



## Développement durable : progrès et défis du secteur du froid

### I. INTRODUCTION

Le froid est un secteur d'activité très vaste. Il a des applications dans un nombre considérable de domaines de la vie de tous les jours, en particulier dans les domaines de l'alimentation, la santé et la qualité de l'environnement intérieur. Le froid joue un rôle essentiel dans le développement durable. Toutefois, il existe un écart très important entre pays industrialisés et en développement sur le plan de la disponibilité des équipements, des connaissances et de la formation en matière de froid.

### II. LES TROIS DIMENSIONS DU DEVELOPPEMENT DURABLE

Les objectifs définis dans le programme Agenda 21 couvrent les dimensions sociale, économique et environnementale.

L'impact du secteur du froid et du conditionnement d'air sur la dimension **sociale** comporte de nombreuses facettes.

**Dans les pays industrialisés**, on peut distinguer les aspects suivants :

- le secteur du froid génère des emplois, en particulier dans les sphères industrielle, commerciale et des services ;
- en permettant de conserver des produits alimentaires périssables à tous les stades depuis la production jusqu'à la distribution, le froid améliore notablement l'approvisionnement des populations en denrées alimentaires ;
- grâce à l'amélioration de la sécurité alimentaire et à la mise au point de nouveaux matériels et outils dans le secteur médical (IRM, cryochirurgie et cryothérapie...), le secteur du froid fait progresser la santé ;
- le conditionnement d'air permet de créer des environnements de travail offrant la température et le taux d'humidité souhaités.

**Dans les pays en développement**, l'impact du froid, même s'il est moins marqué que dans les pays industrialisés en raison notamment du manque d'équipement et de l'insuffisance des transferts de technologie, est toutefois important dans les domaines suivants :

- dans le domaine de la santé, on peut souligner le rôle du froid dans la vaccination des populations contre les maladies infectieuses grâce aux réfrigérateurs utilisés pour l'entreposage des vaccins, et dans l'augmentation de l'espérance de vie qui en découle. La contribution du froid à l'éradication de la poliomyélite en est un bon exemple : en 2000, le nombre de cas de poliomyélite dans le monde a été inférieur à 3500, soit une baisse de 99 % par rapport aux 350 000 cas recensés en 1988 ;
- le conditionnement d'air contribue au développement socio-économique dans les régions chaudes et humides ;
- les techniques du froid jouent un rôle vital dans de nombreux domaines, notamment dans la sphère alimentaire où il est de la plus haute importance de réduire les pertes après récolte, d'améliorer la sécurité et l'hygiène alimentaires, de promouvoir le commerce international et d'améliorer l'approvisionnement des villes en produits alimentaires. Cela est également vrai dans le domaine de la santé, où il convient de prévenir les intoxications alimentaires causées par des micro-organismes pathogènes.

Du point de vue **économique**, les chiffres suivants résument et mettent en évidence la place occupée par l'industrie du froid : il y a aujourd'hui entre 700 et 1000 millions de réfrigérateurs domestiques, 240 millions d'appareils de conditionnement d'air et 300 000 000 m<sup>3</sup> d'entrepôts frigorifiques dans le monde. L'IIF a préparé un tableau indicatif (publié pour la première fois) montrant les ventes annuelles d'équipements frigorifiques, de conditionnement d'air et de pompes à chaleur, qui est présenté dans ce rapport. Il montre que le total des ventes annuelles se situe autour de 200 milliards de dollars (chiffres moyens pour l'année 2000), c'est-à-dire environ un tiers des ventes annuelles de

l'industrie automobile (sans les véhicules commerciaux). Néanmoins, l'écart entre pays développés et en développement reste important. L'exemple de la production annuelle de réfrigérateurs domestiques est à cet égard révélateur : en 1996, seulement 33 % des appareils fabriqués étaient destinés aux marchés des pays en développement, alors que 80 % de la population mondiale vit dans ces pays.

Du point de vue **environnemental**, les activités associées au froid ont deux composantes principales en termes de développement durable : le rejet dans l'atmosphère de certains gaz frigorigènes utilisés dans les appareils frigorifiques et les émissions de CO<sub>2</sub> générées lors de la production de l'énergie nécessaire au fonctionnement de ces appareils. Les émissions de CFC et, dans une moindre mesure, les émissions de HCFC, appauvrissent la couche d'ozone. Ces deux familles de frigorigènes contribuent également au réchauffement planétaire. Les HFC ont été développés pour remplacer les CFC et les HCFC, et n'ont pas d'effets nocifs sur la couche d'ozone. En revanche, ils contribuent au réchauffement planétaire. Dans le cadre du Protocole de Montréal adopté en 1987, 177 pays (au 31 juillet 2001) se sont engagés à prendre des mesures pour protéger la couche d'ozone. Ce protocole prévoit l'élimination progressive puis l'interdiction totale des CFC puis des HCFC, avec des échéances plus longues pour les pays de l'article 5 (pays en développement).

L'objectif du Protocole de Kyoto, qui n'a pas encore été ratifié par un nombre suffisant de pays pour entrer en vigueur, est de réduire, dans 39 pays développés, les émissions de six gaz à effet de serre d'au moins 5 % entre 1990 et 2008-2012. Les HFC font partie de ces six gaz à effet de serre.

L'amélioration de l'efficacité énergétique des appareils frigorifiques est une mesure essentielle pour réduire la principale contribution du secteur du froid au réchauffement planétaire, à savoir les émissions indirectes de CO<sub>2</sub> générées par la production et la consommation de l'énergie nécessaire au fonctionnement des appareils frigorifiques. D'après les estimations, les émissions de CO<sub>2</sub> représentent 80 % de la contribution totale du secteur au réchauffement planétaire. Les autres impacts indirects qu'il faut citer comprennent les émissions de substances polluantes (SO<sub>2</sub>, oxyde d'azote, etc.) associées à la production des composants, et les déchets provenant de la destruction des fluides frigorigènes, des huiles et des appareils eux-mêmes.

### **III. MISE EN OEUVRE : STRATEGIES, REALISATIONS ET LIMITES**

Parmi les réalisations récentes des acteurs du secteur du froid sur le plan du développement durable, la plus importante a été la contribution notable de ce secteur à la mise en œuvre du Protocole de Montréal relatif aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone. En 10 ans, l'industrie du froid a remplacé entièrement les CFC et les HCFC dans les équipements neufs par des frigorigènes non néfastes pour la couche d'ozone afin de protéger l'environnement mondial. Cette action a contribué à abaisser la concentration de chlore dans la stratosphère et à réduire l'appauvrissement de la couche d'ozone qui menaçait la vie sur Terre.

Les industries ont également profité de l'occasion pour passer, au cours de la dernière décennie, à des technologies de seconde génération offrant une efficacité énergétique supérieure. Le froid est l'un des seuls secteurs à avoir connu une refonte technologique complète respectueuse de l'environnement. Cela a été rendu possible grâce à la coopération des pays développés et en développement dans le cadre du Protocole de Montréal, au financement de nouvelles technologies par le Fonds multilatéral, et à la coopération internationale entre des organismes tels que l'IIF, le PNUD, le PNUE, l'ONUDI, la Banque mondiale, l'OMS et bien d'autres.

Le secteur du froid se prépare maintenant à affronter un autre enjeu environnemental pour le prochain millénaire : le réchauffement planétaire. Pour combattre le réchauffement mondial, les principales stratégies sont axées sur la réduction de la consommation d'énergie, la réduction des émissions de frigorigènes, la recherche et le développement sur les nouveaux frigorigènes et les technologies de substitution, et les améliorations à apporter dans la chaîne du froid et dans les systèmes de conditionnement d'air et de chauffage.

Les effets positifs sur l'environnement des stratégies mises en œuvre doivent être évalués sur la base d'une analyse qui prenne en compte l'impact environnemental global pendant tout le cycle de vie du système frigorifique. Ainsi, en ce qui concerne l'effet de serre, l'indice LCCP (Life Cycle Climate Performance) de performance climatique sur le cycle de vie entier, qui mesure les émissions totales de gaz à effet de serre, est sans aucun doute le critère le plus objectif.

**Dans les pays industrialisés**, les initiatives axées sur la réduction de la consommation d'énergie se sont traduites par des mesures couvrant tous les stades du cycle de vie des équipements frigorifiques :

- pendant la phase de conception : initiatives permettant d'améliorer les performances du système frigorifique et de ses composants ;
- lors de l'installation et de la mise en service : utilisation de procédures de réception rigoureuses intégrant la mesure de la consommation d'énergie des appareils ;
- pendant les opérations d'entretien et de réparation : utilisation de procédures d'intervention rigoureuses.

La normalisation est un moyen d'obtenir des mesures de référence objectives pour les appareils. Les procédures de contrôle de qualité comprennent de plus en plus un aspect formation, débouchant sur une certification des techniciens et

des installateurs. Cette pratique doit être plus largement utilisée et des progrès doivent aussi être encore réalisés dans l'harmonisation des normes.

Plusieurs chiffres illustrent de façon frappante les économies d'énergie réalisées. Les coefficients de performance (COP) des équipements frigorifiques sont améliorés en permanence mais il reste beaucoup à accomplir dans ce domaine.

Des mesures portant sur la réduction des émissions sont appliquées pendant tout le cycle de vie des appareils :

- pendant les phases de conception et de fabrication, les services de recherche et développement des fabricants cherchent plus particulièrement à optimiser l'étanchéité des appareils et à réduire la charge en frigorigène et la longueur des tuyauteries utilisées dans les circuits afin de réduire les émissions et de faciliter les opérations d'entretien et de réparation des appareils ;
- lors de l'installation, des procédures de contrôle qualité rigoureuses sont de plus en plus appliquées, en particulier concernant le confinement du frigorigène ;
- pendant les opérations d'entretien et de réparation, l'accent est mis sur l'étanchéité des appareils grâce à des contrôles réguliers et à la récupération du frigorigène lors de chaque intervention. La formation des installateurs, des propriétaires et des opérateurs à la manipulation des nouveaux frigorigènes et leur sensibilisation à la dimension environnementale ont permis de réaliser d'énormes progrès, mais il reste beaucoup à faire ;
- lors de la mise au rebut des équipements, la récupération du frigorigène et son recyclage ou sa réutilisation lorsque cela est possible (ou sa destruction dans le cas contraire) sont encouragés.

Si l'on regarde les réalisations, l'impact des CFC, des HCFC et des HFC sur l'appauvrissement de la couche d'ozone et le réchauffement planétaire a considérablement diminué, comme le montrent plusieurs indicateurs : diminution de la production de ces frigorigènes (pondérée en fonction de leurs contributions respectives à ces deux phénomènes) à partir de 1988 et 1989, et réduction de la part de ces frigorigènes dans le total des émissions de gaz à effet de serre.

Les initiatives de l'industrie du froid dans le domaine des technologies de substitution et des frigorigènes de remplacement (nouveaux frigorigènes HFC et frigorigènes remplaçant les fluorocarbures) représentent une avancée importante dans la mesure où elles mènent à une réduction des effets néfastes sur l'environnement.

Parmi les frigorigènes de type non-HFC développés pour remplacer les fluorocarbures, on porte une attention toute particulière à l'ammoniac, aux hydrocarbures et au dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).

En ce qui concerne les technologies de substitution qui offrent des solutions de remplacement intéressantes à la compression de vapeur, les recherches portent principalement sur les technologies d'adsorption et d'absorption avancées, le froid solaire, le refroidissement à déshydratant, les cycles à air, le cycle Stirling, le refroidissement thermoélectrique, etc.

Les progrès réalisés dans la chaîne du froid doivent être signalés : on attache aujourd'hui une importance croissante à la nettoyabilité afin de prévenir la contamination des produits alimentaires, à la polyvalence des équipements, à la régulation des conditions ambiantes, à la traçabilité des produits alimentaires, à l'information du consommateur et à la gestion des interfaces.

Sont à noter également les nouveaux développements dans les systèmes de conditionnement d'air et de chauffage. Depuis quelques années, on se préoccupe davantage de la qualité de l'air intérieur et de ses effets sur le confort, la santé et la productivité des occupants. Des progrès ont été réalisés dans le domaine de la ventilation, du contrôle à la source, de la gestion de l'humidité, et de la filtration/épuration de l'air.

L'efficacité énergétique prend plus d'importance dans l'optique de la construction durable, et plusieurs nouveaux concepts tels que le "chauffage basse température" et le "refroidissement haute température" sont apparus.

Au cours des 10 dernières années, les pays en développement se sont joints aux pays industrialisés pour éliminer progressivement les substances appauvrissant la couche d'ozone.

**Dans les pays en développement**, différentes actions positives ont été menées en faveur du développement durable, parmi lesquelles :

- les moyens financiers et techniques disponibles par le biais du Fonds multilatéral du Protocole de Montréal ont été mis à profit pour transférer vers les pays en développement des technologies sans effets nocifs sur la couche d'ozone. Sur les 1,3 milliard de dollars fournis par ce Fonds jusqu'à présent, près de 60 % sont utilisés pour le secteur du froid ;
- des plans de gestion de frigorigènes ont été mis en place dans de nombreux pays par le biais de programmes de coopération tels que le Programme ActionOzone du PNUE et les réseaux d'experts mondiaux de l'IIF. Chaque plan de gestion de frigorigènes comporte une phase initiale de diagnostic, préalable essentiel aux mesures et aux

programmes de formation en faveur du développement durable, et des actions de formation organisées pour les techniciens du froid et les douaniers.

Toutefois, l'expansion du secteur du froid dans les pays en développement a des limites qui doivent être soulignées :

- la formation des installateurs et des techniciens du froid aux bonnes pratiques n'est pas accessible à tous ;
- l'entretien insuffisant des installations provoque d'importantes fuites de frigorigènes et d'autres dysfonctionnements des appareils ;
- les installations de régénération et de destruction des frigorigènes sont trop peu nombreuses et dispersées.

Une analyse sectorielle permet d'identifier les mesures mises en œuvre dans chaque secteur (froid domestique, froid commercial, entreposage frigorifique, froid industriel, conditionnement d'air unitaire, refroidisseurs d'eau, transport, conditionnement d'air mobile) pour atteindre les objectifs fixés : réductions des émissions, mesures d'efficacité énergétique, mise au point de nouvelles technologies et de nouveaux frigorigènes, reconversion des appareils pour utiliser de nouveaux frigorigènes.

#### **IV. DEFIS**

Au cours des années à venir, de nombreuses questions vont se poser à l'industrie du froid au regard du développement durable ; il lui faudra résoudre certains problèmes nécessitant des solutions durables (énumérés à la partie II) et étendre les actions qui ont déjà été menées (partie III).

##### ***Pays industrialisés***

La plupart des spécialistes estiment que les systèmes à compression de vapeur représenteront probablement la tendance dominante des 20 prochaines années.

L'enjeu sera de mettre au point des systèmes à compression de vapeur respectueux de l'environnement, offrant une efficacité énergétique supérieure, robustes et durables, économiques et sans danger pour les usagers. Les principes étant posés, un certain nombre d'objectifs concrets peuvent être fixés pour les 20 années à venir, en prenant l'année 2000 comme référence :

- réduire la consommation énergétique de 30 à 50 % ;
- réduire de moitié les fuites de frigorigènes ;
- améliorer de 30 à 50 % le LCCP (indice de performance climatique sur le cycle de vie) ;
- réduire la charge en frigorigène de 30 à 50 %.

Toutefois, fixer des objectifs quantitatifs n'a de sens que si des valeurs de référence fiables sont définies et validées. Certaines technologies et applications utilisant des systèmes à compression de vapeur ont un rôle important à jouer dans la réalisation de ces objectifs, comme par exemple :

- la construction durable : elle n'est possible que si l'efficacité énergétique est prise en compte dès le début du processus de conception des bâtiments ;
- le conditionnement d'air mobile : on prévoit qu'en 2010, les émissions de frigorigènes provenant des équipements de conditionnement d'air des véhicules en Europe représenteront environ 50 % de la totalité des émissions de frigorigènes. Pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, il faudra réfléchir sérieusement aux moyens d'arriver à une réduction de la consommation de combustible associée au conditionnement d'air. Ce domaine représente pour l'industrie du froid l'un des plus formidables défis qu'elle devra relever dans l'avenir ;
- les pompes à chaleur constituent un moyen efficace de diminuer les émissions de CO<sub>2</sub>. Le potentiel de réduction de ces émissions est d'environ 6 % du total des émissions de CO<sub>2</sub> dans le monde, total qui s'élève à 22 000 Mt/an. Avec les technologies du futur, ce potentiel pourrait atteindre 16 % dans les applications résidentielles, commerciales et industrielles.

Ce rapport explore également les technologies et les applications du froid, autres que les systèmes à compression de vapeur, qui sont sans aucun doute appelées aussi à jouer un rôle important dans la poursuite des objectifs du développement durable :

- les systèmes de refroidissement par absorption et adsorption, assez souvent alimentés par du combustible, représentent un moyen pratique de fournir du froid à la fois commercial et industriel sans ponctionner lourdement des infrastructures de distribution d'électricité encore peu développées, et donc sans peser non plus sur le capital de développement limité dont disposent la plupart des pays en développement. Le conditionnement d'air par absorption, sous la forme de refroidisseurs à absorption de grande taille desservant des locaux commerciaux ou industriels étendus, est l'application la plus répandue aujourd'hui de ces technologies. Son principal inconvénient

reste une faible efficacité énergétique. Il faudra de nouvelles améliorations et simplifications pour que cette technologie puisse être plus largement utilisée ;

- le froid solaire devrait être la solution durable privilégiée dans les pays en développement. La demande croissante de glace pour la conservation et le transport des produits périssables, le développement de l'entreposage frigorifique pour les denrées alimentaires, la congélation des produits frais et cuisinés, le conditionnement de l'air, ne sont que quelques exemples des applications potentielles de cette technologie. Les premières mesures à prendre consistent à mettre en place les infrastructures nécessaires à la production des appareils frigorifiques solaires et d'organiser des programmes de formation à l'exploitation et à la maintenance de ce type d'équipements ainsi qu'à la conception et au contrôle ;
- la technologie de refroidissement à déshydratant comprend un large éventail de systèmes de refroidissement, de déshumidification et de ventilation permettant de contrôler la qualité de l'environnement intérieur dans les secteurs industriel et commercial. Mais de nombreux problèmes techniques et de fabrication doivent encore être résolus ;
- la trigénération (production simultanée d'électricité, de chaleur et de froid) présente d'énormes avantages sur le plan énergétique. Elle permet d'utiliser partiellement ou totalement, pour des applications frigorifiques, la chaleur rejetée pendant la production d'électricité. La mise au point de systèmes à absorption à haute performance améliorera les résultats obtenus par les installations de trigénération ;
- la cryogénie est un domaine qui englobe toutes les techniques du froid permettant d'obtenir des températures inférieures à 120 K (-150 °C) jusqu'à 4,2 K. Elle a ouvert la voie à un large éventail d'applications compatibles avec le développement durable. La supraconductivité est l'une des technologies cryogéniques les plus prometteuses. La cryomédecine et sa composante cryochirurgicale apportent et continueront d'apporter une contribution importante au développement durable ;
- de nombreuses autres technologies compatibles avec le développement durable, comme les cycles à air et le cycle Stirling ainsi que le refroidissement thermoélectrique, sont en cours de développement ou font l'objet de recherches.

### ***Les domaines d'action prioritaires dans les pays en développement***

- la réduction des pertes après récolte : les denrées alimentaires périssables représentent 31 % du volume total des produits alimentaires consommés dans les pays en développement. Dans ces régions du monde, seulement 1/5<sup>e</sup> des aliments périssables sont réfrigérés, ce qui entraîne des pertes élevées après la récolte, l'abattage, la cueillette ou la traite, puis durant le transport et enfin pendant la vente. Le froid est l'un des moyens les plus efficaces pour réduire ces pertes, mais les aspects économiques doivent être résolus ;
- la mise en place de chaînes du froid : assurer la qualité et la sécurité alimentaires aux 5 milliards d'habitants des pays en développement grâce à la mise en place de chaînes du froid performantes est l'un des défis majeurs que l'industrie du froid doit relever ;
- le transfert des technologies : l'un des moyens d'améliorer les initiatives prises dans les pays en développement est de partager les technologies, le savoir-faire et les informations dont disposent les pays développés, y compris les normes et les programmes de certification ;
- le renforcement des structures : il est important de définir un ministère chargé de gérer la politique du froid au niveau national. Les organismes et associations professionnels jouent un rôle indispensable en fédérant les différents acteurs du froid. D'autre part, il faut disposer au niveau national d'une association neutre qui soit reconnue par la profession et agréée par le gouvernement. Un organisme inter-ministériel et interprofessionnel tel qu'un conseil national du froid peut apporter une contribution essentielle à la définition de plans sectoriels comprenant des inventaires des équipements existants et un programme de développement à long terme pour l'industrie du froid ;
- la collecte de données : recenser précisément les besoins des pays en développement est une étape préliminaire essentielle pour pouvoir concevoir des programmes et des actions ciblées dans les différents domaines concernés : structures, technologies, formation.

Dans les pays industrialisés comme dans les pays en développement, la formation constitue la clé de voûte du progrès dans tous les domaines du froid : conception, installation, exploitation et maintenance des équipements frigorifiques.

En conclusion, les principaux défis à relever par le secteur du froid peuvent être résumés de la façon suivante :

### ***Pays industrialisés***

- évaluer l'impact environnemental des systèmes frigorifiques en se servant du concept LCCP et en normalisant son mode de calcul, et de promouvoir l'emploi de ce concept de calcul par toutes les parties prenantes ;
- considérer l'ensemble du système et pas seulement le frigorigène ;
- concevoir des équipements ayant une puissance frigorifique la plus réduite possible, en attachant notamment une grande importance à l'isolation qui doit être bien calculée et performante ;
- garder à l'esprit que le premier objectif d'un appareil frigorifique est de permettre la consommation de produits alimentaires de haute qualité ou d'assurer une qualité d'air intérieur élevée ;
- accorder la plus grande importance à une bonne maintenance : elle permet de réduire les fuites et d'améliorer l'efficacité énergétique ;

- récupérer, recycler, régénérer ou détruire, selon des procédures normalisées, les frigorigènes, les lubrifiants et les autres matériaux utilisés dans les équipements frigorifiques ;
- continuer d'améliorer l'efficacité énergétique ;
- exploiter les possibilités des technologies à base de pompe à chaleur pour diminuer la consommation énergétique en utilisant des énergies renouvelables ou de la chaleur récupérable.

### **Pays en développement**

- rendre le froid accessible aux pays en développement, en particulier les moins développés, pour la conservation des produits alimentaires, l'industrie et le conditionnement d'air ;
- fixer comme règle que les pays en développement ont les mêmes droits aux technologies du froid que les pays développés ;
- tirer parti des progrès technologiques actuels pour passer directement à des pratiques fiables, économiques et respectueuses de l'environnement en encourageant les transferts de technologie et en développant la formation ;
- ne pas vendre à bas prix aux pays en développement des technologies anciennes, polluantes et très consommatrices d'énergie, même si les coûts initiaux très bas semblent alléchants.