

Bulletin

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

99-1



Abstracts and News Analyses et Informations

**Horst Kruse, Rudolf Heidelck,
Jürgen Süss**

The Application of CO₂ as a Refrigerant
L'utilisation du CO₂ comme frigorigène

Buenos Aires Conference, November 1998
Conférence de Buenos Aires, novembre 1998
Global Warming / *Effet de serre*

Nantes

IIR Conference on Hygiene, Quality and Safety
*Conférence IIF sur l'hygiène, la qualité et
la sécurité*

Oslo

IIR Gustav Lorentzen Conference
Conférence IIF Gustav Lorentzen



VOLUME LXXIX
BIMESTRIEL / PUBLISHED BI-MONTHLY
ISSN - 0020 69-70



Prof. Horst Kruse est Professeur émérite à l'Institut du Froid de l'Université de Hanovre et responsable du Centre de Recherche sur le froid et les pompes à chaleur (Hanovre et Berlin). Il est Président de la Commission B2 de l'IW.



Rudolf Heidelck est ingénieur diplômé et chercheur à l'Institut du froid de l'Université de Hanovre. Il prépare sa thèse de doctorat sur les machines à expansion pour systèmes à CO₂.



Dr. Jurgen Siiss a été ingénieur-chercheur à l'Institut du froid de l'Université de Hanovre. Depuis septembre 1998, il travaille au service central de développement chez Danfoss à Nordborg (Danemark). Il est Premier Secrétaire de la Commission B2 de l'UF.

L'utilisation du CO₂ comme frigorigène

par

HOSt KRUSE, Rudolf Heidelck et Jurgen Siiss

Centre de recherche sur le froid et les pompes à chaleur (Hanovre)
Institut du froid et de thermique appliquée,
Université de Hanovre

Le dioxyde de carbone (CO₂) deviendra peut-être un frigorigène important dans le futur. Cet article passe en revue la littérature concernant son utilisation comme frigorigène dans les systèmes modernes pour le froid, le conditionnement d'air et les pompes à chaleur. L'année 1990 est prise comme point de départ car c'est l'année de la relance par le professeur Gustav Lorentzen de la technologie frigorifique utilisant le CO₂. Cet article présente les résultats des études théoriques et expérimentales sur diverses applications du CO₂ et les travaux sur les composants des systèmes utilisant le CO₂.

LA RENAISSANCE DU DIOXYDE DE CARBONE

Dans les pays industrialisés, le Protocole de Montréal impose le remplacement des chlorofluorocarbures (CFC) dans les nouveaux systèmes frigorifiques, de conditionnement d'air et de pompes à chaleur. Les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) ne représentent qu'une solution provisoire jusqu'en 2020 à travers le monde, et, dans certains pays, ces frigorigènes devront être remplacés bien avant cette date. L'utilisation de ces fluides dans des systèmes existants sera limitée : ils seront remplacés par des frigorigènes moins nocifs pour l'environnement, c'est-à-dire par des fluides qui ne contiennent pas de chlore (ce dernier jouant un rôle dans la destruction de l'ozone stratosphérique). Les pays en développement suivront le même processus de remplacement dans le délai fixé. Une autre source d'inquiétude concernant l'impact des frigorigènes sur l'environnement tient à leur effet sur le réchauffement de la planète (global warming potential, GWP) qui a conduit à développer de nouveaux frigorigènes à faible GWP (des hydrofluorocarbures ou HFC) et on assiste maintenant à une renaissance de « vieux » frigorigènes

inorganiques tels que l'ammoniac, les hydrocarbures et le dioxyde de carbone.

Le dioxyde de carbone a été proposé comme frigorigène dans des systèmes de compression de vapeur pour la première fois par Alexander Twining qui a déposé un brevet britannique en 1850. Les pionniers de l'utilisation du dioxyde de carbone étaient Lowe (en 1869 aux USA¹) et Linde (en 1882 en Europe).² Le CO₂ fut surtout utilisé à bord des navires frigorifiques pendant les premières décennies du siècle (jusqu'à la deuxième guerre mondiale). Ensuite, les CFC et HFC l'ont peu à peu supplanté.

La renaissance du CO₂ comme frigorigène doit ses débuts à un brevet déposé en 1990³ par le professeur Gustav Lorentzen. Dans ce brevet, le professeur Lorentzen décrit le processus transcritique ainsi qu'un mécanisme de régulation de sa puissance. Lorentzen et Pettersen ont fait état ensuite de leurs études théoriques et expérimentales sur un système de conditionnement d'air automobile utilisant le CO₂^{4,7}. Ils concluaient que le CO₂, grâce à son effet de serre négligeable, était le fluide actif



idéal pour de tels systèmes, n'ayant pratiquement pas d'impact négatif sur l'environnement. Des études expérimentales ont montré que le coefficient de performance (COP) d'un système de conditionnement d'air automobile prototype utilisant le CO₂ se compare favorablement à un système traditionnel utilisant le R12, et permettrait d'obtenir un effet de serre équivalent total (Total Equivalent Warming Impact [TEWI]) moindre.

Poursuivant ses études, Lorentzen a conseillé l'utilisation de « frigorigènes naturels »⁸ avec le dioxyde de carbone, naturellement présent dans la biosphère, présentant un fort potentiel pour des systèmes économes et efficaces sur le plan énergétique et ainsi appelé à connaître très vite une renaissance.^{8,10}

La conférence de l'IMF sur « Efficacité énergétique en réfrigération / Impact sur l'effet de serre » qui a eu lieu à Gand (Belgique) en 1993 marqua le début de discussions menées par Lorentzen, lors de conférences internationales, sur l'utilisation du CO₂ dans diverses applications telles que des pompes à chaleur de grande taille^{11,12} (CO₂ seul ou avec d'autres frigorigènes, comme dans des études de Hesse et Kruse).¹³ Suite à la proposition de Lorentzen d'utiliser le CO₂ pur en système transcritique, ces derniers ont proposé son utilisation avec d'autres fluides actifs dans des systèmes à cascade, ou avec des solvants dans un système à absorption/compression ou comme composant dans des mélanges de frigorigènes. Pour des systèmes utilisés dans les supermarchés, ils conseillent l'utilisation d'un système à cascade avec ammoniac à l'étage supérieur et CO₂ à l'étage inférieur : ainsi, la pression ne dépasse pas la pression maximale des composants classiques. Leurs calculs ont prévu un COP meilleur que celui des systèmes traditionnels au R502. Ils ont également présenté des solvants pour le CO₂ utilisé dans des cycles à absorption/compression ; l'acétone paraît être le mieux adapté avec des COP comparables à ceux des systèmes employant des CFC. Pour les cycles à compression de vapeur utilisant les mélanges de CO₂/HFC, on a construit des bancs d'essai pour le conditionnement d'air automobile utilisant un mélange de CO₂ et de R152a et pour des meubles de vente au détail utilisant un mélange de CO₂ et de R134a. Les résultats ont montré que le CO₂, conjointement avec d'autres frigorigènes, peut être utilisé dans des cycles à compression de vapeur aux températures habituellement rencontrées dans le conditionnement d'air et le froid sans dépasser la pression limite de 25 bars.

La conférence de l'HF qui a eu lieu à Hanovre en 1994 sur les « Nouvelles applications des fluides actifs naturels en froid et conditionnement d'air » était la première consacrée exclusivement aux fluides actifs naturels. Lorentzen a ouvert cette conférence avec son exposé plénier : « Les frigorigènes naturels : une solution complète au problème des CFC et HCFC »¹⁴

qui est ensuite paru dans la *Revue internationale du froid*?⁵ Les communications sur le dioxyde de carbone ont constitué la pierre angulaire de cette conférence, particulièrement celles de Lorentzen¹⁶ sur « L'utilisation du CO₂ dans le froid commercial » et de ses chercheurs Neksâ¹⁷ (pompes à chaleur à compression de vapeur transcritique) et Pettersen et Skaugen¹⁸ (conditionnement d'air automobile au CO₂ à compression de vapeur transcritique). Lorentzen a présenté l'utilisation du cycle mono-étagé au CO₂ dans le froid commercial, fournissant à la fois des basses températures et de l'eau chaude, grâce au glissement de température dans le processus transcritique côté haute pression.

Neksâ a expliqué les vertus de pompes à chaleur utilisées pour la production d'eau chaude et d'autres applications dans lesquelles des glissements de température importants sont désirables. Il a considéré que l'utilisation du CO₂ s'avère particulièrement efficace dans des conditions de travail rudes avec des sources de chaleur à température basse et production de températures élevées.

Pettersen et Skaugen ont approfondi le concept initial du cycle breveté ; leurs mesures et simulations leur ont permis de dire que pour obtenir un COP maximal, la pression côté haute pression devrait suivre de façon quasi-linéaire la température à la sortie du refroidisseur. En ce qui concerne la régulation de la puissance, ces auteurs ont constaté que la régulation à partir de la pression haute ne paraissait pas être une option prometteuse pour l'augmenter ou pour la réduire en charge partielle. Ils ont conseillé l'utilisation des systèmes classiques de régulation des compresseurs.

D'autres chercheurs ont présenté des études sur le dioxyde de carbone : Hesse et Amemann¹⁹ sur des mélanges CO₂/hydrocarbures, Enkemann et Arnemann²⁰ sur le CO₂ utilisé comme frigoporteur, et Quack et Kraus²¹ sur son usage comme frigorigène dans les wagons frigorifiques et le conditionnement d'air ferroviaire.

A partir de leurs études théoriques, Hesse et Arnemann ont conclu que les mélanges dioxyde de carbone/hydrocarbures peuvent être utilisés comme solution de remplacement de frigorigènes : ils sont solubles l'un dans l'autre, et on peut déterminer leurs propriétés grâce à des paramètres d'interaction connus. L'inflammabilité peut être réduite mais ne peut être totalement éliminée que si la quantité de dioxyde de carbone utilisée est très importante.

Enkemann and Arnemann ont conclu, à partir de leurs études expérimentales, que le CO₂ est un frigoporteur idéal en froid commercial, car on peut l'utiliser avec des composants traditionnels et les différences de température et les chutes de pression sont nettement inférieures à celles rencontrées pour des frigoporteurs conventionnels.



Quack et Kraus ont montré qu'avec un système à expansion combiné avec un cycle adapté, on obtient une amélioration remarquable du COP là où le refroidisseur de gaz ne peut être refroidi qu'à des températures ambiantes supérieures à 45°C. Ils ont proposé un détendeur avec compresseur à piston libre, assisté par un autre compresseur bi-étagé.

D'autres communications sur le dioxyde de carbone ont été présentées à la conférence à Padoue (Italie) en 1994, et au Congrès international du froid de THF à la Haye (Pays-Bas) en 1995.

A la conférence de Padoue, Lorentzen a présenté une communication sur « Les frigorigènes naturels, une solution totale »²² et Halozan et al²³ ont présenté « Le propane et le CO₂ : deux solutions de remplacement naturelles ». Ils ont mis l'accent sur l'utilisation du CO₂ pour la production d'eau chaude, le chauffage et le chauffage urbain ; ils ont également souligné comment le COP est fonction de la température à l'entrée du puits de chaleur. Pour résoudre le problème des pressions élevées dans les cycles transcritiques (allant jusqu'à 150 bars), ils proposent d'adapter les composants de systèmes hydrauliques et soulignent que les compresseurs doivent être plus efficaces que ceux habituellement utilisés du fait de rapport de pression plus bas. Ces auteurs ont ensuite souligné que des échangeurs de chaleur et des tubes de petite taille peuvent être utilisés grâce à la densité élevée du CO₂ à pression élevée. Pettersen²⁴ a publié les résultats obtenus. A la conférence de la Haye, Groll²⁵ a fait état de ses études sur un cycle à compression absorption utilisant le couple actif CO₂/acétone. Il a comparé des simulations aux résultats expérimentaux et montré qu'on pouvait atteindre une précision de 2,5 %, ce qui indique que des simulations peuvent être utilisées pour les applications frigorifiques et de conditionnement d'air. Dans les deux cas, le COP maximal a pu être prédit comme étant supérieur à celui du cycle à compression de vapeur si la pression de l'installation est augmentée à 5 MPa.

A la conférence sur les solutions de remplacement des CFC et des Halons à Washington en 1995, Köhler²⁶ a exposé l'utilisation du dioxyde de carbone comme « Frigorigène pour le conditionnement d'air des véhicules et son utilisation dans le conditionnement d'air des autobus ». Aux Conférences de Purdue sur les compresseurs et le froid en 1996, Robinson and Groll ont présenté des applications du cycle transcritique utilisant le CO₂.²⁷ Kruse et Suss ont donné un rapport sur leur recherche sur le comportement des compresseurs frigorifiques utilisant le CO₂ comme frigorigène.²⁸ Ils ont montré qu'il faut adapter les détendeurs à la pression. Fagerli a exposé son expérience sur le développement d'un compresseur hermétique au CO₂²⁹ basé sur un compresseur hermétique de petite taille au R22. Il a constaté un COP bas, montrant la nécessité d'optimiser le compresseur au CO₂.

La floraison de communications sur l'usage du dioxyde de carbone et son comportement dans des systèmes et vis-à-vis des composants a été très marquée lors de la deuxième conférence sur les Fluides actifs naturels à Aarhus (Danemark) en 1996. Un an plus tard, un atelier IIF/IEA sur le CO₂ a eu lieu à Trondheim (Norvège) ; cet atelier s'intitulait « Technologies du CO₂ utilisées dans les pompes à chaleur et le conditionnement d'air ». Une autre conférence de THF sur les « Pompes à chaleur, maîtrise de l'énergie et réchauffement de la planète » a eu lieu en 1997 à Linz (Autriche) ; elle a été suivie par une troisième (également de THF) consacrée aux « Fluides actifs naturels » en 1998 à Oslo (Norvège) : cette dernière était la première à s'intituler « Conférence Gustav Lorentzen. »

Pour faciliter la revue de la littérature, cet article sera divisé en parties correspondant aux applications mentionnées ci-dessus et aux composants des systèmes. L'expérience accumulée dans l'utilisation du CO₂ dans diverses applications a été présentée par Tyree³⁰ à l'Atelier sur le CO₂ à Trondheim.

TRANSPORT FRIGORIFIQUE ET CONDITIONNEMENT D'AIR AUTOMOBILE

Suite aux travaux de Lorentzen and Pettersen sur l'utilisation du CO₂ comme frigorigène dans les systèmes de conditionnement d'air automobiles qui montraient que de tels systèmes peuvent être favorablement comparés aux systèmes traditionnels utilisant du R12 ou du R134a en termes de puissance, d'énergie, de coût d'installation, de poids et de dimensions, d'autres communications émanant de l'industrie automobile ont été présentées à des conférences ultérieures. Faisant suite à sa communication de 1995, Köhler en a présenté une en 1996 à la conférence sur les technologies de protection de l'ozone stratosphérique à Washington sur le conditionnement d'air utilisant le dioxyde de carbone comme frigorigène dans un autobus.³¹ En 1995, il a présenté un prototype avec compresseur et échangeur de chaleur, puis en 1996 les résultats obtenus avec ce système dans un autobus. Par rapport au R134a, le rendement était inférieur d'approximativement 25 %. Le poids et le volume étaient similaires à ceux de systèmes au R134a mais avec un compresseur nettement plus petit. A la même conférence, Wertenbach³² a présenté un rapport sur le projet européen RACE impliquant cinq constructeurs automobiles importants ainsi que quatre fabricants de composants ; il a présenté les résultats d'essais préliminaires et a souligné la nécessité de mener d'autres études sur le poids comme sur le rendement, car le COP mesuré était inférieur de 15 % à celui du R134a. En présentant la synthèse des premières études expérimentales, il a montré qu'il est faisable d'utiliser le CO₂ dans le conditionnement d'air automobile. Les résultats initiaux de ce projet RACE ont révélé des inconvénients mineurs du COP du



processus utilisant le CO₂, et un certain nombre de questions concernant la sécurité, le comportement dynamique, la réduction du poids, le coût de production et la fiabilité restent à résoudre.^{32,33} Bullard et Hrnjak³⁴ ont exposé leurs travaux sur les cycles à CO₂ et avec HFC dans le conditionnement d'air automobile et les pompes à chaleur résidentielles, et comme Yin et al³⁵ ont comparé de façon expérimentale et par simulation, des cycles au CO₂ transcritique avec ceux au R134a et au R410A. Les résultats d'études expérimentales sur les systèmes de conditionnement d'air automobile ont été présentés par McEnaney et al.³⁶ Ces auteurs ont conclu qu'au ralenti, le système avait une puissance pratiquement équivalente pour des températures très élevées, mais que son COP était inférieur de 10 % à celui du système de référence, tandis qu'à des températures ambiantes inférieures à 40°C, le COP du système utilisant le CO₂ était supérieur de 40 % ou davantage à celui utilisant le R134a.³⁶ Wertenbach et Caesar³⁷ et Gentner^{38,39} ont effectué des études axées sur l'évaluation de l'impact sur l'environnement d'un système de conditionnement d'air automobile utilisant du CO₂, comparé à l'impact d'un système utilisant du R134a. Ils ont conclu que les systèmes utilisant le CO₂ ont un fort potentiel en termes de diminution de l'effet de serre dû aux émissions des véhicules, sans diminuer pour autant le confort des occupants mais que leur utilisation supposait qu'ils soient mondialement acceptés. Hirata and Fujiwara⁴⁰ ont comparé du point de vue de l'environnement des systèmes de conditionnement d'air automobile utilisant du R134a, du propane ou du dioxyde de carbone. Ils ont conclu que le CO₂ ne possédait qu'une faible supériorité en ce qui concerne son TEWI, car le potentiel d'amélioration du rendement des compresseurs utilisant le R134a est plus fort.

Une retombée positive de l'utilisation du CO₂ dans les systèmes de conditionnement d'air automobile réside en la possibilité de chauffage de l'habacle grâce aux températures assez élevées atteintes dans le processus transcritique. Hafner et al⁴¹ ont fait une proposition similaire. Des résultats de simulations indiquent que les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation utilisant le CO₂ sont une solution complète et rentable pour les véhicules modernes, car ces systèmes ont un COP élevé et sont en mesure de rafraîchir ou de chauffer quelles que soient les conditions climatiques.

Holst⁴² a donné un rapport complet sur les possibilités d'études expérimentales sur les composants des systèmes de conditionnement d'air automobiles utilisant le CO₂.

En dehors de l'utilisation du CO₂ dans les systèmes de conditionnement d'air, certains chercheurs, en particulier Köhler et al mentionnés ci-dessus, ont étudié l'utilisation du CO₂ dans le conditionnement d'air d'autobus. Dans une étude ultérieure, Köhler et al⁴³ ont présenté des mesures sur un tel système et sur des composants tels qu'un compresseur de

conception nouvelle. Avec leur prototype, ils ont obtenu un COP comparable à ceux obtenus avec des systèmes traditionnels ou même meilleur. En outre, le rendement du compresseur s'est avéré extrêmement élevé.⁴⁴ Mayer⁴⁵ a comparé le prototype utilisant du CO₂ avec des résultats systèmes traditionnels en s'appuyant sur les résultats de Köhler et al ; il a conclu que les systèmes au CO₂ devraient être fabriqués dans 8 à 10 ans (à partir de 1997).

Une autre application du CO₂ est le conditionnement d'air des cabines de locomotives. Grohmann and Wobst⁴⁶ ont décrit un prototype au CO₂ d'une puissance de 5 kW avec un COP de 1,5 à 2,5. Cette étude, axée sur l'influence de la charge côté haute pression, a montré que ce facteur exerçait peu d'influence, ce qui montre que les systèmes utilisant le CO₂ peuvent fonctionner sans régulation de la haute pression et à charge constante. Par ailleurs, la régulation de la haute pression n'est pas favorable à la régulation de la puissance qu'elle ne permet de moduler que de 10 % à 20 %. Donc, on peut concevoir des systèmes au CO₂ avec les composants usuels avec évaporateur à détente sèche sans inconvénient énergétique, et avec les avantages de la régulation de la puissance, l'usage optimal de l'évaporateur, et un retour d'huile facile. L'intégration d'un échangeur de chaleur interne procure des avantages énergétiques.

Une application totalement différente du CO₂ concerne les conteneurs maritimes frigorifiques. Kauffeld,⁴⁷ se basant sur une simulation, a considéré que les systèmes utilisant le dioxyde de carbone pourront remplacer des systèmes utilisant le R134a si on tient compte des avantages d'un meilleur rendement du compresseur et de l'influence réduite des chutes de pression dans les échangeurs de chaleur.

POMPES A CHALEUR

Suite aux propositions de Lorentzen, et de Protsenko et Starshinine⁴⁸ concernant l'utilisation du CO₂ transcritique comme fluide actif inoffensif pour l'environnement dans les pompes à chaleur, et celle de Halozan⁴⁹ d'utiliser le fort glissement de température du processus transcritique du CO₂ du côté chaud, cette application a fait l'objet d'une évaluation dans un autre projet européen, le COHEPS, avec la participation d'instituts de recherche ainsi que de l'industrie autrichienne, belge, allemande et norvégienne. Des communications sur ce projet de recherche mené en coopération ont été présentées à l'Atelier sur le CO₂ à Trondheim en 1997 et aux conférences de l'IIF de Linz (en 1997) et d'Oslo (en 1998), ainsi qu'aux conférences de Purdue en 1998. Enkemann et Kruse⁵⁰ ont rendu compte de leur partie du projet, le développement d'une pompe à chaleur utilisant le CO₂ pour la conversion de systèmes hydroniques de production d'eau chaude ; ils ont prévu un facteur de performance saisonnière de 3,2 pour Berlin avec un débit d'eau réduit de moitié conduisant à une différence de température plus importante entre



l'arrivée et la sortie. En ce qui concerne la régulation de la puissance, Enkemann et Kruse⁵¹ ont présenté le couplage d'un compresseur avec commande de puissance et un régulateur de vitesse à l'inverseur. Neksâ et al ont présenté un prototype de pompe à chaleur à CO₂ et leurs résultats expérimentaux.⁵²⁻⁵⁵ Ils ont montré que le cycle à CO₂ convient parfaitement aux pompes à chaleur utilisées pour produire de l'eau chaude. Ils ont obtenu un COP de 4,3 lorsque l'eau était chauffée de 9°C à 60°C, avec une température d'évaporation de 0°C. Ce système permet d'obtenir des températures jusqu'à 90°C. Rieberer et al^{56,57} ont également montré que des COP supérieurs à 5 peuvent être obtenus en chauffant de l'eau de 10°C à 60°C. Cependant, le COP baisse de façon significative si la température du gaz à l'entrée de l'échangeur de chaleur augmente, ce qui amène à déconseiller le réchauffage de l'eau chaude refroidie par la circulation et à cause de l'isolation. Kaspar et Halozan⁵⁸ ont également étudié ce système. Leurs résultats ont été confirmés par d'autres auteurs, y compris Hwang et al^{59,60} qui ont étudié une pompe à chaleur utilisée pour produire de l'eau chaude, montrant que ce système à CO₂ permettait d'obtenir un COP supérieur de 10 % à celui d'un système au R22. Chumak et al⁶¹ sont arrivés aux mêmes conclusions. Par ailleurs, Quack⁶² et Heyl et al^{63,64} ont étudié de façon expérimentale l'application du CO₂ dans des pompes à chaleur avec un glissement de température important. Pour un système utilisant le CO₂ et qui a un rendement de 18 à 26 kW, ils ont mesuré des COP allant de 3,5 à 4 en chauffant de l'eau de 10 à 60°C, mais seulement dans des conditions favorables de fonctionnement du compresseur (avec un rapport de compression bas). Utilisant une pompe à chaleur expérimentale, Saikawa et al^{65,66} ont étudié le comportement dynamique et la régulation des pompes à chaleur utilisées en chauffage d'eau. Ils conseillent de les réguler avec un détendeur électronique et un compresseur avec convertisseur.

Liao et Jakobsen⁶⁷ ont établi une équation qui permet de calculer la haute pression optimale en fonction de la température du refroidisseur de gaz, tandis que Grohmann et Wobst⁴⁶ ont étudié une régulation spécifique de la haute pression et ont conclu que l'amélioration du COP était faible.

Une simulation dynamique de pompe à chaleur au dioxyde de carbone a été développée par Skaugen et al.⁵⁸ Il existe une bonne concordance entre les prédictions du modèle et les résultats expérimentaux.

Rieberer et al^{69,70} ont étudié l'application d'une pompe à chaleur au CO₂ pour une maison individuelle à faible consommation énergétique et à ventilation régulée. Cette simulation leur permet de prédire un COP de 5 à 10.

Bullock⁷¹ a étudié de façon théorique la performance des pompes à chaleur en chauffage et refroidissement. Il a conclu qu'il faudrait améliorer de façon significative les rendements actuels des

compresseurs et des échangeurs de chaleur afin de concurrencer les systèmes actuels. Pettersen et al⁷² ainsi qu'Aarliien et al^{73,74} ont comparé des pompes à chaleur au CO₂ à des installations du commerce au R22. Le rendement du système utilisant le CO₂ pourrait être amélioré. Aarliien a obtenu un COP en chauffage avec CO₂ de 3 % à 14 % supérieur à celui de systèmes au R22, mais le COP refroidissement était inférieur de 0,5 % à 14 %.

Yarrall et al⁷⁵ ont utilisé le froid et le chaud simultanément. Ils ont construit un système avec pompe à chaleur pour l'industrie alimentaire comprenant production de froid à 0°C et chauffage d'eau à 90°C ; ils ont obtenu un COP de 5.

Steimle⁷⁶ et Schmidt et al⁷⁷ prévoient l'utilisation des pompes à chaleur au CO₂ pour le séchage. En termes de COP, surtout quand on a besoin de températures au-dessus de 70°C, ce système présente des avantages par rapport au R134a.

LE FROID COMMERCIAL

Examinant l'utilisation du CO₂ dans des systèmes frigorifiques commerciaux, Infante Ferreira et Boukens⁷⁸ ont mené des études théoriques sur l'utilisation du CO₂ comme caloporteur ou comme frigorigène dans un système à cascade. Infante Ferreira et Soesanto⁷⁹ ont comparé les COP expérimentalement et théoriquement. Dans une autre étude, Infante Ferreira⁸⁰ a étudié les pertes exergétiques dans des systèmes de supermarché utilisant le CO₂ comme frigorigène. Par rapport aux systèmes utilisant le R22, les pertes sont plus élevées au niveau du refroidisseur à gaz et l'économiseur, mais le rendement accru du compresseur compense ces pertes. Brendeng⁸¹ a également considéré qu'un système à cascade utilisant le NH₃ et le CO₂ est plus économique qu'une installation bi-étagée à ammoniac.

Eggen et Aflekt⁸² ont mené une étude théorique sur une installation commerciale employant l'ammoniac et le CO₂ comme fluides actifs, dans trois configurations : avec le CO₂ comme caloporteur, avec le CO₂ comme fluide actif à basse température dans un système à cascade, ou avec le CO₂ comme seul frigorigène. La consommation énergétique est pratiquement identique pour les deux systèmes NH₃ZCO₂, mais le volume balayé dans le compresseur au CO₂ représente seulement 10 % de celui du compresseur basse pression à l'ammoniac. Les systèmes frigorifiques NH₃ZCO₂ à cascade sont donc très prometteurs, pourvu que les compresseurs et autres composants pour le CO₂ soient disponibles. Par rapport au R404A, la performance saisonnière de tous ces systèmes avec refroidissement par air est similaire. Si on examine le système à deux étages au CO₂ en refroidissement à l'eau, une réduction de 10 % de la consommation d'énergie peut être obtenue, car ce



système utilise seulement 10 % de la quantité d'eau requise par des systèmes conventionnels ; ce système peut donc être utilisé pour produire de l'eau chaude.

Une tentative similaire d'utilisation du CO₂ comme frigoporteur est décrite par Neksâ et al⁸³ qui ont étudié deux systèmes pour le refroidissement d'eau et le conditionnement d'air. Par rapport aux systèmes conventionnels utilisant la récupération directe de chaleur pour la production d'eau chaude et le chauffage des locaux, le système de refroidissement d'eau peut diminuer considérablement la consommation énergétique ; le système refroidi à l'air permet de récupérer directement la chaleur lorsqu'on a besoin de chauffage dans un centre commercial. C'est un système qui peut concurrencer des systèmes classiques en termes de consommation énergétique. Hesse⁸⁴ a étudié le CO₂ en tant que frigoporteur ; il l'a comparé aux saumures conventionnelles.

Rolfsmann⁸⁵ a examiné l'utilisation du CO₂ comme frigoporteur dans un supermarché où ce système a fonctionné sans problèmes. Zhang et al⁸⁶ ont analysé de façon théorique l'utilisation du CO₂ pour remplacer le R502 dans des systèmes commerciaux à basse température et des systèmes de liquéfaction de CO₂. Park et Kim⁸⁷ ont exposé les résultats obtenus avec un système à cascade utilisant le CO₂ et le R134a. Ils ont trouvé que les résultats expérimentaux et théoriques différaient et que le COP global du prototype était relativement bas.

APPLICATIONS MILITAIRES

En dehors de son utilisation dans les applications civiles, récemment le CO₂ a suscité de l'intérêt chez les militaires, car il possède une puissance frigorifique (par unité de volume) extrêmement élevée, ce qui permet de développer des systèmes très compacts.^{88,89} De plus, puisqu'il ne nécessite pas de récupération, les opérations d'entretien sont simplifiées.

COMPOSANTS POUR DES SYSTÈMES UTILISANT LE CO₂

Le compresseur

Par rapport aux systèmes employant des frigorigènes classiques, des pressions beaucoup plus élevées sont atteintes lorsqu'on utilise le CO₂ comme frigorigène dans un système à compression. Donc, il faut développer de nouveaux compresseurs ou modifier les compresseurs existants afin de diminuer le diamètre du cylindre en tenant compte de la puissance volumétrique élevée du CO₂. Lorsqu'on modifie les compresseurs existants, il faut que les forces créées par la pression du cylindre restent quasiment identiques afin de continuer à utiliser les mécanismes d'entraînement habituels tels l'arbre-manivelle, les bielles et les paliers. Avec l'utilisation des

compresseurs hermétiques, le moteur électrique pourrait être pratiquement de la même taille, tandis que la coque extérieure devrait être renforcée à cause de la pression beaucoup plus élevée. Adolph⁹⁰ a été le premier à mettre en oeuvre une telle conception : il a adapté un compresseur au R22 pour utiliser le CO₂, en employant l'ancien piston comme coulisseau de crosse entraînant un autre piston de diamètre plus réduit et un cylindre de diamètre adapté ainsi que des soupapes de refoulement et d'aspiration adaptées. Une modification similaire a été effectuée par Fagerli^{29,91} qui a adapté un compresseur hermétique encore plus petit ; il n'a pas utilisé un coulisseau de crosse, mais a employé un cylindre et un piston de plus petit diamètre. Kôhler et al²⁶ ont décrit une adaptation similaire de compresseurs de type ouvert ; ces auteurs ont rencontré des difficultés au niveau des soupapes de refoulement qui engendraient des chutes de pression trop importantes. Pour régler ce problème, les auteurs ont développé un deuxième modèle adapté à l'utilisation de soupapes annulaires.³¹ Dans un troisième stade de développement, un modèle avec une conception encore plus optimisée et un carter en aluminium est en cours de développement.⁴⁴ La réduction des diamètres du piston et du cylindre donne lieu à des contraintes de conception en ce qui concerne l'espace disponible pour un axe de piston là où les forces du piston agissent maintenant sur un roulement de très petite taille. Donc, davantage d'optimisation de cet élément est nécessaire.

La conception de nouveaux compresseurs a été effectuée pour le conditionnement d'air automobile, basée sur l'expérience acquise avec des pressions élevées dans des installations hydrauliques. A partir de cette expérience dans le projet européen RACE, un compresseur à plateau oscillant a été adapté pour comprimer le CO₂ avec modulation de l'angle du plateau oscillant,⁹² tandis qu'au Japon un compresseur bi-étagé basé sur la conception à came plate a été développé.⁹³ Süss et Kruse^{94,97} ont mené des études approfondies sur les compresseurs de type ouvert et à plateau oscillant dans le cadre du projet européen RACE et ont également étudié la conception optimale au vu de la régulation de puissance. Dans sa thèse de doctorat, Süss⁹⁸ a résumé des résultats de recherches théoriques et expérimentales sur ces compresseurs ; il a montré que les propriétés du CO₂ en tant que fluide exercent des effets plutôt favorables sur la performance énergétique d'un compresseur utilisant le CO₂, grâce au rapport de compression faible.

En raison de la différence de pression importante, les fuites exercent une assez forte influence. Pour cette raison, les compresseurs avec une bonne étanchéité et un jeu réduit aux fuites sont les mieux adaptés à la compression du CO₂. A cet égard, Süss a montré que les compresseurs à piston avec un nombre réduit de cylindres conviennent mieux que les compresseurs rotatifs. Par ailleurs, les compresseurs utilisant le CO₂ devraient avoir un rapport course sur alésage plutôt plus grand comparé à celui des compresseurs habituels pour HFC. En ce qui concerne le mécanisme



d'entraînement, le coussinet d'axe de piston devient critique eu égard aux forces qui interviennent. Fagerli^{29,90,99} a publié ses résultats concernant le développement et les études expérimentales sur le compresseur hermétique décrit ci-dessus. Dans d'autres publications,^{100,101} il a soulevé la possibilité d'utiliser le concept du compresseur à spirale pour le CO₂ et a indiqué que les pressions ne posent pas de problèmes au niveau de la conception ; simplement, les études des tolérances paraissent être nécessaires afin de garder les fuites internes à un niveau acceptable.

Jorgensen⁹² a fait part de l'optimisation du compresseur à plateau oscillant ci-dessus par autorégulation de la puissance en fonction de la pression de l'aspiration. Dans son article, il propose une simulation afin de calculer les angles d'inclinaison optimaux.

Hwang et Radermacher^{60,102} ont mis au point un prototype de compresseur hermétique. Leurs études expérimentales ont montré que les fuites internes doivent être étroitement surveillées et que la conception doit être davantage optimisée. Braendgaard¹⁰³ a publié des résultats d'essais effectués sur un compresseur industriel employant un système à cascade utilisant le CO₂ et le NH₃ ; il a obtenu un rendement beaucoup plus élevé que celui obtenu avec le R22 et le NH₃. Il a également étudié le processus de sélection du lubrifiant.

Lubrifiants pour compresseurs

Kraus¹⁰⁴ a mené une étude sur les lubrifiants pour compresseurs ; il a conclu en faveur d'une bonne solubilité du lubrifiant dans le frigorigène. Il a examiné la solubilité des huiles de type alkylbenzène ou polyolester dans le CO₂ et a conclu que la solubilité des huiles de type alkylbenzène était plutôt faible, tandis que la solubilité des huiles polyolesters était étroitement liée à la concentration, à la pression et à la température. Hesse et Spauschus¹⁰⁵ ont également étudié les lubrifiants adaptés aux systèmes au CO₂. Wertenbach et al¹⁰⁶ ont trouvé que les huiles polyalphaoléfine étaient très peu solubles dans le CO₂. Fahl¹⁰⁷ a fait remarquer que des pressions élevées, telles que celles rencontrées avec le CO₂, pourraient engendrer une solubilité trop élevée, donnant lieu à une forte réduction de la viscosité du mélange ; à cet égard, il a examiné les propriétés de divers types d'huile. Un autre aspect à prendre en compte est la réaction chimique entre le lubrifiant et le CO₂. Sur ce point, Broesby-Olsen¹⁰⁸ n'a rencontré que des problèmes mineurs en comparaison avec les systèmes utilisant le CFC.

Echangeurs de chaleur

Dans ce domaine, la recherche actuelle est surtout axée sur le transfert de chaleur et les chutes de pression.

Bredesen et Aflekt¹⁰⁹ et Frivik et Pettersen¹¹⁰ ont présenté le développement d'échangeurs de chaleur à

haute et à basse pression pour le CO₂ ; ils ont trouvé que le rendement et le poids de l'installation étaient semblables à ceux des installations au R134a. D'autres études ont été menées sur de nouveaux échangeurs de chaleur avec des microtubes d'un diamètre de 0,8 mm qui présentent des avantages considérables en termes de poids et de performance énergétique. Bredesen et al¹¹¹ ont montré que les coefficients de transfert de chaleur obtenus sont supérieurs à ceux prévus théoriquement. Comme la pression dans les systèmes au CO₂ est élevée, l'influence des chutes de pression dans les échangeurs de chaleur sur la performance peut être considérée comme négligeable.

Pettersen et al¹¹² ont effectué une étude expérimentale et théorique sur divers types d'échangeurs pour CO₂. Ils ont établi que les échangeurs à microtubes avaient la meilleure performance et que, comparés aux échangeurs pour HFC, les échangeurs pour CO₂ présentaient des avantages en termes de performance énergétique, de poids et de taille.

Robinson et al^{113,114} ont étudié les coefficients de transfert de chaleur dans des échangeurs pour CO₂. Ils ont montré qu'avec des systèmes au CO₂, on peut atteindre des réductions de 50 % du volume et du poids par rapport aux installations au R22.

Knudsen et Jensen¹¹⁵ ont décrit les moyens d'exprimer les coefficients de transfert de chaleur et les chutes de pression lors de l'évaporation du CO₂ avec une équation de Shah modifiée.¹¹⁶ Ils ont trouvé qu'un facteur constant de 1,9 permet de rapprocher leurs résultats expérimentaux aux prévisions obtenues en utilisant l'équation de Shah.

Hwang et al^{117,118} ont obtenu des résultats similaires dans une étude théorique et expérimentale sur des échangeurs de chaleur au CO₂. Reprenant des données expérimentales sur les coefficients de transfert de chaleur, ils ont établi diverses formules permettant de décrire le transfert de chaleur à l'intérieur des échangeurs de chaleur, et ont obtenu les meilleurs résultats avec les équations récentes de Bennett et Chen.¹¹⁹

Rieberer et Halozan¹²⁰ ont étudié l'optimisation d'un échangeur de chaleur au CO₂ et son usage dans des pompes à chaleur utilisées pour la production d'eau chaude. Ils ont trouvé des coefficients de transfert de chaleur relativement élevés mais aussi certains problèmes au niveau de la régulation de l'échangeur de chaleur basse pression. En particulier, ils ont souligné des problèmes d'assèchement de l'évaporateur.

Schönfeld et Kraus¹²¹ ont décrit un modèle de simulation dynamique de la performance dynamique d'un échangeur à contre-courant pour CO₂ supercritique.

Hashimoto et Saikawa¹²² ont mesuré les coefficients de transfert de chaleur pendant la phase de refroidissement du gaz proche des régions transcritiques.

Systèmes de détente

Les procédés utilisant le CO₂ peuvent être améliorés par l'utilisation d'un système à détente adapté au lieu d'un détendeur lorsque la température à la sortie du refroidisseur de gaz est assez élevée. Kraus et Quack¹²³ en particulier ont étudié cette technologie ; ils conseillent l'utilisation d'un détendeur à piston libre. L'utilisation d'un tel système de détente-compression permettrait d'obtenir (selon les études théoriques) un COP comparable à ceux des cycles à HFC. Heyl et al¹²⁴ ont fait un pas de plus dans cette direction ; ils prédisent, pour le système de détente mentionné ci-dessus, un transfert de 78 % de l'énergie d'expansion pour assurer la compression du gaz basse pression.

Bullard et Hrnjak³⁴ et Robinson et Groll¹²⁵ ont étudié la possibilité d'utiliser une turbine de détente. Ils estiment qu'il faut éviter d'utiliser un tel système avec un échangeur de chaleur interne dans un cycle à CO₂, car l'énergie de la détente à des températures basses est assez faible.

Lorsque la température à la sortie de l'échangeur de chaleur haute pression est assez élevée, par exemple lorsque le gaz est refroidi par le milieu ambiant, comme en conditionnement d'air automobile, un système de compression avec détente pourrait améliorer le rendement énergétique du système. Une option prometteuse est d'utiliser le principe des moteurs hydrauliques (légèrement adaptés) pour la détente. On a étudié un système mixte à détente-compression basé sur ce système (avec un mécanisme soit à plateau oscillant soit à came plate) pour le conditionnement d'air automobile.¹²⁶

CONCLUSION

Depuis que Lorentzen a déclenché la renaissance du CO₂ comme frigorigène, on a consacré beaucoup de recherche à ce thème. La première utilisation du CO₂ concernait le conditionnement d'air automobile:

REFERENCES

1. Donaldson B, Nagengast, B. *Heat and Cold, Mastering of Great Indoors* p. 38, ASHRAE 1994.
2. Plank R. *Handbuch der Kältetechnik* I, p. 65, Springer Verlag 1954.
3. Lorentzen G. Trans-critical vapor compression cycle device. Patent WO 90/07683, 1990.
4. Lorentzen G, Pettersen J. New possibilities for non-CFC refrigeration. *Proc Int Symp ReMg NTH*, Trondheim, Norway, 1992, p. 147.
5. Lorentzen G, Pettersen J. A new, efficient and environmentally benign system for car air-conditioning, *Int J Refr* 1993; 16(1):4.
6. Pettersen J, Lorentzen, G. A new, efficient and environmentally benign system for automobile air conditioning. STF11 A93011, *SINTEF Refrigeration Engineering*, 1993.
7. Pettersen J. An efficient new automobile air-conditioning system based on CO₂ vapor compression. *ASHRAE Transactions: Symposia*, OR-94-5-3, 1994.
8. Lorentzen G. Application of "natural" fluids. STF11 A93032, *SINTEF Refrigeration Engineering*, 1993.

énormément de travail de développement a été effectué dans ce domaine, particulièrement dans le cadre du projet européen RACE. Ce projet a été réalisé avec succès et les prototypes fonctionnent bien ; il reste quelques questions concernant la sécurité, le comportement dynamique, la diminution du poids, le coût et la fiabilité. Si on apporte des réponses à ces questions, de nouveaux systèmes de conditionnement d'air automobiles utilisant le CO₂ seront adoptés partout si on arrive à les faire agréer au niveau mondial.

Le deuxième secteur dans lequel l'utilisation du CO₂ comme frigorigène est très prometteur est celui des pompes à chaleur, surtout là où on peut profiter du glissement à haute température dans la zone transcritique, par exemple dans la production d'eau chaude sanitaire et dans d'autres applications où un tel glissement est utile. L'obtention de températures élevées sans inconvénients énergétiques particuliers, par exemple dans la région biphasique des frigorigènes traditionnels, rend bénéfique l'utilisation du CO₂, permettant d'obtenir les températures élevées nécessaires afin de convertir les systèmes hydroniques d'immeubles existants. Dans ce contexte, le CO₂ offre des possibilités intéressantes aux températures usuelles de tels systèmes. En outre, le séchage par pompe à chaleur au CO₂ est prometteur.

Divers prototypes ont été réalisés et utilisés avec succès dans le cadre du projet européen COHEPS.

De nombreuses études indiquent que le rendement énergétique d'un système au CO₂ peut être supérieur à celui de technologies conventionnelles, si on tient compte des propriétés propres au CO₂. Donc, on a effectué des recherches approfondies afin de développer des composants adaptés au CO₂; jusqu'ici les efforts de recherche étaient principalement axés sur les compresseurs et les échangeurs de chaleur. D'autres études sont nécessaires pour que le CO₂ puisse acquérir la reconnaissance qu'il mérite en tant que fluide actif dans la technologie frigorifique.

suite *



Conférence HF de Nantes

Le symposium HF de Nantes sur le thème « *Hygiène, qualité et sécurité dans la chaîne du froid et le conditionnement d'air* » a réuni, du 16 au 18 septembre 1998, 130 participants appartenant à 16 pays. Ce symposium a été parfaitement organisé par la Cité des Congrès de Nantes avec le concours actif de *Jean-François Kerroc'h*, Directeur du Marketing et Développement de la Cité des Congrès et de *Jacques Tirel* Vice-Président Honoraire de la Commission E1, Conditionnement d'air, de l'IIF.

Plusieurs organismes nationaux (Association Française du Froid, représentée par son Président *Michel Barth*, Conseil National du Froid représenté par son Président, *Roland Violot*) et locaux (Ecole Nationale Vétérinaire de Nantes, IFREMER, ENITIAA...) ont contribué à la réussite de cet événement.

Placé sous l'égide des commissions C2 (Sciences et Technologie alimentaires) et E1 (Conditionnement d'air) de l'IIF, ce symposium a vu la présentation de 46 exposés oraux et de 9 posters.

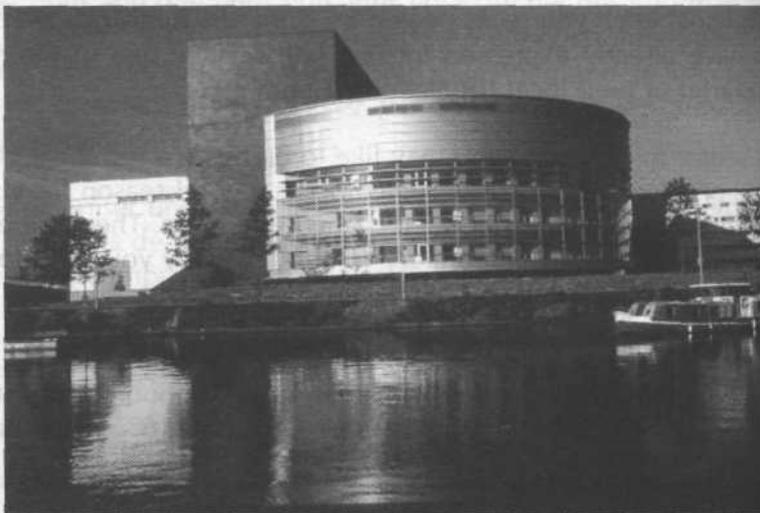
L'ouverture du symposium a été faite par *Madame Marion Guillou*, Directrice Générale de l'Alimentation au Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, qui a fait une présentation remarquable sur "Le froid et ses conséquences sur l'agro-alimentaire" et par *Louis Lucas*, Directeur de l'HF, qui a adressé des paroles de bienvenue aux participants.

Il est revenu au *Docteur Leif Begh-Sorensen*, Président de la Commission C2, de faire une conférence plénière sur le thème "Durée de conservation et sécurité des produits frais et surgelés", puis à *François Falconnet*, Secrétaire Général du SYNAFAP de présenter le thème de la traçabilité des produits qui est particulièrement d'actualité.

Le *Docteur Leif Begh-Sorensen* et le *Professeur Peter Novak*, Président de la Commission E1, ont tiré les conclusions de cette réunion particulièrement riche par la qualité des papiers présentés. Nul doute que les actes du symposium qui seront publiés dès que le processus de validation aura été achevé, intéresseront de nombreux lecteurs du *Bulletin* de l'IIF.

Au plan des activités dites sociales une visite du Musée des Beaux-Arts de Nantes a précédé le dîner de gala qui s'est tenu dans le splendide hall d'entrée de ce musée, copie de la salle Renaissance qui abrite les sculptures gréco-romaines du Musée du Louvre.

En marge du Symposium s'est tenue une réunion de la sous-commission DI de THF (Meubles frigorifiques de vente) présidée par *Sietze van der Sluis*, ingénieur du TNO (Pays-Bas).



La Cité des Congrès de Nantes dans son cadre exceptionnel.
Photo fournie par la photothèque de la Cité des Congrès

Les participants ont eu l'opportunité enfin de faire des visites techniques (hall technologique de l'ENITIAA, hall d'assemblage de la Société Matai, ateliers pilotes de l'IFREMER, entrepôt frigorifique de la chaîne de distribution Système U et hall d'assemblage de la société York France Airchal).

On a assisté en définitive à une conférence internationale de qualité dans un cadre remarquable, celui de la Cité des Congrès de Nantes. Formulons le souhait que d'autres conférences sur le thème du froid y soient organisées.



Fluides actifs naturels : Oslo

« Succès pour une famille en train de s'agrandir »

Du 2 au 5 juin 1998, presque 350 personnes venus de 35 pays situés dans le monde entier se sont réunis à Oslo pour la conférence **Fluides actifs naturels '98 - Conférence Gustav Lorentzen**. Des progrès remarquables en termes de connaissances, technologie et développement des composants dans le domaine des fluides actifs naturels ont été présentés et ont donné lieu à des discussions passionnantes. Après des discours d'ouverture donnés par le **Professeur Arne Bredesen** pour le compte du Comité d'organisation et par **Louis Lucas**, Directeur de **YIIF**, **Mme Curo Fjellanger**, Ministre norvégien de l'Environnement, a officiellement déclaré la conférence ouverte.

Trois conférenciers pléniers ont adressé la conférence :

- **M. Dahle** du **Worldwatch Institute** a présenté : **L'état du monde - qu'est ce qui nous attend ? Défis et opportunités**
- **Prof A. Cavallini**, Université de Padoue (Italie) : **Fluides actifs naturels dans leur contexte historique**
- **M. Marsiletti**, Président-directeur général de Costan : **Fluides actifs naturels - opportunités pour l'industrie.**

Soixante-treize communications ont été présentées dans le cadre de 21 séances techniques divisées en trois programmes parallèles. Les thèmes couvraient tous les fluides actifs naturels mais le CCh (21 communications), les hydrocarbures (10 communications) et les principes de base (10 communications) étaient sous les feux de la rampe, ce qui reflète l'axe principal de la recherche et du développement actuels.

Durant et après la conférence, les visites techniques ont été organisées afin d'exposer la technologie basée sur les fluides actifs naturels.

Le Comité Scientifique a décerné le **Premier Prix pour la meilleure contribution** à **P. Albring** et **C Heinrich** de L'Institut für Luft und Kältetechnik à Dresde (Allemagne) pour leur communication « *Refroidisseur turbo avec eau comme frigorigène* ». Le prix a été présenté par le Président du Comité Scientifique, le **Professeur P-E. Frivik**, lors de la cérémonie de fermeture. Le Professeur Frivik a souligné que le prix avait été décerné dans l'esprit de la volonté de Gustav Lorentzen, c'est-à-dire, de l'utilisation des études théoriques et pratiques approfondies dont le fruit est une technologie avec des applications pratiques.

Le nombre élevé de participants à cette conférence à thème témoigne de l'intérêt actuel pour le domaine des fluides actifs naturels. Environ 60 % des participants étaient de l'industrie, ce qui

montre que ces conférences représentent un carrefour de rencontre privilégié pour les universitaires, les chercheurs et les industriels, et souligne l'importance attachée à la commercialisation de cette technologie.

Cette conférence impliquait la Commission B2 de l'IMF, avec la participation des Commissions B1, E1 et E2 ; elle était organisée par l'Université des sciences et technologies norvégienne (NTNU), SINTEF Energy Research, L'Association norvégienne du froid, l'Association norvégienne de chauffage, ventilation et climatisation et le Comité norvégien de l'IIF.

Le compte-rendu de la conférence, y compris des discussions fructueuses après chaque présentation de communication, sera publié et diffusé par l'IIF.

Une conclusion importante peut être tirée de cette conférence d'Oslo : force est de constater que, juste 5 ans après la décision de l'IIF d'organiser des conférences sur les fluides actifs naturels, ces conférences rencontrent aujourd'hui un succès retentissant. A force de travailler avec un objectif commun, la famille est en train de s'agrandir et la communication entre industriels et chercheurs se renforce, ce qui favorise l'obtention de résultats pratiques.

La prochaine conférence dans cette série de conférences biennales, **Fluides actifs naturels - Gustav Lorentzen** de l'IIF, aura lieu à **Purdue (USA)** en **2000**.

Il est peut-être approprié de conclure avec l'un des points saillants de la communication plénière de M. Dahle sur le développement durable :

"Nous avons pris nos billets et nous savons où nous allons."

Petter Neksâ
Secrétaire de la
Commission E2 de l'IIF

Arne Bredesen
Membre de la
Commission B2 de l'IIF



Effet de Serre : la Conférence de Buenos Aires s'est achevée sur un constat d'échec

La 4e Conférence des Nations-Unies sur les changements climatiques (COP4) s'est tenue du 2 au 13 novembre 1998 à Buenos Aires (Argentine) sous la présidence de Mme Maria Julia Alsogaray, Secrétaire d'Etat argentin aux Ressources Naturelles et au Développement Durable.

Cette conférence a réuni environ 5000 participants dont 1435 délégués appartenant à 161 pays, 265 observateurs d'organisations intergouvernementales dont **THF**, 2390 représentants d'organisations non-gouvernementales et 900 journalistes.

Il convient de bien distinguer la Convention-Cadre des Nations-Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) du Protocole de Kyoto.

La CCNUCC, au 2 novembre 1998, était ratifiée par 174 pays et une organisation d'intégration économique, l'Union Européenne. Elle était entrée en vigueur le 21 mars 1994. Elle a pour objectif ultime de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Les pays se répartissent en 2 groupes bien distincts : les 34 pays de l'Annexe I (pays développés) et les 140 pays non visés par l'Annexe I correspondant aux pays en développement.

Le Protocole de Kyoto a été adopté par consensus le 11 décembre 1997. Au 13 novembre 1998 il avait été signé par 58 pays, mais ratifié par seulement deux d'entre eux. Le Protocole n'entrera en vigueur que lorsqu'il aura été ratifié par au moins 55 pays parmi lesquels des pays développés listés à l'Annexe I représentant au moins 55 % des émissions de dioxyde de carbone de ces pays en 1990. Sachant que les Etats-Unis représentent 36,1 % et la Fédération de Russie 17,4 % de ces émissions, il apparaît que sans la ratification du Protocole par ces 2 pays, le Protocole ne pourra pas entrer en vigueur. L'objectif du Protocole de Kyoto est de réduire le total des émissions de 6 gaz à effet de serre (CCh, CH₄, N₂O, HFC, PFC et Sfe) au cours de la période 2008-2012 d'au moins 5 % par rapport au niveau de 1990.

A la différence de la Convention sur les Changements Climatiques, le Protocole de

Kyoto présentera un caractère réglementaire lorsqu'il aura été mis en vigueur.

L'objet principal de la Conférence de Buenos Aires était de définir les modalités et règles d'application de 3 mécanismes volontaires basés sur les forces du marché adoptés à Kyoto, à savoir :

- la mise en oeuvre conjointe (article 6)
- le mécanisme de développement «propre» (article 12)
- l'échange international de droits d'émission (article 17).

La mise en oeuvre conjointe permet à un pays développé (pays de l'Annexe I) de céder ou d'acquérir auprès d'un autre pays développé des unités de réduction d'émissions découlant de projets.

L'objet du mécanisme de développement «propre» est d'aider les pays non visés à l'Annexe I (pays en développement) à parvenir à un développement durable et d'aider les pays visés à l'Annexe I (pays développés) à remplir leurs engagements chiffrés de réduction de leurs émissions.

L'échange international de droits d'émission permet à tout pays développé (pays de l'Annexe I) d'acquérir des droits d'émission ou de céder, mais seulement avec un autre pays développé. La tonne de CO₂ aura donc un prix qui dépendra de l'offre et de la demande. Des chiffres allant de 20 USD à 50 voire 100 USD la tonne de CO₂ sont couramment cités.

Les 3 principaux groupes de négociation sont restés sur leurs positions tout au long de la conférence sans qu'il y ait un véritable rapprochement des vues afin d'aboutir à un compromis. Les positions de ces groupes peuvent être résumées comme suit :

- Union Européenne :
 - définition d'un seuil plancher pour la réalisation des objectifs au niveau national afin d'éviter qu'un pays n'atteigne ses objectifs par le



Buenos Aires : suite

seul achat de droits d'émission ou la réalisation de projets dans d'autres pays

- définition de politiques et mesures coordonnées au niveau international
- pas d'engagements contraignants pour les pays en développement, mais mise en place de politiques et mesures nationales visant à limiter les émissions de ces pays.

• Etats-Unis et pays du JUSSCANNZ (Japon, USA, Suisse, Canada, Australie, Norvège, Nouvelle-Zélande) :

- engagements contraignants de réduction des émissions pour les pays en développement
- mise en place rapide des mécanismes de flexibilité
- pas de politiques et mesures coordonnées ni de plancher pour la réalisation des objectifs au niveau national.

• Groupe du G77 et de la Chine :

- refus de prendre des engagements contraignants de réduction des émissions
- demande aux pays développés de ramener leurs émissions en l'an 2000 au niveau de 1990
- mise en place de mécanismes de transfert de technologie.

Au cours de la conférence, certaines déclarations ont été faites de manière à sortir les négociations de leur enlisement, sans qu'elles aboutissent à de véritables changements de positions :

- décision annoncée par le Président argentin, Carlos Menem, de la prise d'engagements contraignants par l'Argentine au même titre que les pays de l'Annexe I
- décision du Kazakhstan de s'intégrer au groupe des pays de l'Annexe I et de prendre également des engagements contraignants
- annonce par le chef de la délégation des Etats-Unis, le Sous-secrétaire d'Etat à l'Economie, Stuart E. Eizenstat, de la signature du Protocole de Kyoto par son pays le 12 novembre 1998
- enfin, lors du segment ministériel de la conférence, la plupart des ministres ont déploré les ravages du cyclone Mitch en Amérique Centrale en soulignant la relation probable avec le réchauffement de la planète et ont rappelé que l'année 1997 avait été l'année la plus chaude de la planète depuis que des relevés météorologiques étaient réalisés.

Le Groupe des Amis de la Présidente de COP4, créé en fin de conférence, a été lui aussi impuissant pour obtenir des décisions substantielles.

En fin de compte, la Conférence des Parties a mis en place un programme de travail comprenant 142 thèmes sur lesquels des décisions devraient être prises lors de la 6e Conférence des Parties qui se tiendra à la fin de l'année 2000. Différents ateliers sont programmés, ainsi que des dates limites pour la remise de propositions par les pays membres.

Au cours de ces 12 journées, il a été peu question des HFC, les discussions portant sur des sujets beaucoup plus généraux ; toutefois, une décision mérite d'être soulignée :

La Conférence des Parties,

- notant la nécessité de mettre en oeuvre les accords internationaux sur l'environnement de manière cohérente,
- notant les progrès importants réalisés par le Protocole de Montréal dans la réduction des substances qui appauvrissent l'ozone,
- notant enfin le développement des HFC parmi les substances de remplacement des CFC et des HCFC,
- invite les Parties, le GIEC, les OIG et les ONG à adresser au Secrétariat des informations sur les moyens de limiter les émissions de HFC, avant le 15 juillet 1999,
- encourage l'organisation d'un atelier par le GIEC et le Comité d'Evaluation Technologique et Economique du Protocole de Montréal en 1999 sur les voies et moyens de limitation des émissions d'HFC,
- invite l'Organe subsidiaire de conseil scientifique et technologique à présenter un rapport sur ce sujet à la 5e Conférence des Parties.

Il y a lieu de mentionner enfin que les inventaires de gaz à effet de serre dressés par des pays de l'Annexe I (pays développés) ont fait l'objet d'une compilation-synthèse :

- la répartition des émissions en 1995 est la suivante : CO₂ (82 %) ; CH₄ (12 %) ; N₂O (4 %) ; gaz fluorés (HFC + PFC + SF₆) (environ 2 %) ;
- en 1996, les HFC représentaient 43 % des émissions de gaz fluorés, soit 0,85 % des émissions totales ;
- les déclarations des pays relatives aux HFC sont disparates et incomplètes. Seuls 19 pays sur les 34 de l'Annexe I ont donné des chiffres sur les émissions actuelles de HFC mais certains de ces pays ont regroupé les émissions de HFC et de PFC. Le Secrétariat de la Convention appelle à



Buenos Aires : suite

une clarification de la méthodologie relative aux émissions de gaz fluorés.

En conclusion, un travail considérable est à accomplir au cours des deux prochaines années pour définir les modalités et les règles d'application des mécanismes du Protocole de Kyoto.

LIIF co-organise un séminaire de formation sur la conservation du raisin de table au Liban

Un séminaire de formation a été organisé au Liban sur la conservation du raisin de table, avec le concours de THF. C'est **M. Farès Charbel**, délégué du Liban à THF et professeur à PISAB (Institut Supérieur Agricole de Beauvais) qui a eu l'initiative de ce séminaire, organisé avec le concours de l'Ambassade de France au Liban. Le **Professeur Michel Afram**, Directeur de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs d'Agronomie Méditerranéenne qui appartient à l'Université Saint-Joseph au Liban a parfaitement organisé l'accueil des quelques 100 participants et le déroulement de la session.

Le Doyen, **M. Asmar**, et le **Père Sion**, Vice-Recteur de l'Université Saint-Joseph, ont participé à l'ouverture du séminaire.

Les intervenants ont été :

Louis Lucas : « *Le rôle du froid dans le développement agro-alimentaire mondial* »

François Billiard : « *Les fluides frigorigènes et les problèmes d'environnement* »

Said Chehab, Professeur à GESIB : « *Le Liban face au problème des CFC* »

Roukoz Kassouf : « *Recensement des installations frigorifiques au Liban* »

Fadi Assaf : « *Installations frigorifiques libanaises pour la conservation du raisin* »

Jean Leteinturier, expert en fruits et légumes : « *La conservation du raisin de table* »

Il est revenu aux **Professeurs Charbel et Afram** de dégager les enseignements de ce séminaire en soulignant la nécessité de structurer le froid au Liban et en proposant la création :

- d'un Conseil National du Froid dont le rôle serait de définir une politique nationale de froid tant au niveau de la production que de ses applications
- d'une Agence Libanaise du Froid Artificiel (ALFA) structurée par régions dont le rôle serait de mettre en oeuvre la politique définie par le Conseil National du Froid.

Le séminaire s'est poursuivi par la visite d'une station de conservation du raisin fonctionnant à l'ammoniac appartenant au **Croupe HATEM** et d'une usine de fabrication de produits à base de pommes de terre, **MASTER CHIPS**, comprenant de grandes chambres réfrigérées pour la conservation des pommes de terre.

Avec une production de 250 000 tonnes de raisin de table au Liban, nul doute que ce séminaire répondait à des problèmes particulièrement actuels.

