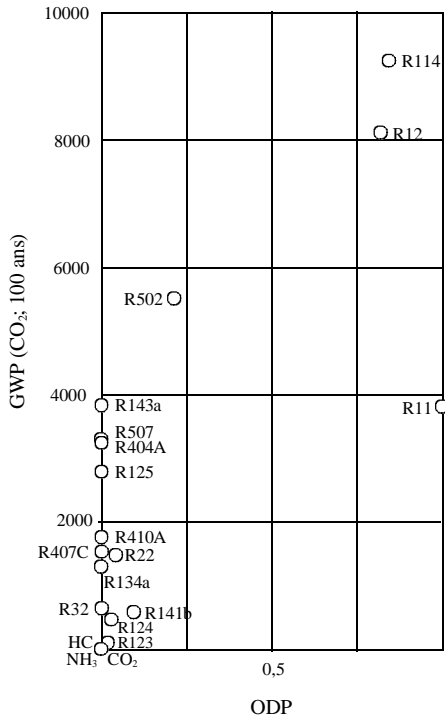


15e Note d'information sur les frigorigènes L'utilisation du CO₂ comme frigorigène

Le Protocole de Montréal, par les règles qu'il impose aux gaz susceptibles d'endommager la couche d'ozone, a conduit à l'arrêt de l'utilisation des chlorofluorocarbures (CFC) en tant que fluides frigorigènes dans les pays industrialisés. De la même manière, les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) ne constituent qu'une solution provisoire, jusqu'en 2020 dans les pays industrialisés et certaines réglementations nationales imposent un arrêt plus précoce encore de leur utilisation (par exemple avant la fin de l'année 1999 pour le R22 en Allemagne).

En matière d'environnement, il convient de prendre en compte une autre propriété de ces frigorigènes, à savoir l'effet de serre auquel ils contribuent. Ceci vaut également pour les hydrofluorocarbures (HFC), substitués aux CFC et HCFC récemment développés, qui ont de ce fait été placés dans un panier commun à 5 autres gaz à effet de serre par le Protocole de Kyoto.

Cette situation entraîne une utilisation accrue de frigorigènes "anciens" tels que l'ammoniac et les hydrocarbures qui, bien que non nocifs pour l'environnement, peuvent présenter un certain degré de risque en raison de leur inflammabilité et/ou toxicité. De ce fait, le dioxyde de carbone (CO₂), frigorigène utilisé autrefois dans le froid industriel et maritime, fut proposé en 1990 par le Professeur Gustav Lorentzen comme frigorigène de substitution, notamment parce qu'il n'est pas inflammable.¹



Ainsi que le montre la *Figure 1*, contrairement aux CFC et HCFC, les hydrocarbures et le CO₂ ont un ODP (Ozone Depletion Potential-Potentiel d'Appauvrissement de l'Ozone) nul et un GWP (Global Warming Potential-Potentiel de Réchauffement du Globe) négligeable. Quant aux HFC, leur ODP est nul et leur GWP peut aller de quelques centaines dans le cas du HFC32 à plusieurs milliers pour le HFC143a, inflammable, et le R125, non inflammable.

Concernant la sécurité, parmi les "anciens" frigorigènes, seul le CO₂ peut rivaliser avec les HFC, non inflammables.

Si le CO₂ a un impact important sur le réchauffement de la planète (environ 63 % de l'incidence totale des gaz à effet de serre)², c'est en raison des quantités importantes de CO₂ émises par un grand nombre d'applications industrielles.

Cependant, à l'inverse des HFC, son GWP est négligeable quand il est utilisé comme frigorigène.

Ainsi, sans incidence dommageable pour l'environnement et sûre, l'utilisation du CO₂ comme frigorigène présente un intérêt majeur.

Figure 1. ODP et GWP de plusieurs frigorigènes

Tableau 1. Comparaison des propriétés du CO₂ avec celles d'autres frigorigènes

Frigorigène	R12	R22	R134a	R290	NH ₃	CO ₂
Fluide naturel	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui
ODP ³	0,82	0,055	0	0	0	0
GWP (100ans) valeurs IPCC ³	8100	1500	1300	20	<1	1
GWP (100ans) valeurs WMO ⁴	10600	1900	1600	20	<1	1
Temp. critique (°C) ³	112,0	96,2	101,2	96,7	132,3	31,1
Pression critique (MPa) ³	4,14	4,99	4,06	4,25	11,27	7,38
Inflammabilité	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non
Toxicité	Non	Non	Non	Non	Oui	Non
Coût relatif	-	1,0	4,0	0,3	0,2	0,1
Puissance volumétrique	1,0	1,6	1,0	1,4	1,6	8,4

Le cycle frigorifique du dioxyde de carbone

Il reste à savoir si le CO₂ est bien adapté aux applications du froid, aux systèmes de conditionnement d'air et de pompes à chaleur. Ses propriétés thermodynamiques le distinguent des autres frigorigènes déjà mentionnés ; sa pression de vapeur est bien plus élevée et sa température critique est d'environ 31°C, ce qui empêche le rejet de chaleur dans l'atmosphère par condensation comme c'est le cas dans les cycles à compression traditionnels : le CO₂ ne peut donc être utilisé dans de tels cycles, très efficaces, que lorsque la température à laquelle la chaleur doit être évacuée est inférieure à cette température critique, par exemple dans l'étage inférieur d'un système en cascade avec un autre frigorigène pour l'étage supérieur. Pour rejeter la chaleur à une pression supercritique, on ne peut que refroidir le fluide gazeux, sans le condenser ; un tel cycle, dit "transcritique" a été proposé par Gustav Lorentzen et ses collaborateurs pour le conditionnement d'air automobile et les pompes à chaleur.^{1,5}

Ce cycle transcritique n'est pas nouveau : il est connu depuis le siècle dernier sous le nom de Linde-Hampson pour la liquéfaction de l'air basée sur l'effet Joule-Thomson. Mais son efficacité est dans ce cas assez faible.

Dans les machines frigorifiques classiques, pour le conditionnement d'air et les pompes à chaleur, cet inconvénient majeur, de nature énergétique, du cycle transcritique au CO₂ doit être pris en compte. Il ne peut donc être utilisé que lorsque les avantages liés à l'environnement et/ou à la sécurité compensent cet inconvénient.

Applications du dioxyde de carbone

Les émissions de gaz à effet de serre liées à un système frigorifique comportent celle du frigorigène (effet direct) et l'émission de CO₂ qui résulte de la fourniture d'énergie au système (effet indirect). On en rend compte par le TEWI (Total Equivalent Warming Impact). Les systèmes frigorifiques responsables d'émissions importantes de frigorigène constituent ainsi un champ d'application privilégié pour le CO₂ dès lors que l'efficacité énergétique, définie par le coefficient de performance (COP), peut être maintenue à un niveau identique.⁵

Le rapport d'options techniques du PNUE de 1991⁷ indiquait que parmi toutes les utilisations des frigorigènes, le conditionnement d'air automobile était celle qui en consommait le plus et dont la part de l'effet direct dans le TEWI était la plus élevée (voir *Figure 3*).

En conséquence, Lorentzen et ses collaborateurs attirèrent d'abord l'attention sur cette application du CO₂, utilisant nécessairement le cycle transcritique du fait des températures plus élevées de l'air extérieur où la chaleur est rejetée. C'est en fait tout le domaine des transports qui peut constituer le domaine d'application privilégié du CO₂.

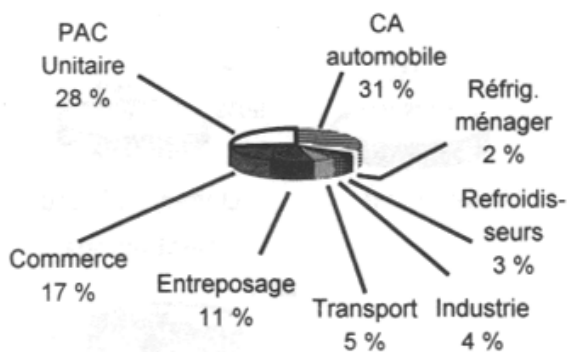


Figure 2. Consommation de frigorigènes en 1991 (484 200 tonnes/an dans le monde)⁸

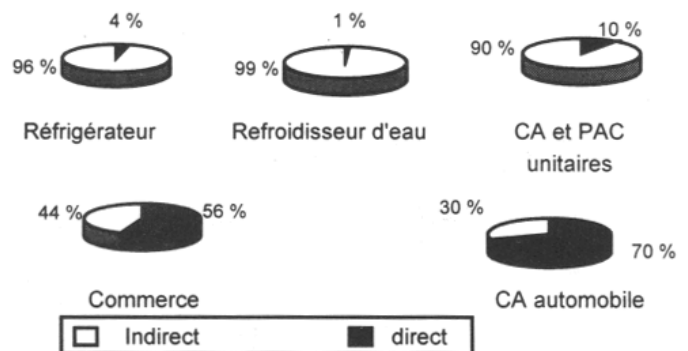


Figure 3. Répartition du TEWI (100 ans)⁸ entre effet direct (dû au fluide) et effet indirect (énergie)

Comme le montre la *Figure 3*, le froid commercial, y compris les systèmes utilisés en grande distribution, a également un impact significatif sur le TEWI, en raison de la longueur des réseaux de canalisations et de l'importance de leur charge. Des systèmes en cascade avec le CO₂ comme frigorigène à basse température ou comme frigoporteur permettent de réduire l'émission de frigorigènes sans augmenter la consommation d'énergie. Par contre, l'usage du CO₂ dans l'étage supérieur des installations de supermarchés présente un handicap énergétique souvent inacceptable pour les gérants en raison des coûts générés.

La troisième place pour la part due au frigorigène est détenue par les climatiseurs et pompes à chaleur unitaires (PAC) (voir *Figures 2 et 3*).

Pour les pompes à chaleur, les systèmes unitaires et les refroidisseurs d'eau offrent de bonnes perspectives à l'emploi du CO₂ grâce au cycle transcritique ; la chaleur rejetée côté haute température est alors utilisée pour le chauffage des locaux ou la production d'eau chaude.

Avec le cycle transcritique, la température n'étant pas constante dans le refroidisseur de gaz, il est possible d'adapter les profils de température du frigorigène et du frigoporteur afin de minimiser les pertes lors du transfert de chaleur et d'améliorer l'efficacité énergétique. Pour obtenir de bons résultats, il faut avoir des intervalles de température similaires et relativement élevés des deux côtés, ce qui est bien adapté pour la production d'air chaud ou d'eau chaude.

Avantages du dioxyde de carbone

Avec le cycle transcritique, la pression et la température du refroidisseur de gaz ne sont pas liées alors qu'elles le sont dans la zone subcritique où deux phases cohabitent.

Alors que la pression dans la zone supérieure a, par le rapport de pressions, une influence importante sur le travail et l'efficacité du compresseur, il est possible d'obtenir des températures élevées avec une puissance de compression raisonnable. C'est pourquoi l'usage du CO₂ dans des pompes à chaleur, par exemple pour produire de l'eau à 90°C, peut constituer une perspective très intéressante.

La pression élevée de la vapeur conduit non seulement à un rapport de pressions faible (et ainsi à une bonne efficacité du compresseur), mais aussi à des coefficients de transfert élevés et des pertes de charge réduites. Ainsi, en dépit de la faible efficacité du cycle transcritique théorique, le cycle frigorifique transcritique au CO₂ peut entrer en compétition avec le cycle à compression de vapeur utilisé avec d'autres frigorigènes.

Un autre avantage du CO₂ tient à la forte puissance volumétrique qu'il engendre, du fait des pressions de travail élevées qu'il requiert, permettant ainsi l'usage de composants de petite taille et de conduites de faible diamètre. Par ailleurs, le fait qu'il n'a à être ni récupéré ni recyclé (à l'inverse des HFC), signifie que l'usage du CO₂ est très intéressant là où les infrastructures sont inexistantes ou trop coûteuses, comme dans les pays en développement.

Inconvénients du dioxyde de carbone

Le principal inconvénient du CO₂ en tant que frigorigène tient à la pression de travail élevée qui le caractérise : celle-ci est beaucoup plus élevée que celle des autres frigorigènes, naturels ou non, cités ci-dessus. Cette caractéristique, qui induit une puissance volumétrique beaucoup plus élevée, nécessite le développement de composants de conception nouvelle, à la fois plus petits et plus résistants.

Il n'en reste pas moins que ces nouveaux composants doivent, pour être produits à un niveau de prix raisonnable, être fabriqués en quantité suffisante. Ceci peut être un obstacle considérable pour la diffusion de l'utilisation du CO₂ dans les domaines du froid, du conditionnement d'air et des pompes à chaleur. Si par exemple les industries de l'automobile et du transport décidaient d'adopter cette technique, d'autres applications pourraient bénéficier de composants produits en quantité, à bas prix.

Conclusion

Les techniques utilisant le CO₂ en tant que frigorigène sont très attractives du fait de l'innocuité de celui-ci vis-à-vis de l'environnement et de la sécurité d'utilisation qu'il engendre. Cependant, un pas décisif reste à faire pour permettre la production en masse des composants qu'il requiert afin que ces techniques soient compétitives en termes de coûts avec celles utilisées traditionnellement dans le froid, le conditionnement d'air et les pompes à chaleur.

Pendant les huit dernières années, un travail intensif de recherche et de développement a été réalisé à l'échelle internationale, en particulier au travers de deux grands projets de la Communauté Européenne, le projet RACE pour le développement des systèmes de conditionnement d'air automobile au CO₂ et le projet COHEPS pour les pompes à chaleur utilisant le CO₂.

Ces projets ont montré que le CO₂ pouvait rivaliser avec les techniques traditionnelles dans le domaine du conditionnement d'air des véhicules ainsi que dans celui des pompes à chaleur à haute température pour les systèmes hydroniques, pour la fourniture d'eau chaude jusqu'à 90°C et dans les systèmes de séchage industriel.⁹

Cependant, il faut signaler qu'il existe des applications pour lesquelles les conditions d'utilisation du système ne peuvent compenser l'efficacité moindre du cycle transcritique.

En conclusion, la technologie du CO₂ peut permettre de relever les défis actuels posés pour les systèmes frigorifiques, de conditionnement d'air et de pompes à chaleur, par les exigences liées à l'environnement et à la sécurité, mais ceci n'est possible que dans des applications précises où les avantages peuvent contrebalancer les inconvénients de cette technique.

Références

1. Lorentzen, G., Transcritical vapour compression cycle device. Patent WO 90/07683, 1990.
2. 12ème Note d'information de l'IIF sur les fluorocarbures et l'effet de serre, juillet 1997.
3. Climate Change 1995. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
4. World Meteorological Organization (WMO), Scientific Assessment of Ozone Depletion, 1998, chaired by D.L. Albritton, P.J. Aucamp, G. Megie and R.T. Watson, report 44, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project, Nairobi, Kenya; National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, D.C.; National Aeronautics and Space Administration, Washington D.C.; and the European Commission, Directorate General XII – Science, Research and Development, Brussels, Belgium; February 1999
5. Lorentzen, G., Application of "Natural" Refrigerants. A Rational Solution to a Pressing Problem. Proc Int Conf IIR, Ghent, Belgium, 1993.
6. 11ème Note d'information de l'IIF sur les CFC, le froid et les HCFC, février 1995.
7. Montreal Protocol 1991 Assessment, Report of the Refrigeration, Air-conditioning and Heat-Pump Technical Options Committee.
8. DOE/AFEAS GW Project: Energy and Global Warming Impacts of CFC Alternative Technologies, Executive Summary, Oak Ridge National Laboratory, dec. 1991.
9. Proceedings of the IEA/IIR/IZWe.V. Workshop on CO₂ Technology in Refrigeration, Heat-Pump and Air-Conditioning Systems, Mainz, Germany, 18 mars 1999.

Des exemplaires supplémentaires de cette note peuvent être obtenus auprès de l'IIF