



Les nouvelles technologies du froid

La dimension sociale du secteur spécifique de la réfrigération et de la production d'air conditionné est primordiale. Les enjeux sont économiques et sanitaires quand il faut conserver les aliments et empêcher le développement des bactéries, ou bien contribuer au confort des sociétés industrialisées. Ce secteur pèse au total 15 % de la consommation électrique dans le monde, pour des chiffres proches de 700 à 1 000 millions de réfrigérateurs et de 380 millions d'automobiles climatisées.



Xavier Renaud/Air Liquide

La production de froid est un secteur en plein essor aussi bien dans l'industrie que chez les particuliers. Ici, surgélation de viande par le tunnel Himalaya™.

Les technologies du froid utilisent des fluides frigorigènes et concernent une large diversité de secteurs : bâtiment, transport, industries agroalimentaire, chimique et mécanique. Le domaine de production de froid présente la caractéristique d'être un grand consommateur d'énergie et de contribuer également fortement aux rejets de **gaz à effet de serre**.

Remplacer les fluides frigorigènes qui contribuent à l'effet de serre

La thématique de substitution des fluides à **effet de serre** dans les procédés énergétiques, comme les pompes à chaleur et les machines frigorifiques, devient un enjeu majeur pour la lutte contre l'émission de **CO₂**. Les fluides frigorigènes du type **CFC** sont à présent interdits, mais les fluides appelés à les remplacer ont encore un impact non négligeable sur l'effet de serre. Ainsi, la part du réchauffement anthropique de la planète liée à l'ensemble des fluides chloro-fluorés (**CFC, HCFC, HFC, PFC...**) atteint plus de 12 %, alors qu'en quantité ces gaz représentent moins de 100 **ppm**. Ces chiffres soulignent les efforts restant à

accomplir pour limiter les quantités de réfrigérants nocifs dans les installations comme les pompes à chaleur ou les machines frigorifiques.

La réduction drastique des émissions de fluides frigorigènes est sans conteste l'élément moteur des évolutions technologiques à venir, auxquelles le CEA contribue pour répondre aux besoins des industriels. Leur remplacement par des fluides dits "naturels" pose toutefois, à chaque fluide envisagé, des problèmes particuliers et nécessite un effort de recherche.

Le dioxyde de carbone, un fluide frigorigène intéressant

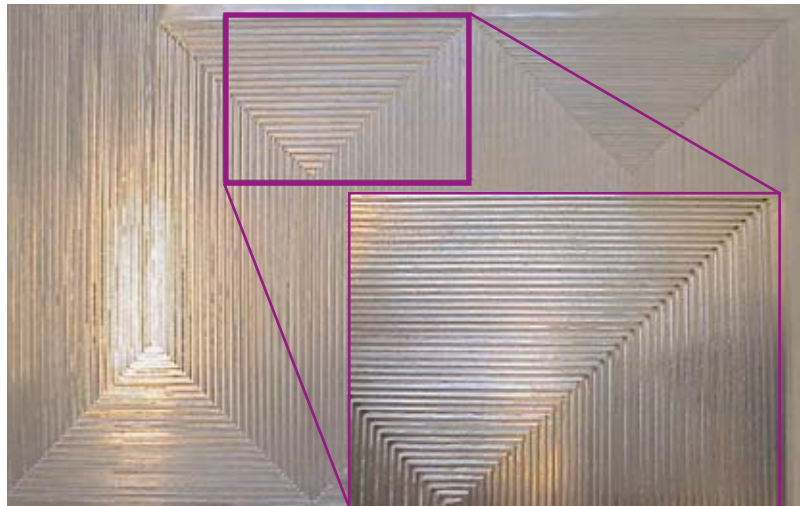
Le **CO₂** est un fluide potentiellement intéressant sur le plan énergétique, tout en conservant un seuil très faible de contribution à l'effet de serre⁽¹⁾, environ 1 000 fois moins qu'un réfrigérant de type HFC. Compte tenu de

(1) La contribution à l'effet de serre de chaque fluide est quantifiée par un critère, le GWP (*Global Warming Potentials*), qui résume le pouvoir de réchauffement de chaque fluide, en prenant une valeur référence de 1 pour le **CO₂**. Par exemple, le fluide HFC134a utilisé dans les cycles de réfrigération a un indice de 1 300.

ses propriétés spécifiques, son efficacité sera bonne en utilisation dans un cycle trans-critique⁽²⁾. Il est impératif d'en démontrer la faisabilité technique, répondant aux contraintes particulières de haute pression, en aboutissant à un prototype pour une application bien définie. Le CO₂, par exemple, demande aussi une attention spéciale du côté du refroidisseur de gaz, à cause des pressions élevées inhabituelles dans de tels systèmes. En effet, la pression de refoulement du compresseur peut atteindre des valeurs supérieures à 140 bars. Des études spécifiques sont nécessaires pour l'établissement de corrélations de dimensionnement pour les échangeurs (évaporateur et refroidisseur de gaz). Ce fluide fait l'objet de recherches importantes dans le domaine automobile pour le confort des passagers. Par ailleurs, la production d'eau chaude semble également bien adaptée à cette technique.

Les hydrocarbures utilisés comme fluides frigorigènes

Pour les autres fluides naturels, tels l'ammoniac et les hydrocarbures, les risques divers associés à leur utilisation (toxicité, inflammabilité...) rendent leur emploi délicat. La solution, pour leur usage dans les cycles à compression de vapeur, est de minimiser la quantité mise en jeu (encadré 1). Ceci passe par une optimisation du cycle thermodynamique et la recherche d'échangeurs plus compacts et plus efficaces. Des solutions technologiques doivent donc être apportées pour répondre à cette attente, et plusieurs pistes sont déjà envisageables : ports plats extrudés⁽³⁾, échangeurs à plaques compacts, technologies de gravure de mini-canaux... L'utilisation des hydrocarbures en tant que fluide frigorigène devrait se développer rapidement car, comme pour les CFC et les HCFC, l'interdiction des HFC pourrait être soudaine. Dès 2005, les entreprises européennes devraient en effet



Condenseur à plaques mis au point au GRETh. L'amélioration des performances des systèmes de production de froid passe par le développement d'échangeurs innovants.

se voir infliger des amendes si elles dépassent leur nombre de quotas⁽⁴⁾ de gaz à effet de serre.

Des fluides frigoprotecteurs diphasiques prometteurs

La distribution de froid par fluides frigoprotecteurs diphasiques commence à peine à se développer. Cette thématique concerne à la fois la production et le

(2) Le cycle est trans-critique lorsque le fluide, en l'occurrence le CO₂, est porté à une pression supérieure à sa pression critique par le compresseur, puis redescendu à une pression inférieure par le détendeur.

(3) Port plat extrudé : sorte de réglette plate en aluminium extrudée démarquant des canaux.

(4) Un quota : une tonne métrique d'équivalent de dioxyde de carbone.

Une machine à compression utilisant des hydrocarbures conçue au CEA

1

Aussi surprenant que cela puisse paraître, en matière de fluides frigorigènes les hydrocarbures sont peu polluants comparés aux autres fluides couramment employés. Concrètement, l'impact d'un gaz à effet de serre se mesure en équivalents de dioxyde de carbone rejetés. Alors qu'un kilogramme de HFC correspond à 1 400 kg de CO₂ libérés dans l'atmosphère, un kilogramme de propane représente 20 kg seulement ! Le GRETh a réalisé une machine à compression utilisant le propane comme réfrigérant. Très peu de propane – 2 kg seulement, soit six fois moins que dans une bouteille de gaz à usage domestique – circule dans cette machine à compression.

Les premiers essais montrent que la machine affiche une puissance thermique plus élevée qu'avec un fluide classique (70 g de propane fournissent 1 kW de froid contre 240 g de fluide HFC) et consomme 25 % d'électricité en moins. Elle est par ailleurs équipée d'un compresseur "spirale" qui a la capacité de fonctionner à vitesse variable. Il est ainsi possible de ne pas utiliser la machine à plein régime en permanence, ce qui constitue une source d'économie.

La phase d'optimisation de cette machine, principalement sur les échangeurs qui sont les éléments clés dans une pompe à chaleur, débute maintenant. L'objectif visé est qu'elle emploie moins d'hydrocarbure encore pour les mêmes performances.



Machine à compression utilisant le propane comme réfrigérant. Elle est compacte, consomme peu d'électricité et présente une puissance thermique élevée.



transport de froid, en limitant l'emploi des réfrigérants classiques. Il s'agit d'intégrer un circuit frigoroporteur intermédiaire entre le dispositif utilisateur du froid et la machine frigorifique. Le fonctionnement par chaleur latente⁽⁵⁾ en supplément à la chaleur sensible⁽⁶⁾ permet d'atteindre de bonnes performances sur le plan thermique. Les "coulis stabilisés" sont les plus récentes avancées de ce secteur. Ils sont composés de particules de gel organique remplies

d'un matériau changeant de phase à une température fixe, dont la plage peut varier dans une large gamme de température, et suspendues dans un fluide servant de vecteur (encadré 2). Ils présentent des potentialités importantes. Toutefois, les études thermique et rhéologique ainsi que celles de leurs caractéristiques thermophysiques et de leur potentialité de stockage constituent un thème de recherche à poursuivre, en préliminaire à la réalisation de prototypes de démonstration.

(5) Chaleur latente: transfert d'énergie par changement de phase, à température constante pour un corps pur.

(6) Chaleur sensible: transfert d'énergie par la seule variation de température d'un corps pur.

> Pierre Mercier

Direction de la recherche technologique
CEA centre de Grenoble

Distribution de froid par des "coulis de glace"

2

Étudions le régime d'écoulement dans une conduite horizontale de particules d'acrylamide (gel organique), emprisonnant un matériau à changement de phase, suspendues dans un fluide porteur. Dans le cas d'un fluide **diphasique** liquide-solide, la différence de masse volumique entre les deux phases peut conduire à une configuration d'écoulement particulière. Les particules étudiées étant plus lourdes que le fluide porteur, elles sont soumises à deux forces: la *gravité* qui entraîne la sédimentation et les *forces de portance et de traînée* qui, à l'inverse, tendent à homogénéiser l'écoulement. L'homogénéisation de l'écoulement dépend de la vitesse. Plus celle-ci est élevée, plus l'homogénéisation est effective. Si V représente la vitesse de circulation du fluide diphasique, quatre principaux régimes d'écoulement peuvent être observés. Pour des vitesses très fortes ($V > V^{***}$), le fluide se comporte comme un fluide pratiquement homogène (figure a). La **turbulence** favorise ce phénomène.



Figure a.
Écoulement homogène ($V > V^{***}$).

Pour $V^{**} < V < V^{***}$, la distribution des particules est hétérogène. Un gradient de concentration en particules lié à un effet de gravité dominant est observé (figure b). Plus le débit est réduit, plus la répartition des particules devient concentrée vers la partie basse de la section (pour des particules plus lourdes que le fluide porteur).



Figure b.
Écoulement hétérogène ($V^{**} < V < V^{***}$).

Pour $V^* < V < V^{**}$, les particules forment un lit se déplaçant à une vitesse différente du liquide porteur (figure c). Quelques

particules se déplacent par saltation, d'autres se maintiennent en suspension dans le liquide porteur.



Figure c.
Écoulement en lit mouvant ($V^* < V < V^{**}$).

Pour $V < V^*$, un grand nombre de particules au repos forment un lit fixe (figure d). Le liquide porteur circule uniquement sur la portion restreinte qui lui est offerte. Ce phénomène crée une augmentation des pertes de pression lorsque la vitesse diminue.



Figure d.
Écoulement en lit stationnaire ($V < V^*$).

La vitesse critique V^{***} correspond donc à une vitesse limite entre une suspension homogène et une suspension hétérogène. Quant à la vitesse V^{**} , c'est la vitesse limite d'apparition du phénomène de charriage. La valeur des différentes vitesses critiques dépend à la fois de la nature des particules, du liquide porteur et du diamètre de la conduite.

Le procédé de distribution de froid par des "coulis de glace" sera d'autant plus efficace que les particules sont correctement déplacées par le fluide porteur, sans accumulation dans certaines parties du circuit, sans blocage dans des contractions et sans stratification dans des conduites horizontales.

Les résultats obtenus au CEA ont apporté la preuve que ce type de coulis est prometteur pour des applications de stockage et de transport de froid.

B Effet de serre et CO₂

L'énergie solaire qui parvient au sol réchauffe la Terre et se transforme en **rayons infrarouges**. Comme les vitres d'une serre – d'où le nom donné à ce mécanisme – des gaz présents dans l'atmosphère piègent une partie de ces rayons qui tendent à la réchauffer. Ainsi, en termes de puissance, la Terre reçoit en moyenne un peu plus de 240 **watts/m²**. Sans **effet de serre**, la température moyenne sur la Terre serait de - 18 °C et peu d'eau serait sous forme liquide. Cet effet a donc une influence bénéfique puisqu'il permet à notre planète d'avoir une température moyenne de 15 °C.

Cependant, depuis le début de l'ère industrielle, soit plus d'une centaine d'années, l'homme a rejeté dans l'atmosphère des gaz (**gaz carbonique**, **méthane**, oxydes d'azote, etc.) qui augmentent artificiellement l'effet de serre. Depuis 1750, cette augmentation, pour ce qui est des gaz "bien mélangés", a été de 2,43 W/m². Avec un "forçage radiatif supplémentaire" de 1,46 W/m², le **gaz carbonique** (CO₂) compte pour plus de la moitié de cet "effet de serre additionnel", loin devant le méthane (0,48 W/m²), les **halocarbures** (chlorofluorocarbures **CFC**, hydrochlorofluorocarbures **HCFC** et hydrofluorocarbures **HFC**) avec 0,34 W/m² et le dioxyde d'azote avec 0,15 W/m². En outre, l'**ozone** troposphérique présente un forçage radiatif positif de 0,35 W/m² (mais on estime que l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique constaté entre 1979 et 2000 a entraîné un forçage radiatif négatif de 0,15 W/m²).

Cet ajout à l'effet de serre naturel (155 W/m²) est faible, correspondant à un accroissement de l'ordre de 1%. Néanmoins, il est presque certain qu'il

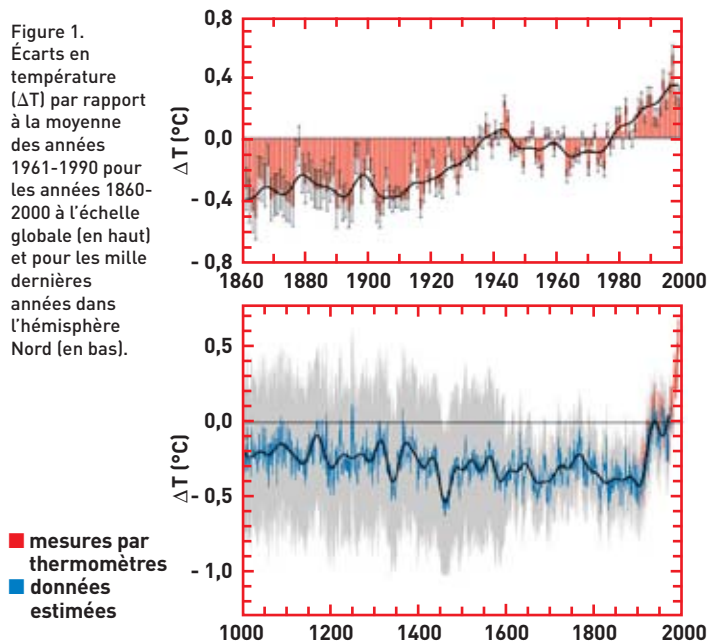
a contribué à l'augmentation de la température moyenne de notre planète d'environ 0,5 °C, observée au cours du vingtième siècle (**figure 1**). Si rien n'est fait pour réduire ces émissions, la concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère (**figure 2**) pourrait doubler d'ici 2100. À partir de la consommation mondiale actuelle⁽¹⁾ de combustibles **fossiles** (7700 Mtep), il est aisé de calculer la masse de CO₂ actuellement produite : 20 milliards de tonnes par an ! Cela pourrait conduire à une augmentation substantielle de l'effet de serre et mener, par des effets amplificateurs non linéaires, à de profondes altérations du climat. La plupart des modèles prévoient que le double de la concentration de gaz

carbonique actuelle conduirait, à la fin du vingt et unième siècle, à une élévation de la température de l'ordre de 2 à 3 °C. Certains donnent même une fourchette entre 1,5 et 4,5 °C, laissant prévoir des conséquences dramatiques sur l'environnement, comme la montée notable du niveau de la mer.

Ces chiffres peuvent sembler petits et n'avoir que de faibles conséquences sur le climat ; il n'en est rien. Pour s'en convaincre, il faut se rappeler que lors du "petit âge glaciaire", entre 1450 et 1880, la température moyenne ne s'est abaissée en France que de 1 °C en moyenne. Il y a 6000 à 8000 ans, alors que l'Europe occidentale a connu une période plus chaude avec une température moyenne supérieure de 2 °C à 3 °C à celle d'aujourd'hui, le Sahara n'était

(1) CEE DG XVII (1996), scénario "Sagesse traditionnelle".

Figure 1. Écarts en température (ΔT) par rapport à la moyenne des années 1961-1990 pour les années 1860-2000 à l'échelle globale (en haut) et pour les mille dernières années dans l'hémisphère Nord (en bas).



B (suite)

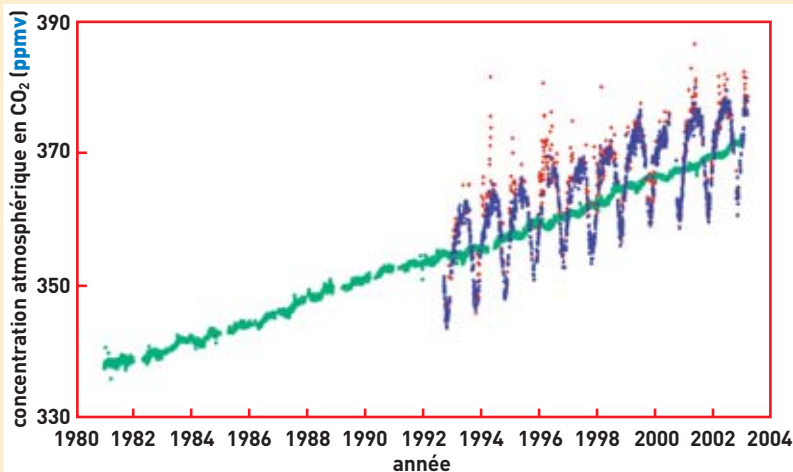


Figure 2.

Évolution de la concentration atmosphérique en CO₂ depuis 1980 telle qu'elle est mesurée quotidiennement par les stations automatiques du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), depuis 1981 sur l'île d'Amsterdam (Océan indien) et depuis 1992 à Mace Head sur la côte ouest de l'Irlande.

Les mesures de l'île d'Amsterdam (en vert), loin de toute perturbation anthropique directe, mettent essentiellement en évidence l'augmentation continue de la concentration. Le site de Mace Head mesure essentiellement l'air océanique (régime normal de vents d'ouest; mesures en bleu). Quand le régime des vents s'inverse, il reçoit une atmosphère continentale, avec un fort excès de CO₂ (mesures en rouge) par rapport à l'atmosphère océanique. À l'augmentation moyenne de la concentration de CO₂ se superpose une forte modulation saisonnière due au cycle végétatif (photosynthèse chlorophyllienne) des plantes, émetteur de CO₂ en hiver et absorbeur en été.

pas un désert mais le siège de pluies abondantes. C'est moins l'augmentation de la température qui est préoccupante que sa variation rapide (en un siècle). Les grandes variations déjà observées dans la nature se sont produites sur des échelles de temps beaucoup plus longues, au moins pour celles qui ont un caractère global. Ainsi, la dernière glaciation a duré 100 000 ans et la déglaciation correspondante 10 000 ans. La variation rapide que nous sommes en train de vivre peut induire des perturbations importantes et inattendues du climat et de l'écosystème, qui n'aura pas toujours le temps de s'adapter.

De Rio à Kyoto : les grandes conférences sur l'environnement

L'évolution de l'environnement global a suscité l'organisation d'importantes conférences, depuis la dernière décennie du vingtième siècle.

Au Sommet de la Terre de **Rio de Janeiro** (juin 1992) a été signée la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques qui adopta l'objectif d'une stabilisation des émissions de **gaz à effet de serre** (entrée en vigueur le 21 mars 1994).

À la conférence de Kyoto (décembre 1997) a été signé le protocole de réduction

globale des émissions de ces gaz, de 5,2% en moyenne en 2008-2012 par rapport à 1990, pour les pays de l'OCDE et les pays de l'Europe de l'Est (dont la Russie). Les objectifs de réduction pour l'Union européenne et la France sont de respectivement 8% et 0%. Les moyens de les atteindre ont été débattus sans succès en novembre 2000 à **La Haye**. Les conférences suivantes, tenues à **Marrakech** (2001), **Johannesbourg** (Sommet de la Terre en août-septembre 2002), **New-Delhi** (octobre 2002), **Moscou** (septembre-octobre 2003) et **Milan** (décembre 2003) n'ont pas permis la mise en application dès 2004 du **protocole de Kyoto**, enfin intervenue en 2005, grâce à sa récente ratification par la Russie. Sous l'impulsion du programme des Nations unies pour l'environnement (**PNUE**), les problèmes posés par les substances appauvrissant la couche d'ozone atmosphérique ont été traités à **Vienne** (1985) et surtout à **Montréal** (septembre 1987) où a été signé le protocole imposant une réduction de la production et de l'utilisation des chlorofluorocarbures



La station de mesure de Mace Head, en Irlande.

(CFC). Ce protocole a fait l'objet des amendements de **Londres** (1990), qui a imposé l'abandon des CFC au 1^{er} janvier 2000 et étendu la réglementation à d'autres produits (dont les HCFC), de **Copenhague** (1992), **Montréal** (1997) et **Pékin** (1999).