



Tendances dans le choix des frigorigènes selon les applications

Résumé

Il n'y a pas de règles générales dans le choix des frigorigènes. Il y a, certes, les 5 critères classiques : critères thermophysiques, technologiques, économiques, de sécurité et d'environnement ; mais à ces critères viennent s'ajouter les réglementations et les normes locales et les critères "culturels" liés aux métiers, aux applications, au poids des habitudes et aux formations des opérateurs. La meilleure approche pour présenter les évolutions et les tendances est de raisonner application par application.

Les 8 applications suivantes sont analysées : froid domestique, froid commercial, froid industriel (entreposage, agro-alimentaire, autres industries), transport frigorifique terrestre, transport frigorifique maritime, conditionnement d'air unitaire et pompes à chaleur, conditionnement d'air à groupes refroidisseurs d'eau, conditionnement d'air mobile.

Pour chacune d'entre elles des chiffres nationaux et mondiaux sont donnés permettant de caractériser l'importance économique du secteur d'application puis les tendances dans le choix des frigorigènes (HFC, ammoniac, hydrocarbures, CO₂, etc.) sont analysées et, enfin, certaines orientations pour le futur sont esquissées.

Introduction

Il n'y a pas de règles générales dans le choix des frigorigènes. La meilleure approche pour présenter les tendances dans le choix des frigorigènes est de raisonner application par application. Huit applications sont présentées : froid domestique, froid commercial, froid industriel, transport frigorifique terrestre, transport frigorifique maritime, conditionnement d'air unitaire et pompes à chaleur, conditionnement d'air à groupes refroidisseurs d'eau, conditionnement d'air mobile.

Seuls sont présentés les frigorigènes non réglementés par le Protocole de Montréal et par le Règlement européen 2037/2000.

1. Froid domestique

La production mondiale en 1996 s'est élevée à 83 millions d'appareils dont 33 millions dans les pays en développement [1]. Le parc mondial peut être estimé à 1 milliard d'appareils soit 1 appareil pour 6 habitants. Le parc français est estimé à 37 millions d'appareils [2] soit 1,7 appareil (réfrigérateur et congélateur) par ménage puisqu'il y a 21,9 millions de ménages en France [3].

La technologie la plus répandue est celle du cycle à compression de vapeur en utilisant des compresseurs à pistons. Au fil des ans les constructeurs ont conçu des appareils extrêmement fiables avec des technologies propres aux réfrigérateurs : détendeur de type capillaire; condenseur à serpentin soudé sur treillis en fils d'acier, évaporateur roll-bond, etc. Un compresseur de réfrigérateur fonctionne 100 000 heures sans problèmes, alors que la durée de vie du moteur d'une voiture est de l'ordre de 2500 heures.

Des réfrigérateurs à absorption (couple ammoniac-eau) ont été développés pour les hôtels et les camping-cars. Les réfrigérateurs à pétrole sont à signaler dans les zones non desservies par l'électricité.

La thermoélectricité est utilisée pour les glacières de voitures ou de camping-cars. On atteint aujourd'hui des puissances frigorifiques de 300 W avec ces appareils. On est donc assez près des puissances requises pour les réfrigérateurs ménagers qui ont des puissances frigorifiques de 400 à 500 W pour des puissances électriques absorbées de 100 à 150 W. Toutefois l'efficacité énergétique est loin d'égaliser celle de la compression de vapeur.

Depuis 1992-1994, les frigorigènes utilisés sont le R134a et l'isobutane. Les experts s'accordent pour attribuer aux 2 frigorigènes des performances similaires en termes de puissance frigorifique et d'efficacité énergétique [4]. Après quelques années d'utilisation le mélange propane/isobutane a été abandonné notamment pour des raisons de bruit. Les réfrigérateurs utilisant l'isobutane représenteraient 50 % des ventes en Europe. Aux USA tous les réfrigérateurs utilisent du R134a. Dans la mesure où les fuites sont très faibles et où les émissions directes ne représentent qu'environ 1 à 2% du TEWI (Total Equivalent Warming Impact), le frigorigène n'a, finalement, que très peu d'importance en termes d'effet de serre. En revanche la consommation électrique, qui représente 98 à 99% du TEWI est le facteur prépondérant par rapport aux changements climatiques. Il est important de rappeler que les réfrigérateurs ménagers consomment de l'ordre de 5% de l'électricité des pays développés [5].

L'isolation qui favorise la réduction de la consommation d'électricité est particulièrement importante. Il y a lieu de rappeler que la masse d'agent gonflant dans l'isolation représente de l'ordre de 4 fois la masse du frigorigène. Bien que l'importance de l'agent gonflant en termes d'effet de serre soit prépondérante, il est curieux de constater que les débats portent avant tout sur le frigorigène. Les mousses utilisent essentiellement 2 types d'agents gonflants : le R141b et les pentanes (cyclopentane et mélanges de cyclopentane et d'isopentane ou d'isobutane). En Europe, ce sont ces derniers qui sont dominants alors qu'aux USA c'est le R141b. Pour l'avenir il y aura vraisemblablement 2 grandes familles : les mousses aux pentanes et celles utilisant des agents gonflants tels que le R245 fa, le R365 mfc et le R134a. Logiquement c'est la mousse dont le coefficient global de transmission thermique est le plus faible qui devrait dominer.

Afin de réduire la consommation d'énergie des réfrigérateurs plusieurs voies sont explorées parmi lesquelles le moteur linéaire qui consommerait 50 % d'énergie en moins par rapport aux moteurs actuels et les panneaux isolants sous vide. Il s'agit, en fait, de bonds technologiques qui peuvent prendre des décennies avant de voir le jour. L'étiquetage énergétique maintenant réglementaire en France [6] et en Europe [7] a démontré son efficacité. L'acheteur a modifié ses critères d'achat pour s'orienter vers des appareils qui consomment moins.

2. Froid commercial

En France il y a entre 8000 et 9000 super et hypermarchés dans lesquels le linéaire de meubles de vente est estimé à 775 km [8]. Dans les quelques 160 000 commerces alimentaires de détail de proximité on estime entre 400 et 500 km le linéaire de présentoirs frigorifiques. Les produits frais et surgelés achetés par les ménages et les restaurateurs représentent plus de la moitié, en valeur, de la totalité des achats alimentaires.

Il convient de rappeler que la surface du froid alimentaire ne représente que 22 % de la surface totale des GMS (grandes et moyennes surfaces) et que les meubles pour produits surgelés représentent 25 % de la longueur totale de linéaires de meubles de ventes [8].

Il y a 2 grandes catégories d'équipements : les meubles à groupe logé et les systèmes à centrales frigorifiques.

Les meubles à groupe logé sont essentiellement utilisés dans les magasins de proximité ; on les rencontre, aussi, en appoint dans les grandes surfaces. Ils présentent l'avantage d'avoir une charge en frigorigène relativement réduite et d'avoir des circuits très étanches. Ils utilisent très généralement du R134a pour les produits frais et du R404A pour les surgelés. Il existe quelques meubles fonctionnant au R600a avec des charges allant jusqu'à 800 g dans des pays étrangers [9].

Dans les supermarchés, pendant des décennies le concept était celui de la centrale frigorifique alimentant en détente directe les meubles du magasin. Aujourd'hui il y a foisonnement de nouveaux concepts. Il est cependant difficile de dire quelle sera la solution de l'avenir.

Les lignes de force de ces nouveaux concepts sont : une faible charge en frigorigène ; un confinement du frigorigène amélioré ; la recherche de flexibilité (notamment pour les réaménagements périodiques des magasins).

Les architectures et frigorigènes les plus fréquemment rencontrés sont :

- Systèmes centralisés en détente directe utilisant du R404A (parfois du R507) à la fois pour les basses et les moyennes températures. Le CO₂ est parfois utilisé comme frigorigène de l'étage basse pression en cascade.
- Systèmes décentralisés comprenant plusieurs petites installations. Ce concept qui permet de réduire la charge de moitié est plus répandu aux USA, car il demande plus d'espace.
- Les systèmes indirects suscitent beaucoup d'intérêt. Le frigorigène est en général du R404A (ou du R507). Toutefois il y a en Europe plus de 50 installations utilisant l'ammoniac et 10 utilisant les hydrocarbures [1].
- Il y a de nombreux développements au niveau des frigoporteurs avec les classiques solutions alcoolisées, mais aussi la réapparition des saumures (chlorure de calcium, formiate de potassium) [10], le CO₂ diphasique liquide-vapeur et les coulis de glace liquide-solide.

C'est un domaine où les concepts de TEWI et de LCCP (Life Cycle Climate Performance – Impact sur le climat au cours du cycle de vie) ne sont pas véritablement pris en compte puisque les systèmes indirects sont très prisés alors qu'ils ont globalement un TEWI plus élevé notamment pour les applications à basses températures.

Si les recherches et développements sont si nombreux dans ce domaine cela est dû au GWP relativement élevé du R404A (3260), aux quantités importantes de frigorigène et aux taux de fuite encore grands dans les installations en détente directe.

3. Froid industriel : entreposage frigorifique, agro-alimentaire, autres industries

Il s'agit d'un domaine qu'il est difficile de caractériser par des chiffres tant il est diversifié. Les tendances dans ce domaine sont les suivantes :

- Augmentation de l'usage de l'ammoniac dans les installations de moyennes et fortes puissances (il n'y a pas de compresseurs de moins de 50 kW).
- Développement de la puissance des évaporateurs à détente sèche (à surchauffe) en remplacement des évaporateurs noyés (jusqu'à 300 kW) de façon à réduire la charge [4].
- Utilisation du R404A (ou du R507) en détente sèche dans les installations de moyenne puissance (<300 kW). On utilise très peu le R404A dans les systèmes à recirculation même si son intervalle de distillation est petit et qu'il a été démontré qu'il n'y avait pas de modification significative de la composition du mélange.
- Intérêt marqué pour le R410A pour les applications basses températures pour sa puissance frigorifique massique élevée (1 kg de R410A délivre 50% de puissance frigorifique supplémentaire par rapport à 1 kg d'ammoniac). Il reste toutefois à développer des composants de puissance moyenne et élevée.

- Le R134a est utilisé dans les installations de petite puissance pour les températures supérieures à 0°C.
- Intérêt pour le CO₂ notamment pour les applications à basses températures (surgelés, crèmes glacées). Le couple ammoniac (étage haute pression), CO₂ (étage basse pression) est appelé à un grand avenir. Il tend à remplacer l'ammoniac seul [4].
- Intérêt marqué pour les frigoporteurs. De tous temps les systèmes indirects ont été utilisés en agro-alimentaire (stations fruitières, conservation des abats, laiteries...) pour un réglage très fin des températures. Aujourd'hui s'y ajoute l'avantage de réduire la charge en frigorigène. Les frigoporteurs sont très divers. Le CO₂ en tant que frigoporteur a fait l'objet, dernièrement, de nombreuses réalisations en agro-alimentaire en France.
- On cite enfin des développements avec des hydrocarbures. Ils ont d'ailleurs toujours été utilisés pour certaines installations industrielles dans lesquelles la maîtrise des risques est assurée.
- Recherche d'économies d'énergie. Dans un entrepôt, la consommation d'énergie représente de 10 à 15% des dépenses totales de fonctionnement [11]. Les entrepôts de grande hauteur permettent des réductions importantes des consommations (passage de 30 à 50 kWh/m³.an en moyenne à 16 kWh/(m³.an)).

4. Transport frigorifique terrestre

Il y a dans le monde de l'ordre de 1 000 000 véhicules routiers et 80 000 wagons de transport frigorifique [1]. En France on estime à 60 000 le nombre de véhicules frigorifiques [2] et à environ 10 000 le nombre de véhicules réfrigérants et isothermes.

Les véhicules sont des porteurs, des semi-remorques ou des attelages ayant des groupes frigorifiques autonomes (ayant leur propre moteur thermique d'entraînement). Les camionnettes et petits camions sont souvent de type poulie-moteur, c'est-à-dire que le moteur du véhicule entraîne, par une courroie, le compresseur.

Le transport combiné rail-route avec utilisation de caisses mobiles n'a pas concrétisé sa percée des années 1990 en raison des coûts plus élevés et de la moins grande flexibilité du procédé par rapport au transport routier. Le ferroutage de véhicules entiers n'a pas connu, non plus, de grands développements en France.

Le frigorigène le plus employé aujourd'hui est le R404A car il peut être utilisé dans de bonnes conditions d'efficacité énergétique aussi bien pour le transport des produits frais que des produits surgelés et chacun sait que le nombre de véhicules polyvalents de classe C de l'ATP représente la majorité (63 %) des véhicules frigorifiques [12]. L'inconvénient du R404A est qu'il a un GWP de 3260 et que l'application transport conduit à des fuites non négligeables. Le R134a est parfois utilisé pour le seul transport des produits frais. Parmi les autres frigorigènes on cite le R410A. La température élevée en fin de compression nécessite de pratiquer une injection de liquide à l'aspiration qui diminue le COP du système. On cite aussi des essais avec des hydrocarbures ou du CO₂.

La technique de l'adsorption solide utilisant l'ammoniac comme frigorigène n'a pas abouti jusqu'à présent, malgré des travaux de recherche-développement considérables.

Des laboratoires travaillent sur la définition d'un étiquetage énergétique.

Les isolants utilisent pour la plupart des agents gonflants de type R141b qui seront interdits en Europe au 1er janvier 2004 pour les équipements neufs de transport frigorifique. Là encore l'avenir est incertain. Utilisera-t-on le R245fa, le R365mfc, des pentanes ou d'autres agents gonflants ? La disponibilité des molécules de HFC, leur coût, les propriétés de conductivité et de résistance mécanique, les propriétés d'adhérence aux parements, les propriétés d'inflammabilité et celles de vieillissement seront autant de facteurs de choix.

5. Transport frigorifique maritime

Il y a aujourd'hui dans le monde 715 000 TEU (Twenty-foot Equivalent Unit ; unité équivalente de 20 pieds). En 1998 il a été livré 96 500 TEU dont 500 conteneurs isothermes et 96 000 conteneurs frigorifiques [13]. La tendance est donc clairement en faveur des conteneurs autonomes frigorifiques. Ce sont des merveilles de technologie qui peuvent transporter pendant des semaines, voire des mois, des denrées périssables dans des conditions extrêmement stables de température, d'humidité et d'atmosphère contrôlée.

Dans ce secteur c'est le R134a qui domine. Ceci se comprend pour les produits frais qui sont les plus répandus. Pour les surgelés on utilise soit le R134a, ce qui est surprenant en raison de ses piètres performances énergétiques à basses températures, soit le R404A.

Sur les navires frigorifiques les frigorigènes dominants, hormis le R22, sont le R410A, le R407C et le R404A. En 1993, cinq navires frigorifiques utilisant l'ammoniac ont été construits. Depuis l'ammoniac n'est plus utilisé sauf sur les navires de pêche. Les systèmes indirects sont largement utilisés avec des saumures telles que le chlorure de calcium et des échangeurs à plaques [13]. Toutefois les navires frigorifiques sont en déclin devant la percée des conteneurs autonomes (il ne subsistait en 1999 que 861 navires frigorifiques de plus de 100 000 pieds cubes). En revanche, la flotte des porte-conteneurs évolue en proportion. On en compte aujourd'hui plus de 4000 [13].

6. Conditionnement d'air unitaire et pompes à chaleur (systèmes refroidisseurs d'air)

Typiquement la puissance frigorifique de ces appareils (conditionneurs d'air ou pompes à chaleur) va de 2 à 420 kW [1].

C'est un domaine où les ventes se sont accrues considérablement notamment celles des conditionneurs d'air individuels pour une pièce ou pour un ensemble de pièces. Les ventes mondiales en 2000 se sont élevées à 29,9 millions d'appareils de type bibloc et à 9,8 millions d'appareils pour les systèmes de type monobloc [14]. C'est le quart du parc estimé d'appareils de ces 2 types en 1996 (168 millions d'appareils) [1].

Au plan des frigorigènes le R22 est encore très utilisé aux USA. L'Europe s'est orientée vers le R407C, sans doute parce que, en raison de la réglementation européenne, elle n'a pas eu le temps de développer d'emblée les appareils au R410A. Le Japon, quant à lui, a une politique volontariste d'utilisation du R410A. On peut penser que dans ce domaine l'avenir est au R410A notamment pour les petites puissances grâce à ses bonnes performances énergétiques et aussi parce qu'il s'agit d'un mélange quasi azéotrope. Pour les moyennes puissances et les puissances supérieures à 100 kW c'est le R407C et le R134a qui sont sans doute les plus utilisés.

Le propane est utilisé pour des appareils portables ; mais les ventes des appareils portables sont en diminution au profit des appareils de type bibloc. Le CO₂ est utilisé dans certaines pompes à chaleur.

Les systèmes de conditionnement d'air unitaires constituent un domaine où les HFC sont indispensables.

7. Conditionnement d'air à groupes refroidisseurs d'eau

La gamme de puissance de ces appareils est très étendue. Elle va de 7 à 35 000 kW [1]. Le frigorigène utilisé dépend essentiellement du compresseur et de la puissance.

Les types de compresseurs utilisés en fonction de la puissance sont résumés dans le tableau 1 [1]

:

Tableau 1 : Types de compresseurs utilisés dans les systèmes de conditionnement d'air à groupes refroidisseurs d'eau en fonction de la puissance frigorifique

Type de compresseur	Fourchette de puissance frigorifique
Scroll et pistons	7 à 1600 kW
Vis	140 à 1600 kW
Centrifuge	350 à 35 000 kW

Pour les fortes puissances on utilise des compresseurs centrifuges pour lesquels on préfère le R134a car c'est un corps pur. De plus les refroidisseurs de grande capacité (plus de 700 kW) sont équipés d'évaporateurs noyés qui ne fonctionnent correctement qu'avec des fluides purs ou azéotropiques. Les bonnes propriétés de transfert de chaleur du R134a sont également un atout. Par ailleurs, il est bien connu qu'on ne peut pas employer l'ammoniac avec les compresseurs centrifuges, sauf à multiplier le nombre d'étages.

Pour les refroidisseurs de moyennes puissances fonctionnant en détente sèche avec des compresseurs volumétriques, le R407C constitue une option appréciée et très répandue. L'intervalle de distillation élevé du R407C ne permet pas de l'utiliser avec des évaporateurs noyés. Dans cette gamme de puissance, on cite de nombreuses installations utilisant l'ammoniac dans des pays voisins de la France. Les charges en frigorigène sont de l'ordre de 0,15 kg/kW avec l'ammoniac avec des variations allant de 0,04 à 0,25 kg/kW et 0,35 kg/kW avec le R134a [1].

Des recherches sont conduites sur des refroidisseurs refroidis par eau utilisant le CO₂ et on cite une installation de conditionnement d'air en Allemagne utilisant la vapeur d'eau comme fluide actif, mais il s'agit bien plus d'une prouesse technologique que d'une application courante [1].

Les refroidisseurs d'eau à absorption ne sont pas fréquents en France en raison de la tarification électrique estivale. En revanche, dans les pays de l'Extrême-Orient (Japon, Corée, Chine), où des politiques en faveur de l'utilisation du gaz ont été mises en place, cette technologie est très répandue.

Cependant, en France la surface climatisée au gaz serait passée de 1% de l'ensemble de la surface climatisée en 1998 à 8% (soit 550 000 m²) en 2000 [15].

8. Conditionnement d'air mobile

C'est le secteur qui connaît le développement le plus rapide. C'est aussi le secteur qui appelle le plus d'attention vis-à-vis de l'environnement. On considère, en effet, qu'en Europe les émissions de frigorigènes provenant du conditionnement d'air automobile représenteraient en 2010 de l'ordre de 50% des émissions de HFC et qu'il y aurait, à cette date, à peu près la même quantité de HFC dans les circuits du conditionnement d'air mobile que dans toutes les autres installations de froid et conditionnement d'air [16].

Le fluide frigorigène universellement utilisé est, jusqu'à présent, le R134a dans les équipements neufs et ce depuis fin 1994.

L'utilisation du propane dans des systèmes indirects de refroidissement fait l'objet de travaux. La puissance frigorifique volumétrique du propane est de 15% supérieure à celle du R134a ; mais le système indirect augmente la consommation d'énergie d'environ 20% [3]. Globalement les 2 architectures ont des performances énergétiques proches.

Le CO₂ nécessite des développements plus longs ayant trait à la fiabilité des composants, au développement de tubes résistants aux pressions élevées, au poids accru des systèmes et à l'efficacité énergétique somme toute médiocre des compresseurs.

Mais, entre temps, la production de masse d'appareils au R134a et les développements constants font que les performances du R134a s'améliorent aussi.

Des systèmes hybrides constitués par des compresseurs hermétiques au R134a alimentés électriquement peuvent aussi modifier les choses.

Dans ce domaine il est bien difficile de prévoir quel frigorigène sera demain le plus répandu. Le vainqueur sera sans doute le fluide actif qui démontrera la meilleure performance énergétique.

Conclusion

En conclusion les tendances qui se dessinent début 2002 dans le choix des frigorigènes sont les suivantes :

- Le R134a est le frigorigène dominant utilisé soit pur dans des applications telles que le froid domestique, le conditionnement d'air mobile, les refroidisseurs d'eau de forte capacité, les meubles de vente à groupe logé, etc., soit en mélange dans des fluides tels que le R404A, le R507 ou le R 407C.
- L'isobutane a fait une percée en froid domestique où il fait jeu égal avec le R134a sauf aux USA et au Japon où le R134a est dominant.
- Le R404A est dominant en transport frigorifique routier et en froid commercial.
- Le R410A montre des signes très prometteurs en conditionnement d'air unitaire.
- Le R407C utilisé en conditionnement d'air apparaît comme étant plus un fluide intérimaire que définitif.
- L'ammoniac accroît ses parts de marché en froid industriel et occupe une faible part de marché pour les conditionneurs d'air refroidisseurs d'eau.
- Le CO₂ est le fluide qui suscite le plus d'intérêt pratiquement dans tous les domaines d'application. Cependant, ses propriétés particulières nécessitent des développements beaucoup plus longs.

Cette synthèse rapide masque, bien entendu, beaucoup d'autres frigorigènes et beaucoup d'autres utilisations.

Bibliographie

- [1] UNEP – 1998 – 1998 Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee, Nairobi, UNEP, 285 p.
- [2] AFF – 2001 – Conseil National du Froid – Livre blanc sur les fluides frigorigènes, Paris, AFF, 51 p.
- [3] Quid – 1999
- [4] UNEP – 2000 – Report of the Technology and Economic Assessment Panel April 2000, Nairobi, UNEP, 193 p.
- [5] Lebot (B) – 1998 – L'étiquetage énergétique est-il un bon moyen pour diminuer les consommations d'énergie, Compte-Rendu de la Journée Effet de Serre AFF-AICVF, Paris
- [6] JO – 1995 - Arrêté du 28 septembre 1995 sur l'étiquetage des consommations d'énergie
- [7] JOCE – 1996 - Directive 96/57/EC du Parlement Européen et du Conseil du 3 septembre 1996
- [8] Billiard (F) – 1996 – La logistique du froid dans le commerce de détail. C.R. Académie d'Agriculture de France, 82, (6) 107-118.
- [9] UNEP – 2001 – Report of the Technology and Economic Assessment Panel, Nairobi, UNEP
- [10] Mao (Y), Terrell (W), Hrnjak (P) – 1998 – Performance of a display case at low temperatures refrigerated with R404A and secondary refrigerants. Proceedings IIR Conference, Cambridge (U-K), 181-197.
- [11] Duiven (J.E.) – 2002 – Entreposage frigorifique : nouveaux développements, Bulletin de l'IIF
- [12] DGAL – 1993 - Note de Service DGAL/SCHAN/N93 N° 8045 du 3 mars 1993
- [13] Stera (A.C.) – 1999 – Long Distance Refrigerated Transport Into the Third Millennium, 20^e Congrès Int. Froid, IIF/IIR, CD-ROM.
- [14] JARN - 2000 world shipments, May 25, 2001
- [15] Grumel (N) – 2001 – Gaz de France lance Climo'gaz, Clim Pratique, Avril 2001, p. 9
- [16] Harnisch (J), Hendriks (C) - 2001 – Economic Evaluation of Emission Reductions of HFCs, PFCs and SF₆ in Europe, Ecofys Energy and Environment