

16e Note d'information sur les technologies du froid

Transport frigorifique : progrès et défis

Le transport frigorifique constitue sans nul doute un maillon essentiel de la chaîne du froid, dont la finalité est de fournir au consommateur des produits périssables avec toutes garanties de sécurité et de qualité.

Les produits concernés sont des denrées périssables ou des produits non alimentaires tels que des fleurs, des plantes, des produits pharmaceutiques ou chimiques.

Les trois modes de transport de base sont le transport maritime (navires frigorifiques spécialisés, navires porte-conteneurs), le transport terrestre (routier, ferroviaire) et le transport aérien. Le transport intermodal combine au moins deux de ces modes de transport.

Les produits congelés sont transportés à une température inférieure ou égale à -18°C alors que les produits réfrigérés le sont à une température supérieure ou égale à la température de congélation commençante.

Porté notamment par la croissance du marché des produits alimentaires réfrigérés ou surgelés, dont l'IIF a estimé les ventes annuelles mondiales à environ 1200 milliards de dollars US¹ en 2000, le transport frigorifique représente un secteur d'importance sur le plan économique. Ainsi, à titre indicatif, environ 550 000 conteneurs maritimes frigorifiques et environ 1 200 000 de véhicules frigorifiques sont actuellement en service², ce qui illustre clairement l'importance du transport frigorifique dans le monde.

Cette note présente les progrès réalisés dans ce secteur et les défis auxquels il est confronté, notamment en termes d'hygiène, de sécurité alimentaire et de consommation d'énergie.

Le rôle des technologies du froid dans le transport

Pour chaque mode de transport il existe des équipements frigorifiques adaptés au contrôle des températures requises. Des équipements de transport intermodal existent pour chaque mode de transport excepté pour le transport aérien. Il faut noter que les systèmes utilisés en transport frigorifique, pour assurer les conditions de température requises, permettent non seulement de refroidir mais également de réchauffer si nécessaire. Ce dernier point est important pour les zones géographiques aux climats froids³. En règle générale, les équipements de transport frigorifique sont conçus pour maintenir en température les produits transportés, et non pour les refroidir ; ces produits doivent donc être pré-refroidis à la température de transport avant chargement. Le transport des bananes et des agrumes, pour lequel des régimes de froid spécifiques sont requis, fait exception à cette règle.

L'établissement de règles d'hygiène, telles que le nettoyage de la caisse après chaque trajet, est essentiel.⁴

La majorité des nouveaux équipements utilisés en transport frigorifique fait appel à la technologie du cycle à compression de vapeur et utilise les HFC comme frigorigènes. Certains équipements utilisent le refroidissement à frigorigène perdu (CO_2 ou azote liquide) pour des trajets à durée limitée.

Pour le transport routier, les équipements frigorifiques sont entraînés soit par le moteur du véhicule, soit à partir d'un moteur diesel indépendant. En transport ferroviaire, le froid peut être produit à partir de l'électricité fournie par une génératrice. En transport maritime, l'alimentation, d'origine électrique, est fournie par les installations de production d'énergie du navire. Les conteneurs de transport intermodal sont également alimentés à l'électricité mais peuvent aussi être équipés de groupes frigorifiques autonomes. Les équipements frigorifiques sont relativement rares dans le domaine du transport aérien et utilisent le plus souvent la « glace sèche » (dioxyde de carbone à l'état solide) même si des systèmes entraînés par batterie sont quelquefois utilisés.

Les progrès réalisés dans les différentes filières du transport

Les exigences techniques du transport frigorifique sont plus sévères que dans beaucoup d'autres applications du froid. Les équipements doivent pouvoir fonctionner dans une large plage de températures ambiantes et sous des conditions climatiques très variables (rayonnement solaire, intempéries...). Ils doivent permettre le transport de produits de caractéristiques très variables avec des températures à respecter différentes. Ils doivent être robustes et fiables du fait d'environnements de transport souvent difficiles.

Les produits congelés nécessitent des températures basses mais une certaine plage de variation est généralement admise. Des denrées congelées et transportées à -18°C ne subiront pas d'altération si elles sont soumises à des températures plus basses ; ainsi un simple dispositif de contrôle de type « tout ou rien » peut être utilisé de manière à remettre en service la production de froid quand la température franchit le seuil de déclenchement. Cependant, les denrées congelées, en

particulier pour de longs trajets, ne doivent pas être exposées à d'importantes variations de température susceptibles d'entraîner des migrations d'eau et des pertes de qualité.

Les denrées réfrigérées, en revanche, nécessitent le strict respect d'une plage de variation étroite : une température trop basse provoquera une altération des produits alors qu'une température excessive réduira leur durée de vie. A titre d'exemple, la viande réfrigérée peut nécessiter sur un long trajet le maintien de sa température dans une plage comprise entre 0°C et -1,5°C, ce que les équipements récents permettent.⁵ Les dispositifs de contrôle très précis de la température requièrent une fourniture de froid continue et modulée, combinée avec des taux de circulation d'air élevés. Ceci nécessite des puissances installées et des consommations d'énergie plus élevées que dans le cas des denrées congelées qui fonctionnent en tout ou rien.

Des trajets plus longs nécessitent des dispositifs de contrôle de température plus performants. Les dispositifs disponibles pour les navires et pour les conteneurs utilisés en transport intermodal offrent les meilleures conditions ; le transport routier présente des conditions comparables mais des spécifications moins sévères sont acceptables lors de trajets courts ou dans le cas des denrées congelées. Les besoins en termes de puissance à l'arbre vont, en transport routier, de 11 kW (camionnette) à 23 kW (remorque), soit un ratio global de consommation d'environ 0,05 kWh par tonne transportée et kilomètre parcouru.⁶ Ces puissances élevées sont nécessaires pour permettre un abaissement rapide de la température et, dans le cas de la distribution où les ouvertures de porte sont fréquentes, un rétablissement rapide de celle-ci. Ceci correspond à une puissance frigorifique équivalant à environ 4 fois les pertes de froid à travers les parois à -20°C et à 10 fois les pertes de froid d'une caisse refroidie à 0°C dans une ambiance extérieure de 30°C.

Les temps de fonctionnement de ces équipements vont de 1800 à 4000 heures par an.

Les conteneurs utilisés en transport intermodal nécessitent des puissances électriques d'environ 2 kW pour les produits congelés et 5 kW pour les produits réfrigérés, mais ces chiffres dépendent de la conception du conteneur et de ses conditions de fonctionnement. La nécessité pour les produits réfrigérés d'une régulation de température plus fine et d'un taux de circulation d'air plus élevé que pour les produits congelés induit des puissances mises en jeu plus élevées en dépit de plus faibles différences de températures à maintenir.

Options à prendre en considération et à développer

L'excellent niveau atteint en matière de contrôle de température (et ainsi en termes de sécurité et de qualité des produits alimentaires) grâce aux améliorations apportées au niveau des équipements, des emballages et de l'arrimage, se traduit toutefois par une augmentation de la dépense énergétique. Dans le domaine du transport de produits réfrigérés en particulier, il existe des options techniques permettant une réduction de ces dépenses. Plusieurs méthodes permettent ainsi d'adapter la puissance frigorifique à des conditions opérationnelles à charge partielle :

- bipasse des gaz chauds (renvoi de gaz comprimés vers l'entrée du compresseur)
- laminage des vapeurs aspirées
- délestage (ou suppression) de cylindres
- variation de la vitesse de rotation du compresseur

Le by-pass des gaz chauds et le laminage des vapeurs aspirées sont inefficaces sur le plan thermodynamique et pénalisants en termes de consommation d'énergie. Le délestage de cylindres est utilisé dans les compresseurs à pistons multi-cylindres mais possède une capacité de réduction de puissance limitée. Cette même méthode utilisée avec les compresseurs à spirales (scroll) permet une plus large plage de variation : le délestage cyclique sur une courte durée des spirales s'avère très économe en énergie.^{7,8} La variation de vitesse, soit par paliers, soit continue grâce à un dispositif d'inversion, est également efficace mais limitée dans sa capacité de délestage et nécessite une technologie additionnelle pour atteindre des puissances plus faibles.

Comme indiqué précédemment, les dispositifs de contrôle précis de la température imposent des taux de circulation d'air élevés. Le fonctionnement des ventilateurs augmente sensiblement la charge calorifique et de ce fait la consommation d'énergie, puisque l'énergie fournie aux ventilateurs doit être absorbée par le système frigorifique. Le taux de circulation d'air nécessaire étant d'autant plus faible que l'écart de température entre les produits transportés et l'ambiance est réduit, l'asservissement de la vitesse des ventilateurs à cette différence de température permet de réduire la consommation d'énergie. L'économie qui en résulte est très significative, puisque les lois qui régissent les ventilateurs disposent que le doublement de la vitesse des ventilateurs multiplie par huit leur consommation d'énergie. Des économies de ce type sont possibles aussi dans le transport des produits congelés dans la mesure où une circulation d'air continue n'est pas toujours nécessaire lorsque le compresseur est arrêté.

La quantité d'énergie consommée pour le dégivrage de l'évaporateur, dépendant du dispositif de détection et de régulation adopté, peut se révéler excessive ; l'optimisation de ce dispositif permettra de lancer le dégivrage à l'instant requis et uniquement pour la durée nécessaire. Pour certaines denrées réfrigérées, les tubes peuvent être dégivrés naturellement par une simple interruption de l'effet frigorifique, en maintenant la circulation de l'air et en récupérant la chaleur latente de fusion de la glace recouvrant les tubes.

Le refroidissement de l'air neuf nécessaire à la respiration des produits frais représente également un poste de consommation. Des dispositifs permettent de moduler ce débit d'air en fonction des besoins effectifs et ainsi de réduire la consommation d'énergie.

Pour les denrées congelées, l'adoption de températures plus basses qu'il n'est nécessaire accroît l'énergie consommée, non seulement en raison d'une différence de température plus élevée à maintenir, mais aussi du fait de la diminution de l'efficacité du cycle frigorifique. Les denrées congelées ne doivent pas être transportées à des températures plus basses

que celles imposées à leur destination car cela ne fait qu'augmenter la consommation énergétique sans apporter de bénéfice en termes de qualité ou de sécurité.

Les options identifiées ci-dessus doivent être examinées avec soin et être combinées de manière optimale de façon à réduire le plus possible l'énergie consommée tout en respectant les exigences de température et de fiabilité des équipements.

Une bonne isolation thermique est essentielle pour le fonctionnement efficace de tout système de production de froid. Les modifications intervenues dans les mousses d'isolation – nécessaires pour des motifs liés à la protection de l'environnement – peuvent induire des consommations accrues. L'isolation subit une dégradation dans le temps de ses propriétés isolantes. De nouvelles technologies telles que l'isolation sous vide doivent être évaluées. On peut signaler comme techniques additionnelles la protection contre le rayonnement solaire et l'utilisation de rideaux à lanières plastiques. Ces options techniques sont importantes dans les régions chaudes.

L'utilisation de mini-conteneurs isothermes dimensionnés pour des charges unitaires est une option possible pour la protection thermique continue de plus faibles quantités de produits à transporter.

Améliorations possibles et moyens de mise en œuvre

Sur la base des données publiées, il apparaît que des économies d'énergie de l'ordre de 50% sont possibles dans le secteur du transport des produits réfrigérés. Le potentiel d'économies est probablement moindre dans le domaine du transport des produits congelés mais les recherches méritent d'être poursuivies.

Le tableau ci-après synthétise les principales réalisations récentes et les champs d'investigation prioritaires à court et à long terme afin de mener à terme les pistes déjà évoquées.

Tableau : Développements récents et futurs relatifs aux équipements de transport frigorifique

Domaine	Réalisations	Pistes	Champ d'application
Energie et environnement	PF : Délestage des compresseurs à pistons et à spirales CA : Variation de la vitesse des ventilateurs de l'évaporateur et du condenseur	Is : isolations à efficacité élevée (micropores/vide) PF&CA : Spécifications de valeurs à charge partielle PF : Amélioration de l'efficacité du moteur diesel (turbocompression)	Lo : Modularité efficace des unités de charge PF&CA : Choix responsable des équipements et des adaptations
Qualité des équipements	CT : Régulation fine de la température : exactitude de $\pm 0,1$ K au niveau des sondes, écart de 1K entre le soufflage et le retour d'air	CT : influence des dispositifs déflecteurs d'air, des unités de chargement et de l'arrimage sur la distribution de l'air et la répartition des températures	CT : Définition de critères de qualité pour les équipements de conditionnement CT: Définition des relations entre les températures de l'air et du chargement

Légende : CA : circulation d'air
Is : isolation
Lo : logistique
PF : puissance frigorifique
CT : contrôle des températures

En conclusion, l'IIF souhaite mettre l'accent sur les recommandations suivantes :

- la priorité est de fournir au consommateur des aliments sains et salubres ;
- la prise en compte de règles d'hygiène strictes est à cet égard essentielle ;
- le développement de systèmes de transport frigorifique à haute efficacité énergétique est une exigence nouvelle ;
- la sensibilisation des utilisateurs finaux aux bénéfices environnementaux et économiques qu'engendre à long terme le choix d'équipements plus efficaces sur le plan énergétique.

In fine, des économies d'énergie très significatives sont possibles, de l'ordre de 50 % dans le domaine du transport des produits réfrigérés.

Finalement, la recherche d'une plus grande efficacité énergétique doit aller de pair avec l'objectif de fournir aux consommateurs des aliments sains et salubres.

Références

1. *Développement durable: progrès et défis du secteur du froid*, rapport préparé par l'IIF pour le Sommet de Johannesburg, 2002.
2. Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee, UNEP, 2002.
3. *Guide du transport frigorifique*, IIF, 1995.
4. L'hygiène dans les transports à température dirigée, Transfrigoroute International, 2002.
5. *Conditions recommandées pour la conservation des produits périssables à l'état réfrigéré*, IIF, 2000.
6. Refrigerated Transport in the UK. Sector review paper, ETSU for DETR, 2000.
7. Expanding a lot on energy. *Cargo Systems Journal*: Reefer Systems supplement, Feb. 2000, 6-8.
8. Capacity Control Solutions with Scroll Compressors, GF Hundy, paper to UK Institute of Refrigeration, London, April 4, 2002.

Cette Note d'Information a été préparée par Robert Heap, Président de la Section D de l'IIF, et a fait l'objet d'une relecture par 14 experts du monde entier.