact de réchauffement total équivalent) est en train de diminuer de manière significative.

I. PRINCIPES DE BASE

Le terme général « technologies des pompes à chaleur » est utilisé pour les procédés au cours desquels le flux de chaleur naturelle d'une température plus élevée vers une température plus basse est inversé en ajoutant de l'énergie à valeur ajoutée, c'est-à-dire de l'exergie. Le terme pompe à chaleur est utilisé pour un système produisant de la chaleur utile. Au Japon et aux États-Unis, les systèmes de conditionnement d'air réversibles sont appelés pompes à chaleur. Les refroidisseurs sont plus ou moins toujours appelés refroidisseurs, même lorsqu'ils sont utilisés en tant que refroidisseurs à pompes à chaleur produisant également de la chaleur utile. En Europe, le terme pompe à chaleur est utilisé pour les systèmes de chauffage seul avec des sources de chaleur provenant de l'air extérieur ou de l'air d'évacuation du système de ventilation, du sol et de la nappe phréatique, combinés avec des systèmes hydroniques de distribution de chaleur.

1.1 Efficacité

La Figure 7 indique les efficacités du chauffage et du refroidissement thermodynamiques.

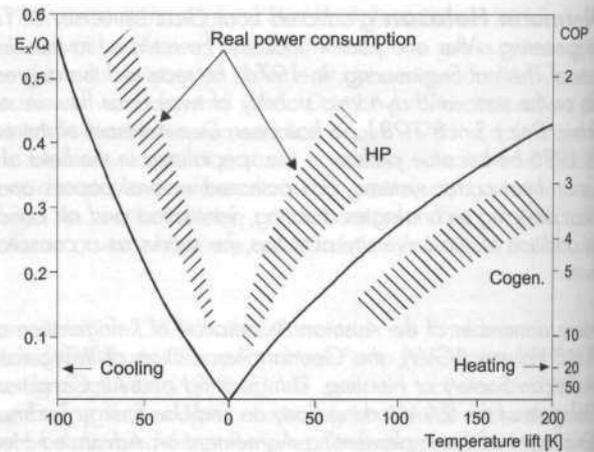


Figure 1. Consommation énergétique idéale et réelle E_x/Q pour le refroidissement (congélation, froid, conditionnement d'air) et le chauffage par une pompe à chaleur et un système de chauffage urbain à cogénération

Au-dessus de l'augmentation de la température efficace ambiante (positive ou négative) ΔT , l'exergie relative E_x/Q est tracée pour le procédé idéal (procédé de Carnot, deuxième principe de la thermodynamique) et pour les procédés réels. Pour le procédé idéal :

$$E_x/Q = 1 - T_a/T = (T - T_a)/T = \Delta T/T = \eta_c \quad \text{Eq. 1}$$

où E_x Exergie

Q Chaleur transférée

T_a Température ambiante, K

T Température du procédé, K

η_c Efficacité idéale (Carnot)

Le coefficient de performance (COP) est indiqué à droite du diagramme :

$$\text{COP} = Q/E_x \quad \text{Eq. 2}$$

L'efficacité interne est donnée par le rapport

$$\eta = \text{COP}/\text{COP}_{\text{ideal}} \text{ à } \Delta T \quad \text{Eq. 3}$$

La partie gauche concerne le refroidissement: la congélation, la production de froid et le conditionnement d'air, y compris la déshumidification; la partie droite concerne le chauffage: la zone concernant les pompes à chaleur indique une augmentation de la température de 5 à 70 K, E_x/Q est entre 0,08 et 0,45 et donc le COP est entre 2,2 et 12,5, l'efficacité η est aux alentours de 0,4 à 0,7. La zone « cogénération » est différente. Ici, la vraie perte exergétique est inférieure à la perte théorique car les pertes dues à la turbine et au condenseur sont réduites.

1.2 Facteurs de performance

L'énergie couramment utilisée pour entraîner les pompes à chaleur est l'électricité, et à

l'avenir, des systèmes de production d'énergie améliorés basés sur les énergies renouvelables et fossiles devront être envisagés. L'efficacité de la centrale de production d'énergie η_{pp} , est autour de 58% pour les centrales à gaz à cycle combiné disponibles sur le marché, des valeurs similaires sont possibles en utilisant du fioul en tant que carburant. η_{pp} dépend, bien sur, du type de carburant (source d'énergie primaire). Le *Tableau 7* indique les relations entre les sources d'énergie primaire les plus importantes et les SPF de 4 et 5. Le taux énergétique primaire est plus élevé pour la production directe d'électricité que par des sources renouvelables comme l'hydroélectricité ou les éoliennes, pour lesquelles, par définition, $\eta_{pp} = 1,0$. Le taux énergétique primaire donne une mesure absolue des unités de chaleur utile obtenues d'une unité d'énergie primaire à l'entrée de la centrale, en négligeant pour le moment les pertes en amont de la centrale telles que lors de la production, le nettoyage, la transmission¹ et les pertes lors de la distribution entre la centrale et les pompes à chaleur.

Cependant, plus d'informations peuvent être obtenues en comparant, pour un carburant donné (source énergétique primaire), l'efficacité du chemin indirect via la centrale de production d'énergie et la pompe à chaleur (taux énergétique primaire) avec l'efficacité du chemin direct de conversion (η_B), par exemple, dans une chaudière. Le taux peut être appelé le taux d'énergie utile (UER).

$$\text{UER} = \text{PER}/\eta_B \quad \text{Eq. 4}$$

Comparer le même carburant signifie que tous les effets en amont s'annulent. Les effets en aval, c'est-à-dire les pertes locales de distribution, s'annulent aussi dans le cas d'un

chauffage électrique à énergie hydraulique, des éoliennes ou des centrales nucléaires, tandis qu'ils peuvent être approximativement considérés comme ayant une valeur égale lorsque l'on compare l'électricité pour la pompe à chaleur et le fioul pour la chaudière. Si, dans le dernier cas, les efficacités de distribution η_c sont nettement différentes, une formulation plus exacte serait :

$$\text{UER} = (\text{PER}/\eta_B)(\eta_{d,el}/\eta_{d,fuel}) \quad \text{Eq. 5}$$

où $\eta_{d,el}$ concerne l'électricité, et $\eta_{d,fuel}$ l'efficacité de la distribution du carburant. Les données du *Tableau 1* montrent que :

- UER est plus élevé ou - pour $\eta_B = 1,0$, comme dans le cas du chauffage électrique - égal au taux énergétique primaire (PER). L'UER ne pourrait être plus bas que le taux énergétique primaire que dans le cas où η_B est un peu plus élevé que 1,0 - comme ça pourrait être le cas pour des chaudières à gaz à condensation très efficaces - ou pour $\eta_{d,el} < \eta_{d,fuel}$.
- Pour l'électricité directe à partir d'énergies renouvelables, les efficacités sont de 1,0, et l'UER = PER = SPF.
- Pour les données de base du *Tableau 1*, UER varie de 1,33 à 5,0.
- Les efficacités des chaudières aux alentours de 1,0 sont près de la limite théorique (c'est-à-dire pour la chaudière à gaz à condensation). Un SPF aux alentours de 5,0 est bien plus bas que la limite théorique des pompes à chaleur; un SPF de 6 ou plus peut être possible et sera rentable à l'avenir.

Pour les pompes à chaleur à absorption, le PER est le rapport entre la chaleur dégagée et l'apport en énergie primaire (pas à la centrale mais à la pompe à chaleur).

Tableau 1. Taux énergétiques primaires et d'énergie utile typiques

	Charbon (et biomasse)	Gaz	Electricité à partir d'énergies renouvelables (hydraulique, éolienne)	Nucléaire
Efficacités				
Centrale de production d'électricité, η_{pp}	0,4	0,55	1,0	0,33
Chaudière (conversion locale), η_B	0,8	0,98	1,0	1,0
PER pour SPF = 4				
PER = SPF. η_{pp}	1,6	2,20	4,0	1,33
UER = PER/ η_B	2,0	2,24	4,0	1,33
PER pour SPF = 5				
PER = SPF. η_{pp}	2,0	2,75	5,0	1,67
UER = PER/ η_B	2,5	2,81	5,0	1,67

1.3 Gains d'énergie renouvelable obtenus grâce aux pompes à chaleur

Il convient de noter que les pompes à chaleur, qui, dans la plupart des cas, utilisent la chaleur gratuite provenant de l'environnement (air, eau, sol) et de la chaleur perdue, constituent une source importante d'énergie renouvelable. Le gain en terme de chaleur renouvelable R des pompes à chaleur est la différence entre le rendement thermique Q et l'exergie d'entraînement E_x (dans le cas de l'électricité, $E = E_x$) :

$$R = Q - E = Q - Q/SPF = Q(1 - 1/SPF) \quad \text{Eq. 6}$$

Evidemment, si l'énergie d'entraînement est l'électricité provenant des sources renouvelables, toute l'énergie utilisée pour la pompe à chaleur est de l'énergie renouvelable.

II. APPLICATIONS

Les secteurs dans lesquels les pompes à chaleur sont utilisées peuvent être divisés entre le secteur du bâtiment (résidentiel et commercial), où fonctionnent la majorité de pompes à chaleur, et le secteur industriel. La majorité des pompes à chaleur utilisées dans le secteur résidentiel sont des conditionneurs d'air réversibles air-air pour le chauffage et le refroidissement. Différents types sont disponibles:

- type fenêtre: populaire principalement aux Etats-Unis, au Brésil, en Australie, en Arabie Saoudite, aux Philippines, en Inde, en Thaïlande et à Hong Kong;
- les conditionneurs d'air de pièce de type split (capacité de refroidissement de moins de 5 kW) : ils sont répandus au Japon et en Chine, et sont aussi en train de devenir prédominants en Corée du Sud, en Thaïlande et en Malaisie;
- les systèmes de conditionnement d'air monoblocs qui sont fabriqués et vendus principalement aux Etats-Unis. Ils deviennent également les principaux types en Australie, au Moyen-Orient, au Canada et au Mexique;
- les conditionneurs d'air monoblocs de type split et multi-split (capacité de refroidissement de plus de 4 kW) sont répandus principalement au Japon, en Corée du Sud et en Chine. Les systèmes de type split, et en particulier de type multi-split, ont été améliorés de manière significative en suivant l'expansion du marché, ces améliorations comprennent le développement des méthodes de régulation à vitesse variable, qui régulent la performance en variant la vitesse du compresseur selon la charge thermique; et des fonctions de chauffage et de refroidissement simultanés pour le conditionneur d'air de type multi-split.

Ces systèmes air-air réversibles sont très rentables du fait que leur dispositif de fonctionnement à double mode est relativement peu coûteux et du fait que la durée de fonctionnement annuelle est longue.

L'Europe s'est concentrée sur des systèmes de chauffage seul à eau souterraine, avec le sol ou l'air extérieur comme source de chaleur, intégrés dans des systèmes hydroniques de distribution de chaleur. Des systèmes sol-air combinés avec des systèmes de distribution de chaleur à basse température atteignent des SPF (facteurs de performance saisonniers) de 4 ou davantage. Cependant, la part de marché des conditionneurs d'air de type split est en train d'augmenter rapidement.

Dans de plus grands systèmes, particulièrement dans les immeubles commerciaux, des refroidisseurs et des pompes à chaleur sont utilisés; parfois des pompes à chaleur sur boucle d'eau sont employées au lieu des systèmes de distribution à quatre tuyaux à ventilo-convecteurs. En Asie les systèmes à sorption - à la fois à absorption et à adsorption - deviennent courants, le but principal de ces systèmes étant l'écrêtage des pointes de demande en énergie électrique. Généralement, l'énergie d'entraînement est le gaz, mais de plus en plus de systèmes sont entraînés par la chaleur obtenue des installations de cogénération. Les alternatives sont les systèmes entraînés électriquement avec des systèmes d'accumulation de glace.

Deux autres types de systèmes utilisés dans le secteur résidentiel sont des chauffe-eau à pompe à chaleur et des grands systèmes de chauffage urbain. De grandes pompes à chaleur avec des compresseurs centrifuges bi-étage pour le chauffage urbain ont été fabriquées et sont utilisées principalement en Suède. Les capacités thermiques de ces systèmes sont habituellement autour de 10 à 14 MW par unité, mais les capacités des unités vont jusqu'à 45 MW. L'énergie d'entraînement est l'électricité, les sources de chaleur sont les eaux usées traitées, l'eau de mer ou la chaleur perdue industrielle.

III. SITUATION ACTUELLE

L'application des pompes à chaleur dépend fortement des conditions climatiques et des normes du bâtiment.

- les marchés principaux sont des régions à hivers peu rigoureux - pas au-dessous de -5°C - et des étés qui exigent un refroidissement et une déshumidification. Ceci constitue le secteur

dans lequel des conditionneurs d'air à air à pompes à chaleur préfabriqués, qui peuvent être facilement installés et qui, grâce à une durée de fonctionnement annuelle longue, sont fortement rentables;

- dans des régions avec des hivers rigoureux, et qui nécessitent aussi un refroidissement en été, les pompes à chaleur rentrent en concurrence avec les systèmes de chauffage conventionnels. L'utilisation de l'air comme source de chaleur pour le chauffage, à cause d'un SPF bas n'est pas la meilleure solution dans ce cas;
- les régions avec des hivers rigoureux et aucun besoin réel de refroidissement en été peuvent constituer un marché pour les pompes à chaleur, si des sources de chaleur comme les eaux souterraines ou le sol peuvent être employées. La chaleur du sol peut être extraite soit par des collecteurs installés horizontalement (rentables dans le cas d'un nouveau bâtiment, si une zone assez grande est disponible) ou à travers des trous de forage.

Les régions du monde où on utilise des pompes à chaleur ont été définies de la façon suivante : la majorité des pompes à chaleur sont utilisées au Japon, en Chine et aux Etats-Unis, généralement des systèmes air-air à double mode (réversibles) pour le chauffage et le refroidissement. En Europe, des pompes à chaleur à chauffage seul sont utilisées principalement dans les parties nordique et centrale, et des systèmes réversibles dans la partie méridionale. Les pays restants sont regroupés sous « Autres ».

III.1 Les marchés par régions

- Le nombre de pompes à chaleur installées au Japon en 2000 a atteint environ 67 millions.

Le nombre de conditionneurs d'air de pièce (RAC) vendus a atteint un maximum d'environ 8 millions en 1996 (Figure 2). Le marché des pompes à chaleur s'approche peu à peu de la saturation.²

Un nombre croissant de grands systèmes à pompes à chaleur sont équipés de systèmes d'accumulation thermique, à stockage d'eau jusqu'en 1993, et principalement à accumulation de glace après cette date. Les ventes au Japon de pompes à chaleur entraînées par un moteur a atteint plus de 40 000 unités en 1997. Le nombre de systèmes à sorption augmente, bien que principalement pour le refroidissement.

- La production de conditionneurs d'air de pièce en Chine était basse jusqu'en 1990, quand un essor rapide a eu lieu, la production atteignant environ 5 millions d'unités en 1997, probablement autour des 7 millions en 2000, et plus en 2001 (Figure 3). Ceci signifie que la Chine a déjà la plus grande industrie de production de conditionneurs d'air dans le monde. La part des pompes à chaleur était de 60% en 1997, et le nombre de pompes à chaleur installées était de 11.4 millions en 1997, légèrement plus qu'aux Etats-Unis.⁴ Actuellement, le nombre de pompes à chaleur avoisine les 25 millions.
- Le nombre de pompes à chaleur installées aux Etats-Unis en 1992 était de 9,5 millions; en 1997 le nombre avait atteint 11,1 millions.⁴ Les ventes annuelles sont de 1,2 millions, en partie pour le remplacement. Le nombre actuel est donc aux alentours de 13 ou 14 millions. Les chiffres tiennent compte des ventes annuelles de 60 000 pompes à chaleur

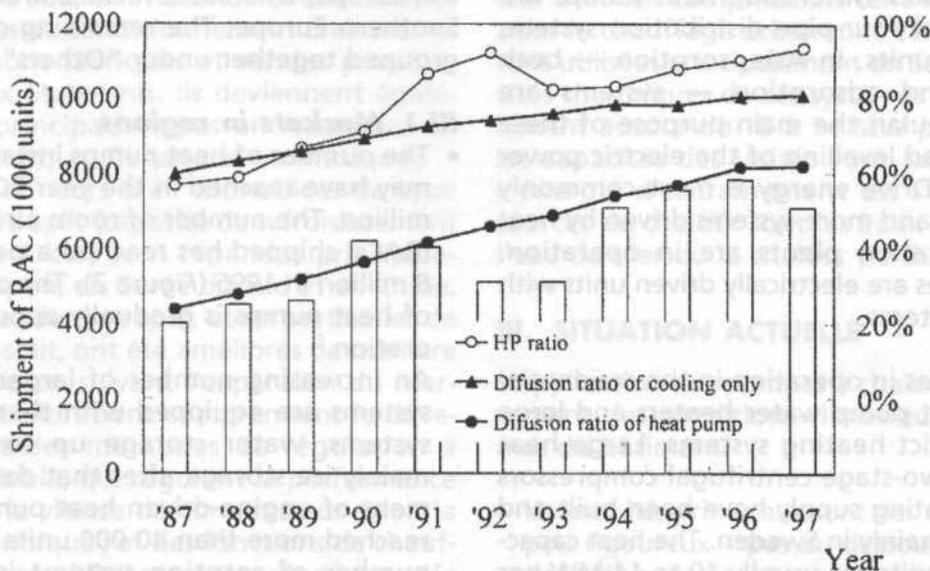


Figure 2. Ventes domestiques de conditionneurs d'air de pièce au Japon³

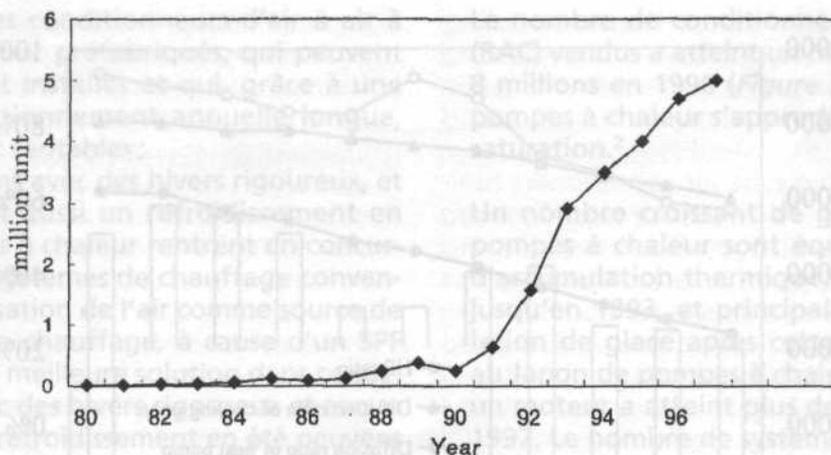


Figure 3. Conditionneurs d'air de pièce installés en Chine²

sol-air (géothermique). Aux Etats-Unis, les conditions climatiques constituent un problème. Le conditionnement d'air est nécessaire dans la quasi-totalité du pays, mais les systèmes air-air ne peuvent pas couvrir les pointes en hiver aux températures extrêmement basses. Ceci a comme conséquence l'utilisation de systèmes où les conditionneurs d'air sont employés pour le refroidissement et des chaudières à gaz pour le chauffage. La situation au Canada est très semblable, dans les régions peuplées de ce pays.

- Après la crise pétrolière, l'Europe s'est concentrée sur les pompes à chaleur hydro-thermiques pour le chauffage seul et les systèmes à récupération de chaleur, mais de nos jours les ventes des systèmes bi-mode se développent. Le nombre de pompes à chaleur en Europe en 1997 était de 4,3 millions.^{4,5} La majorité étant des systèmes réversibles air-air dans les secteurs résidentiels et commerciaux en Europe méridionale, principalement importés des Etats-Unis et du Japon. La part de marché de ces systèmes augmente. Le nombre de systèmes à chauffage seul et de systèmes à récupération de chaleur est d'environ 1,5 millions.

Un grand marché de pompes à chaleur existe en Suède ; d'autres pays ont mis en place des programmes pour les pompes à chaleur - Suisse, Allemagne et Pays-Bas - ou ils sont en train de préparer des programmes pour améliorer la percée sur le marché de cette technologie. La déréglementation du marché de l'électricité promet des tarifs plus bas pour l'électricité, ce qui pourrait être un avantage.

- Dans l'examen du marché entre 1993 et 1996 du Heat Pump Centre de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA-HPC)⁴, il y avait seulement 0,6 million d'unités énumérées pour les régions autres que les quatre mentionnés ci-dessus (0,5 million pour le Canada, et moins

de 0,1 million pour la Corée du Sud). Ainsi un total de a été obtenu en 1996/début 1997.

Japon	57,6 millions
Chine	11,4 millions
Etats-Unis	11,1 millions
Europe	4,3 millions
Autres	0,6 million
Total	85,0 millions

Mais il y a d'autres marchés³ tels que Hong Kong, l'Asie du Sud-Est (Indonésie, Thaïlande, Malaisie, Singapour, Philippines), l'Inde, Australie/la Nouvelle-Zélande avec des ventes annuelles de conditionneurs d'air d'environ 3 millions d'unités par an, à partir desquels un nombre total d'unités installées de 25 millions peut être estimé. Ajoutant une autre estimation de 7 millions d'unités pour l'Amérique du Sud, le Mexique, l'Afrique du Sud, le Moyen Orient et les autres pays, le nombre total pour 1996-1997 est de 95 millions, plutôt que les 85 millions cités ci-dessus pour l'année 1997. Les 85 millions d'unités citées ci-dessus par l'IEA-HPC pour 1997 se divisent en 75 millions pour le secteur résidentiel, presque 10 millions pour le secteur commercial et environ 20 000 unités pour le secteur industriel.

Selon l'étude du marché de l'IEA-HPC⁴, le nombre de pompes à chaleur dans le monde entier a augmenté en quatre ans allant de 1992 à 1996 de 55 à 85 millions, c'est-à-dire de 55%. En supposant que pendant les quatre années de 1996-1997 à 2000-2001 l'augmentation était légèrement inférieure (due à la croissance économique inférieure en Asie durant cette période), le nombre total, pour l'année 2001, à partir des 95 millions cités ci-dessus plutôt que des 85 millions d'unités, est de l'ordre de 130 à 140 millions de pompes à chaleur utilisées dans le monde entier.

11.2 Rendement thermique

Le rendement thermique des pompes à chaleur, à l'échelle mondiale, est estimé de la façon suivante, pour 2001 à partir des données du *Tableau 2* présenté dans la prochaine section :

Résidentiel	75 millions d'unités, 10 000 kWh/an chacun: 750 TWh/an
Commercial	350 TWh/an
Industriel	200 TWh/an
Total	1300 TWh/an

Selon la relation donnée dans la section II.3, le gain en énergie renouvelable R est de 870 TWh/an.

IV. REDUCTION DU RECHAUFFEMENT PLANÉTAIRE GRÂCE AUX POMPES À CHALEUR

Selon le Protocole de Kyoto, les émissions mondiales de gaz à effet de serre, en particulier dans les pays industrialisés, devront être réduites. Des six gaz à effet de serre cités dans le Protocole de Kyoto, le CO₂ est le plus important (il est responsable de plus de 50% de l'impact sur le réchauffement planétaire) et, en même temps, il fait partie des émissions les plus difficiles à réduire. Cependant, il peut être démontré que les pompes à chaleur sont l'une des technologies principales pour la conservation de l'énergie et la réduction des émissions de CO₂ (IEA-HPC, 1997).

Le *Tableau 2* présente les gains actuels et prévus des émissions de CO₂ grâce à l'utilisation des pompes à chaleur dans les secteurs résidentiels et commerciaux, ainsi que dans l'industrie. La première colonne est basée sur, ou déduite, des données de l'IEA-HPC (1997). Ces données montrent, qu'en 1997, les pompes à chaleur ont déjà permis des gains de 0,5% des émissions mondiales de CO₂. La deuxième colonne est une extrapolation des données de 1997 à 2001 selon les données de la section III.

Les gains potentiels présentés dans les troisième et quatrième colonnes sont également basés sur les données de l'IEA-HPC (1997). La troisième colonne concerne les gains potentiels (6%) d'émissions de CO₂ grâce à une pénétration améliorée sur le marché (30% dans le secteur du bâtiment) en utilisant les technologies disponibles actuellement. Ces 6% constituent l'une des plus grandes contributions à la réduction de CO₂ qu'une technologie simple, disponible sur le marché, peut offrir. La quatrième colonne est basée sur une amélioration significative des technologies futures des pompes à chaleur et

des efficacités des centrales de production d'énergie. Elle permet des gains de 16% sur les émissions totales mondiales de CO₂.

V. DEVELOPPEMENTS POSSIBLES DANS LE FUTUR

V.1 Développements technologiques

Un exemple de développement est l'amélioration des COP, par exemple pour les conditionneurs d'air de pièce : passer d'un COP de 2,2 à 3,1 pour le refroidissement et le chauffage pour le modèle de 1982 à un COP de 4,1 à 4,3 pour le modèle de 1997.⁶ Des données similaires (COP = 4,29) sont présentées par d'autres chercheurs. Les programmes d'étiquetage constituent l'une des forces motrices pour l'amélioration.

- dans la gamme des petites et moyennes capacités, le compresseur à piston a été pratiquement remplacé par le compresseur à spirale et les échangeurs de chaleur à liquide/frigorigène ont été remplacés par des échangeurs de chaleur à plaques plates soudées;
- les SPF des pompes à chaleur sol-air pour le chauffage seul, et en particulier ceux des systèmes directs à évaporation en Europe, ont augmenté à 4, et récemment à 5 ou davantage. En plus de meilleurs composants, l'amélioration des codes de construction avec la possibilité de réduire les températures exigées à des valeurs au-dessous de 35°C sont responsables de ce développement.

V.2 Développement du marché

Les développements possibles à l'avenir peuvent être évalués de deux façons : en extrapolant à partir de la production annuelle selon le *Tableau 2*, partie (1), et en l'ajoutant au total des installations, partie (2), prenant en compte les chiffres des systèmes qui doivent être mis hors service, et en évaluant le rendement thermique global selon les parties (3) et (4) du *Tableau 2* (méthode ascendante), ou en prenant l'énergie totale des trois secteurs principaux (industrie, résidentiel/commercial, transport) à partir de statistiques montrant qu'une part maximale pour chaque secteur est probablement et raisonnablement couverte par les pompes à chaleur; et une part (inférieure) couverte avant un certain moment, disons en 2020, qui doit être reliée aux données du *Tableau 2*, partie 4, pour l'an 2000 (méthode de haut en bas).

CONCLUSION

Les pompes à chaleur constituent une technologie ancienne, qui n'a pas été employée à

Tableau 2. Gains actuels et prévus d'émissions de CO₂ grâce à l'utilisation des pompes à chaleur

	1997 ¹	2001 ²	Gains potentiels ¹	
			Actuels	Futur
(a) Résidentiel				
Demande en chaleur annuelle par résidence kWh	10000	10000	9000	8000
Emissions spécifiques de CO ₂ kg CO ₂ /kWh chaleur				
des pompes à chaleur kg CO ₂ /kWh chaleur	0,2153	0,2	0,18	0,12
des chaudières à fioul kg CO ₂ /kWh chaleur	0,7134	0,7	0,67	0,64
Nombre de pompes à chaleur résidentielles 10 ⁶	65	70	670	1550
Emissions de CO ₂				
des chaudières à fioul MtCO ₂ /an	204	215	1672	3500
des pompes à chaleur MtCO ₂ /an	140	140	1022	1500
gains des pompes à chaleur MtCO ₂ /an	64	75	650	2000
(b) Gains du secteur commercial MtCO ₂ /an	30	35	350	1100
(c) Gains résidentiel + commercial MtCO ₂ /an	94	440	4000	3100
(d) Gains industrie MtCO ₂ /an	20	22	200	600
(e) Gains totaux MtCO ₂ /an	114	132	1200	3700
(f) Pourcentage du gain des émissions de CO₂ par les pompes à chaleur³	0,5%	0,6%	6,0%	16,0%

1. de l'IEA-HPC (1997) ou déduit de ces données

2. estimés

3. émissions mondiales annuelles de CO₂ en 1997: 22 milliards de tonnes

0,215 kg CO₂/kWh de chaleur (pour 0,55 kg CO₂/kWh d'énergie électrique selon le mélange européen de carburants et un SPF = 2,5), diminuant à 0,12 pour une efficacité de la centrale de production d'électricité et un SPF améliorés, et moins de carburants fossiles dans le mélange pour 80% d'efficacité en 1997, augmentant à 90%

grande échelle tant que les prix de l'énergie et l'efficacité de la production d'électricité restaient bas. Les crises pétrolières ont changé cette situation, et le Protocole de Kyoto constitue l'un des facteurs dans le développement croissant du marché de cette technologie. Basées sur les développements récents, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- les pompes à chaleur offrent la possibilité de réduire de manière significative la consommation d'énergie, principalement dans le secteur du bâtiment, mais aussi dans l'industrie. Le deuxième principe de la thermodynamique montre les avantages : tandis qu'une chaudière à condensation peut atteindre, au mieux, un taux énergétique primaire (PER) de 105% (le maximum théorique serait de 110%, basé sur le pouvoir calorifique le plus bas), les pompes à chaleur atteignent 200% et plus, l'utilisation de l'énergie hydraulique et éolienne permet d'atteindre 400% ou davantage ;
- la majorité des pompes à chaleur sont utilisées au Japon, en Chine et aux Etats-Unis, principalement des systèmes bi-mode air-air

utilisés pour le chauffage et le refroidissement. La Chine a déjà la plus grande industrie de production des conditionneurs d'air et en Asie du Sud-Est, cette technologie a tendance à se développer rapidement;

- l'Europe s'est concentrée jusqu'à présent sur les pompes à chaleur hydroniques pour le chauffage seul et les systèmes à récupération de chaleur, mais les ventes des systèmes bi-mode augmentent;
- l'énergie d'entraînement est le plus généralement l'électricité, et à l'avenir, des systèmes améliorés de production d'électricité basés sur des énergies renouvelables et des combustibles fossiles doivent être pris en compte. L'efficacité des centrales de production d'énergie à gaz à cycle combiné disponibles sur le marché est actuellement d'environ 58%, et des valeurs semblables seront possibles avec le fioul en tant que carburant. Les pompes à chaleur sol-air (géothermique) combinées avec des systèmes de distribution de chaleur à basse température atteignent un facteur de performance saisonnier (SPF) de 5 et plus, ce qui veut dire des PER de 220 à 280%. D'autres améliorations sont possibles à l'avenir;

Conférences de l'HF et conférences patronnées par l'HF! en savoir plus

Φ Première annonce dans ce Bulletin

Technologies après récolte sans frontières - Conférence 2004

Sydney (Australie) - 10-12 novembre 2004

Cette conférence patronnée par l'IMF vise à souligner les développements les plus récents et les plus passionnants de ce secteur. La conférence traite le thème suivant: technologies après récolte et distribution de produits horticoles de qualité - identification des exigences physiologiques et techniques des produits.

Cette conférence aura pour but de mettre en avant les dernières innovations dans ce domaine, en s'attardant sur les points suivants:

- cinétique et modélisation de la qualité
- physiologie après récolte
- mesure des paramètres de qualité
- produits fraîchement coupés - défis techniques
- traitements et amélioration des procédés
- extension de la durée de conservation
- effets des conditions avant récolte sur l'après récolte
- suivi et contrôle des chaînes de distribution.

Contact: Dr David Tanner or Carolyn Moorshead. Tel. +61.3.8623.3013. Fax +61.3.9614.8949. E-mail: David.Tanner@csiro.au or carolyn@airah.org.au. Web: www.airah.org.au/postharvest2004.

(Intéresse la Commission C2)

Cryomédecine 2004

31e Réunion annuelle de l'Association japonaise de la médecine à basse température

Tokyo (Japon) - 18-20 novembre 2004

La Japan Society for Low Temperature Medicine (dont le Président est Junta Harada) organise une conférence mondiale, "Cryomédecine 2004", en collaboration avec l'HF et l'ISC; elle invite des cryochirurgiens, des spécialistes en matière de cryoconservation, des cryoimmunologistes ainsi que des scientifiques dans d'autres disciplines dans ce secteur, de membres et les non membres intéressés par tous les domaines de la cryomédecine à y participer.

Lors de cette conférence, on présentera l'état de l'art ainsi que des développements et des applications médicales de basses températures.

Le programme scientifique couvrira des thèmes principaux suivants:

- cryochirurgie du cancer hépatique
- cryochirurgie guidée à l'aide d'imagerie
- cryochirurgie permettant la destruction non envahissante de tumeurs malignes
- progrès récents dans le domaine de la cryoimmunologie
- cryoconservation à long terme de cellules, de tissus et d'organes
- transfusion sanguine autologue destinée à enrayer des effets secondaires
- ablation de tumeurs à l'aide de cryotechniques, de techniques à radiofréquence et au laser: étude comparative
- cryochirurgie cardiaque
- cryochirurgie régénératrice en dermatologie
- cryomédecine: nouveaux aspects
- contributions de la cryomédecine dans les domaines de la régénération et des traitements peu envahissants
- cristaux de glace au cours de la vie et après la mort.

Contact: The Secretariat, Office of Cryo'04, Dept. Radiol., Jikei University Kashiwa Hospital, 163-1 Kashiwashita, Kashiwashita, Chiba, JP. Tel. +81.(0)4.7164.1111. Fax+81.(0)4.7166.9374. E-mail: cryo@jikei.ac.jp. Web: homepage2.nifty.com/cryomedicine.

(Intéresse la Commission C1)

Φ L'industrie du froid au 21e siècle

Moscou (Russie) - 6-8 décembre 2004

Cette conférence sera patronnée par l'Institut International du Froid. Les organisateurs de la conférence attendent des directeurs, des ingénieurs en chef, des chefs de laboratoire, des technologues en chef, des chefs de production et d'autres spécialistes des sociétés et usines dans l'industrie du froid en Russie et à l'étranger, des chefs des syndicats, des associations, des chefs de centres de recherches et de développement ou de centres de recherche et de développement de produits et des représentants des médias.

Les sujets abordés incluent:

- sécurité alimentaire en Russie
- technologies du froid pour la transformation des matières premières et des produits
- équipement frigorifique pour l'agriculture et l'industrie alimentaire
- fluides actifs dans les machines frigorifiques, huiles et frigorigènes
- technologies pour économiser l'énergie pour les sociétés dans l'industrie de la transformation des produits alimentaires
- suivi et audit de la consommation d'énergie des sociétés dans l'industrie du froid

- sécurité industrielle et écologique
- tendances modernes dans la fabrication des systèmes frigorifiques pour l'agriculture et l'industrie alimentaire.

Un salon fera aussi partie de cette conférence. La zone d'exposition est située en dehors de la salle de conférence, où les fabricants, russes et étrangers, d'équipement, d'emballages, de matières premières et de produits finis exposeront leurs catalogues et leurs produits, en contact direct avec les personnes participant à la conférence.

Contact: Dr Vladimir DASHEVSKY. Tel.-Fax +007.(095).235.4281 or 959.6669 or 954.3201. E-mail: dashevsky@co.ru or igrfop@dol.ru.

(Intéresse les Commissions B1, B2, C2, D1, E2)

Entreposage, transport frigorifique et vente des produits alimentaires: derniers développements

Amman (Jordanie) - 28-30 mars 2005

Cette conférence de l'IIF fait partie d'une série de conférences scientifiques tenues par de diverses commissions de l'IIF dans plusieurs pays. La conférence fournira un forum aux chercheurs, experts et ingénieurs pour discuter des idées de recherches, échanger les connaissances et les pratiques et passer en revue les progrès dans les domaines relatifs au froid. Les objectifs sont de donner un aperçu des derniers développements dans les produits alimentaires réfrigérés, leur transport, l'étalage et tous les aspects relatifs; pour échanger les connaissances et l'expertise entre les participants, pour stimuler les relations entre les organismes locaux, régionaux et internationaux travaillant dans le secteur du froid.

Les thèmes inclueront:

- aliments réfrigérés (sécurité, emballage, économie)
- entreposage et distribution (incluant la conception des entrepôts frigorifiques, efficacité énergétique, problèmes dans les pays chauds)
- meubles de vente et distribution (incluant la conception des supermarchés, efficacité énergétique, expérience du Moyen Orient, conception de systèmes à faible charge, confinement, frigorifères secondaires, conception des plates-formes de distribution, essais des meubles de vente)
- transport de fond (maritime, routier, ferroviaire et aérien; atmosphères contrôlées; indication de la consommation d'énergie; expérience du Moyen Orient).

Contact: Prof. M. Hammad. E-mail: hammad@ju.edu.jo or confiir@ju.edu.jo. Web: fetweb.ju.edu.jo/conferences/confiir/confiir.html.

(Intéresse les Commissions C1, D1, D2)

Systemes frigorifiques à l'ammoniac: progrès et développements

Ohrid (Ancienne République Yougoslave de Macédoine) - 6-8 mai 2005

Cette conférence de l'INF se concentrera sur:

- conception des systèmes modernes à ammoniac et innovation technologiques (frigorifères naturels, technologie à NH3 à faible charge, expansion directe);
- efficacité énergétique (incluant le refroidissement indirect, comparaison avec les systèmes à HCFC et à HFC, NH3CO2 et autres systèmes à cascade);
- systèmes à ammoniac dans les pays en développement;
- normes techniques et de sécurité;
- recommandations et matériels pour formations;
- information publique des avantages des frigorifères naturels.

Contact: Prof. Risto Ciconkov, Faculty of Mechanical Engg., University Sv. Kiril and Metodij, P.O.Box 464, 1000 Skopje, MK. Tel. +389.236.4762. Fax: +389.236.2298. E-mail: ristoci@ukim.edu.mk. Web: www.mf.ukim.edu.mk/web_ohrid2005/ohrid-2005.html.

(Intéresse les Commissions B1, B2, D1)

MODEL-IT 2005

Louvain (Belgique) - 29 mai-2 juin 2005

Ce symposium a pour but d'explorer la multitude de techniques de modélisation avec un usage potentiel dans le domaine de la recherche sur la qualité des produits dans la chaîne agroalimentaire. Les thèmes abordés couvrent le domaine complet de la modélisation de la qualité dans la chaîne agroalimentaire du râteau à la fourchette. Les chercheurs dans divers domaines de la modélisation sont encouragés à intégrer dans ou associer leurs méthodologies à la chaîne agroalimentaire. Sans imposer de limites, quelques exemples de techniques possibles sont:

- modèle stochastique
- exploitation des données
- modèles discrets
- réseaux neuronaux
- réseaux métaboliques
- modèles statistiques multivariés
- analyse des séries de temps
- modèles fondés sur des règles
- modélisation à l'échelle nano et micro
- modélisation épidémiologique
- courbes de liaison
- cinétique pharmacocinétique
- analyse des risques
- dynamique des populations
- modèles chaotiques.

Bulletin

de l'Institut International du Froid
of the International Institute of Refrigeration



2004-6

*Abstracts and News
Analyses et Informations*

Article de synthèse

**Systèmes efficaces du
point de vue énergétique
pour le chauffage et
le refroidissement
des bâtiments**

**Hermann Halozan
René Rieberer**

Review Article

**Energy-efficient heating
and cooling systems
for buildings**

**Hermann Halozan
René Rieberer**