

Nouveau défi  
pour les  
techniciens

## Réfrigérants: le retour de flamme

Daniel Favrat  
Professeur EPFL  
Institut d'énergie  
industrielle

*En découvrant les CFC, on avait cru trouver la panacée. Or, aujourd'hui, les chlorofluorocarbures sont sur le banc des accusés pour tentative d'assassinat. Les victimes: l'ozone et la température actuelle de la planète. L'arrêt de mort est déjà signé, mais l'exécution des coupables s'accomplit dans la douleur. La mutation technologique qu'impose la disparition des CFC se présente en effet dans un climat lourd d'incertitudes. (Réd.)*

La maîtrise du froid artificiel, c'est-à-dire la capacité de «pomper» de l'énergie thermique d'un bas niveau de température à un niveau supérieur, atmosphérique par exemple, est relativement récente, puisque sa mise en œuvre industrielle date de la deuxième moitié du siècle passé.

### ■ L'âge d'or des CFC

La filière technologique qui s'est progressivement imposée consiste à capter la chaleur à basse température en évaporant un fluide de travail appelé réfrigérant, fluide qui, après compression mécanique, restitue l'énergie reçue en se condensant à une température plus élevée. Un élément important de ce succès a été la mise à disposition dès les années 30 d'une famille de réfrigérants apparemment idéaux, basés sur des molécules artificielles appelées chlorofluorocarbones (CFC) ou communément dénommées «fréon» du nom de marque déposé par un des premiers fabricants.

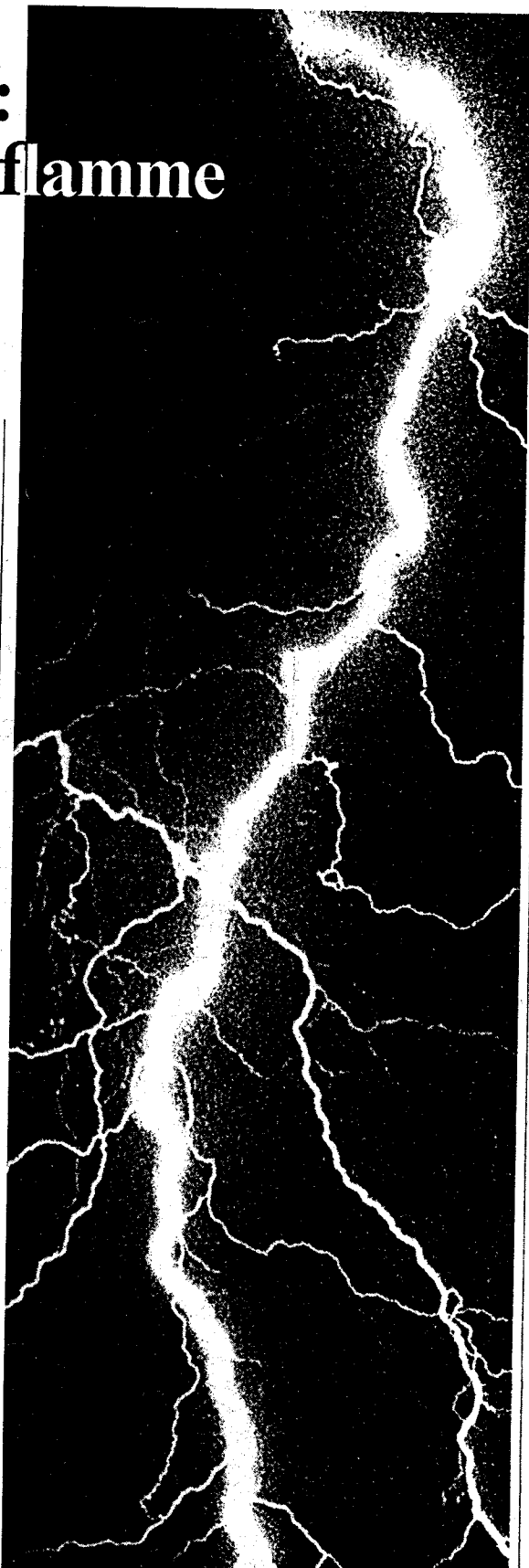
Contrairement à leurs prédécesseurs, comme l'éther ou le dioxyde de soufre qui furent la cause d'accidents, ces nouveaux fluides avaient

et compatibles avec l'un des meilleurs matériaux conducteurs thermiques et électriques: le cuivre. Ces propriétés conduisirent à son usage étendu, non seulement pour les pompes à chaleur au sens large (réfrigération, climatisation, chauffage) qui ne représentent que le quart de la consommation mondiale, mais aussi en tant qu'agent propulseur, agent moussant, produit extincteur, produit de nettoyage, etc.

### ■ La chute d'un Alien

Or, coup de tonnerre dans un ciel serein, ces fameuses molécules miracles pourraient, en réalité, être des «aliens» sur le vaisseau «terre», menaçant notre environnement global avec deux effets de premier ordre et distincts: la réduction de l'ozone stratosphérique et le réchauffement global de la planète.

L'ozone, comme l'explique Michel Rossi dans son article (pp. 30-33), est un gaz comprenant des molécules instables formées d'atomes d'oxygène et qui, finement distribuées dans la stratosphère, agissent comme un filtre à la fraction particulièrement dangereuse du rayonnement solaire ultraviolet. Le



par la présence de chlore ou de brome. Or les réfrigérants CFC, qui peuvent avoir une durée de vie de plusieurs centaines d'années, sont, au gré de phénomènes atmosphériques encore mal connus, véhiculés jusque dans la couche d'ozone où ils se décomposent sous l'effet des rayons ultraviolets en libérant leurs atomes de chlore. Les réactions chimiques sous l'action du chlore sont multiples et complexes, mais peuvent se résumer globalement par une action d'ordre catalytique permettant à chaque atome de chlore de détruire plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de molécules d'ozone.

## Manque de preuves

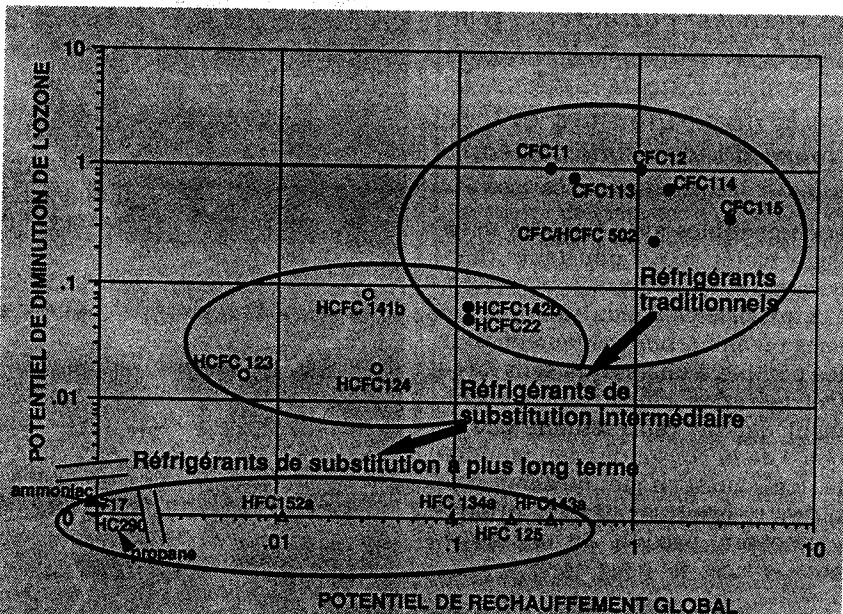
La réduction de la couche d'ozone qui en résulte devrait se traduire par une augmentation progressive des rayonnements nocifs à la surface de la terre, avec des effets directs sur l'homme (cancer de la peau, atteintes causées à la vue et au système immunitaire, etc.), sur les matériaux (peintures, plastiques), et sur la vie aquatique (réduction de l'activité de fixation du carbone du phytoplancton marin, etc.). Un effet indirect et paradoxal du rayonnement UV en surface est l'accélération de la formation photochimique d'ozone superficiel (troposphé-

rique), c'est-à-dire dans l'air que nous respirons et qui provoque des problèmes respiratoires et cardiaques, ainsi qu'une activation de phénomènes comme les pluies acides.

La thèse de la réduction de la couche d'ozone par les CFC, publiée en 1974, a été longtemps contestée faute d'évidences expérimentales. Malheureusement les campagnes de mesure entreprises depuis 1985 semblent confirmer la tendance et la dernière expédition arctique américaine (février 1992) suggère une évolution encore plus rapide que prévue.

## Controverses sous serre

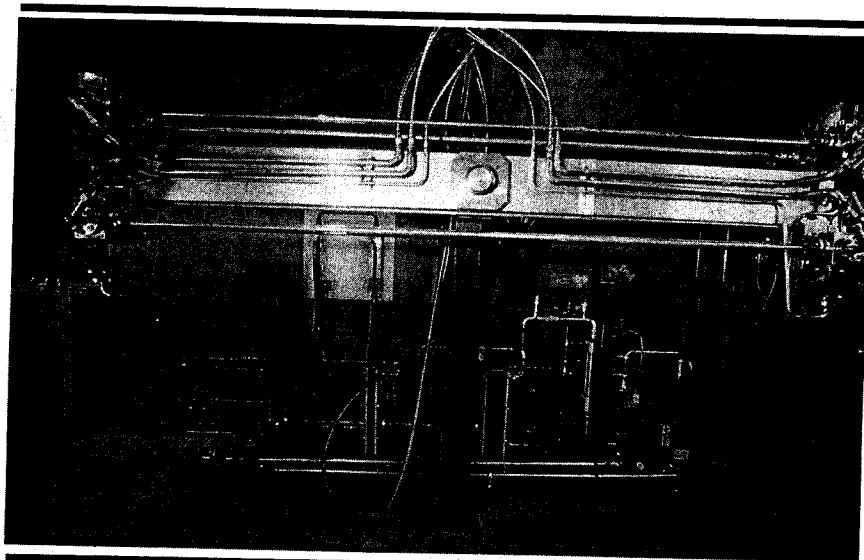
La deuxième préoccupation à grande échelle, mais encore controversée est le réchauffement global de la planète sous l'effet principal du gaz carbonique CO<sub>2</sub>, mais également des mêmes CFC. A titre de rappel, la majeure partie du rayonnement solaire reçu par la terre est réémis par sa surface sous forme de rayonnement infrarouge. Alors que les trois principaux gaz qui constituent plus de 99% de l'atmosphère (azote, oxygène et argon) laissent repartir ce rayonnement vers l'espace, d'autres composés gazeux, pourtant en infime minorité, comme le gaz carbonique, le méthane, la vapeur d'eau et les gaz de synthèse, dont les CFC, absorbent une partie de ce rayonnement infrarouge. Cet effet, appelé souvent effet de serre, contribue, dans des conditions normales, à maintenir les températures de surface que nous connaissons. Toutefois, l'augmentation rapide de la concentration de ces gaz absorbeurs associée à l'activité humaine est de nature à provoquer un déséquilibre entre les flux d'énergie et un réchauffement graduel de notre milieu naturel. Si la tendance semble progressivement se confirmer, le taux d'accroissement, ainsi que l'étendue des conséquences sont des sujets encore très controversés. Dans le cas des CFC le problème est encore compliqué par le fait que l'ozone, ozone stratosphérique inclus, est aussi un gaz absorbeur et sa diminution comporte également un effet refroidisseur qui est cependant estimé comme étant de moindre importance.



## Caractérisation des effets environnementaux des principaux réfrigérants

En raison de leur grande stabilité, les réfrigérants CFC (complètement halogénés comme le 12, 11, 113, 114) qui étaient les plus utilisés se retrouvent dans le carré supérieur droit du diagramme avec les effets les plus marqués. Dans la zone diagonalement intermédiaire, on trouve les réfrigérants dits HCFC qui, en raison de la présence d'un atome d'hydrogène, ont une durée de vie beaucoup plus faible et leur utilisation en guise de substitution offre déjà des perspectives d'amélioration considérable, compte tenu de l'échelle logarithmique des axes de représentation.

Sur l'axe horizontal on trouve l'ensemble des réfrigérants HFC qui ne contiennent pas de chlore et n'ont donc pas d'effet sur la couche d'ozone. Il est intéressant de noter à l'origine les points représentatifs de l'ammoniac, du butane et du propane qui sont des réfrigérants idéaux du point de vue environnemental, mais sont inflammables, et toxiques dans le cas de l'ammoniac. Ce qui n'empêche pas que l'ammoniac soit utilisé à large échelle dans les installations frigorifiques de grande puissance. L'extension de sa «zone d'influence» est sans conteste à venir.



Stand d'essai EPFL sur le transfert de chaleur des réfrigérants de substitution.

## Changer le comportement des utilisateurs

Le degré de toxicité environnementale des réfrigérants varie selon leur composition chimique et leur durée de vie estimée dans l'atmosphère. Les CFC font partie d'une famille importante de composés dérivés des molécules d'hydrocarbures comme le méthane  $\text{CH}_4$  ou l'éthane  $\text{C}_2\text{H}_6$ , dans lesquelles on a substitué des atomes du groupe des halogènes (fluor, chlore ou brome) aux atomes d'hydrogène. Etant donné le grand nombre de combinaisons possibles, il existe une classification internationale chiffrée permettant de distinguer les réfrigérants sur la base de leur composition chimique.

La figure (p. 42) montre le placement respectif des principaux réfrigérants par rapport à deux indicateurs environnementaux, le potentiel de diminution de l'ozone et le potentiel de réchauffement global. On constate que par rapport aux CFC, les réfrigérants HCFC ont une durée de vie plus courte grâce à leur atome d'hydrogène et représentent donc une formule de substitution provisoire relativement acceptable. L'ammoniac est lui aussi un réfrigérant idéal pour l'environnement, mais il est inflammable et toxique. A noter cependant que de nos jours, on l'utilise largement pour les installations frigorifiques

et la production de gaz à effet de serre, l'efficacité des systèmes de réfrigération joue un rôle primordial. Une récente étude américaine a montré que pour un réfrigérateur domestique actuel, la contribution au réchauffement global est de 7% sans récupération n'est que de 7%. Le passage à des réfrigérants HCFC ou HFC réduirait cette part à 1% seulement. Ces chiffres sont basés sur un nouveau critère définissant l'impact équivalent total sur le réchauffement (en anglais TEWI) et en considérant un horizon de 500 ans.

Cependant, les réactions démesurées prises dans le cas de la piste de bob des Jeux Olympiques d'Albertville, refroidie à l'ammoniac, avec distribution anticipée de masques à gaz, ainsi que les commentaires dénués de toute analyse des journalistes, ne semblent guère propices à favoriser une action raisonnée à ce sujet.

## Des effets pendant 500 ans

En ce qui concerne le réchauffement global, il convient d'être attentif à l'effet cumulé sur la durée de vie de l'équipement. Compte tenu du fait que plus de 63% de la production mondiale d'électricité résulte de processus de combustion avec émissions de gaz à effet de serre, l'efficacité des systèmes de réfrigération joue un rôle primordial. Une récente étude américaine a montré que pour un réfrigérateur domestique actuel, la contribution au réchauffement global est de 7% sans récupération n'est que de 7%. Le passage à des réfrigérants HCFC ou HFC réduirait cette part à 1% seulement. Ces chiffres sont basés sur un nouveau critère définissant l'impact équivalent total sur le réchauffement (en anglais TEWI) et en considérant un horizon de 500 ans.

C'est pourquoi la communauté internationale, par l'intermédiaire du Protocole de Montréal signé en 1987, renforcé en 1990 avec un resserrement complémentaire attendu cet automne, s'attaque en priorité à la protection de la couche d'ozone et introduit progressivement des mesures en vue d'éliminer la production de CFC dans un premier temps (horizon 96), puis les HCFC (horizon 2005) dont, pour certains, la production vient pourtant seulement de commencer!

## Une adaptation forcée, mais indispensable

Il n'en reste pas moins que cette situation implique pour l'industrie de la réfrigération une mutation technologique dans un climat lourd d'incertitudes. L'ensemble des composants des systèmes à réfrigérants doit être repensé, de nouvelles règles de conception doivent parfois être introduites et un effort tout particulier doit être fourni pour recréer les bases de propriétés thermodynamiques et thermophysiques des réfrigérants de substitution. Dans ce contexte, le Laboratoire d'énergétique industrielle de l'EPFL (voir photo) contribue notamment à l'acquisition de données expérimentales de transfert de chaleur en cours d'évaporation de réfrigérants HCFC ou HFC, comme le prometteur HFC134a. Cet effort s'inscrit dans le cadre d'une étude de l'Agence Internationale de l'Energie avec une participation de nombreux pays, dont le Canada, la Suède, la Norvège et les Pays-Bas, et vise à perfectionner les outils de conception indispensables à l'adaptation forcée des millions de systèmes à base de réfrigérants