



NOTE DE SYNTHÈSE SUR LES TECHNOLOGIES DE LA CHAÎNE DU FROID

LES CHAMBRES FROIDES ET ENTREPÔTS FRIGORIFIQUES



Remerciements : Cette note de synthèse a été préparée par Judith Evans (Présidente de la Commission C2 de l'IIF) ; elle a été relue par Jim Curlin et Ezra Clark, experts du programme ActionOzone de l'ONU Environnement, ainsi que par plusieurs experts des commissions de l'IIF.

Note de synthèse sur les chambres froides et entrepôts frigorifiques par l'IIF et l'ONU Environnement



ActionOzone
ONU Environnement,
Division du Droit
1 rue Miollis, Bâtiment VII
75015 Paris - FRANCE
Fax: +33 1 4437 1474
www.unep.org/ozonaction
ozonaction@unep.org

Institut International du Froid
International Institute of Refrigeration
177, boulevard Malesherbes,
75017 Paris - FRANCE
Tel. +33 (0)1 42 27 32 35
Fax +33 (0)1 47 63 17 98
www.iifiir.org
iif-iir@iifiir.org

2 La chaîne du froid

Résumé

Les entrepôts frigorifiques servent à stocker les aliments après production et avant leur transport et distribution aux supermarchés ou aux établissements de restauration. Les aliments sont entreposés soit sous forme réfrigérée, soit sous forme congelée pour une durée de quelques heures, quelques jours ou même un an pour certains fruits et légumes lorsqu'ils sont conservés dans des chambres froides et quelques mois dans des congélateurs. Il a été démontré que le secteur de l'entreposage frigorifique était l'un des maillons de la chaîne du froid où la température des produits était bien contrôlée. La consommation énergétique a son importance pour les exploitants des entrepôts frigorifiques puisqu'elle représente une part considérable de l'ensemble des coûts opérationnels. Les entrepôts frigorifiques font généralement grand usage des frigorigènes à faible potentiel de réchauffement planétaire.

Le terme « chaîne du froid » fait référence aux différentes étapes par lesquelles passe un produit soumis au froid, soit jusqu'à son achat par le consommateur final sur le point de vente, soit jusqu'à ce qu'il soit déchargé d'un véhicule de livraison à quelques mètres de sa destination. À partir du moment où les fruits et légumes sont récoltés ou l'animal abattu, le produit commence à se détériorer. La détérioration d'un produit peut être ralentie en abaissant la température à laquelle il est stocké. Dans le cas des fruits et légumes, le processus métabolique est ralenti, ce qui, en retour, ralentit la détérioration. L'abaissement de la température ralentit la multiplication des bactéries potentiellement nocives dans les produits animaliers qui sont stockés à des températures de congélation, leur permettant d'être expédiés aux quatre coins de la planète avec un minimum de risques pour la sécurité des aliments. Il est primordial qu'un contrôle approprié de la température soit garanti le plus tôt possible après la récolte ou l'abattage et pendant toute la chaîne logistique jusqu'à la consommation. Depuis leur état de matière première jusqu'aux différentes installations de stockage et de distribution par lesquelles elles passent, le transport frigorifique permet de conserver les denrées alimentaires à la température requise pour optimiser la durée de conservation et la qualité pendant de nombreux jours, semaines et mois entre les différentes installations de stockage frigorifique.

1 Introduction

Lorsque les aliments atteignent la température voulue après avoir été soumis à une transformation primaire et secondaire (refroidissement/congélation alimentaire ou transformation en produit secondaire, notamment en plat préparé), les étapes d'entreposage et de distribution de la chaîne du froid devraient permettre le maintien des aliments à température constante. Néanmoins, ce principe n'est pas toujours respecté, les aliments étant souvent refroidis ou congelés en chambre froide plutôt que dans un réfrigérateur/congélateur à air pulsé dédié. Les entrepôts frigorifiques sont habituellement utilisés dans le secteur du froid industriel. Le taux d'extraction thermique de ces types de système est de l'ordre de 10 MW et ils font généralement office de réfrigérateurs ou de congélateurs. La majorité des congélateurs fonctionnent habituellement à une température comprise entre -22 °C et -26 °C, bien qu'il y ait des exceptions : il existe des congélateurs spécifiques pour les crèmes glacées et certains produits de niche, comme les sushis, peuvent être entreposés à -60 °C. Les aliments peuvent être entreposés dans des congélateurs pendant plusieurs mois. Le temps d'entreposage dans les réfrigérateurs peut varier considérablement, de quelques heures à plusieurs jours, voire même un an pour certains fruits et légumes. Les réfrigérateurs fonctionnent traditionnellement entre -1 °C et 4 °C, certains fruits et légumes ou produits de boulangerie étant entreposés à des températures entre 8 °C et 12 °C (UNEP, 2014¹).

¹UNEP, 2014. *Montreal Protocol on Substances that deplete the ozone layer. 2014 Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee, 2014 assessment.*

La chaîne du froid

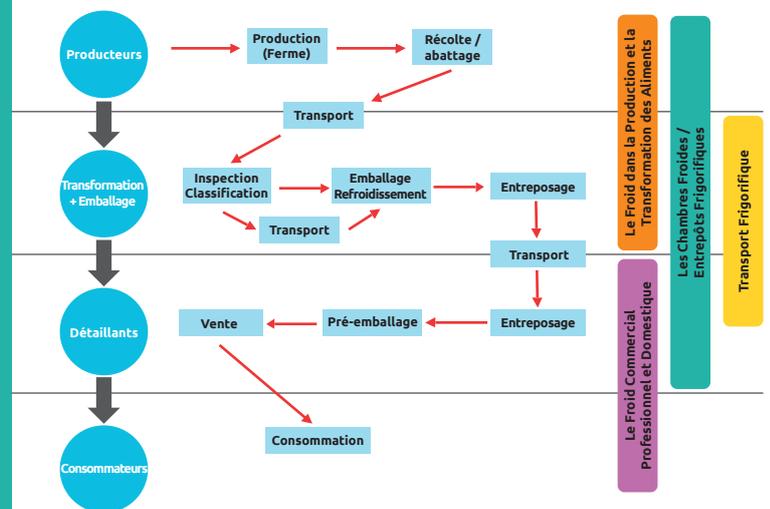


Fig.1

La chaîne du froid est souvent très complexe, les denrées alimentaires étant réfrigérées ou congelées à plus d'une occasion. Dans le monde, environ 400 millions de tonnes d'aliments sont conservés grâce au froid. Le volume global des entrepôts frigorifiques à l'échelle mondiale est d'environ 600 millions de m³. L'IIF estime que le nombre total de systèmes de froid, de conditionnement d'air et de pompes à chaleur en fonctionnement dans le monde est d'environ 3 milliards, dont 1,5 milliard de réfrigérateurs domestiques. 90 millions d'équipements frigorifiques commerciaux (parmi lesquels les unités de condensation, les équipements autonomes et les systèmes centralisés) sont en activité dans le monde. Il y a également 4 millions de véhicules frigorifiques (camionnettes, camions, semi-remorques ou remorques), 1,2 million de conteneurs frigorifiques (reefers) et 477 000 supermarchés d'une superficie variant entre 500 et 20 000 m² en fonctionnement, dans lesquels 45 % de l'électricité consommée est utilisée par les équipements frigorifiques (IIF, 2015²).

²IIF, 2015. 29^e Note d'Information : Le rôle du froid dans l'économie mondiale.

I Fig.1: L'ensemble de la chaîne du froid et ses différentes étapes

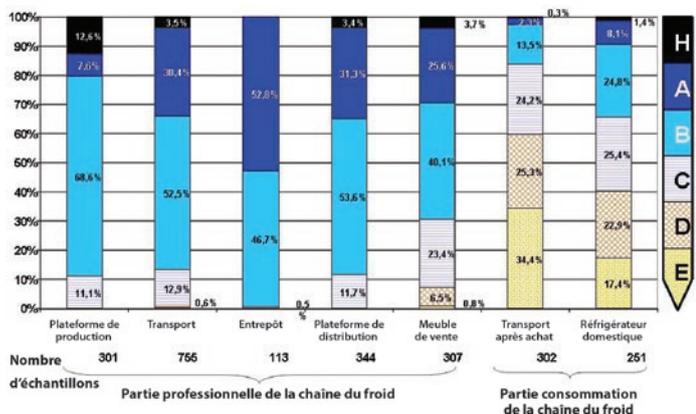
3 Tour d'horizon des chambres froides et entrepôts frigorifiques

Tous les aliments réfrigérés et congelés sont stockés dans une chambre froide/un entrepôt frigorifique au moins une fois depuis l'étape de la production jusqu'au consommateur. Les chambres froides/entrepôts à froid positif maintiennent généralement les produits à des températures comprises entre -1 °C et 12 °C tandis que les chambres/entrepôts à froid négatif les maintiennent à des températures inférieures à -18 °C. Le marché du stockage frigorifique est extrêmement vaste : il comprend aussi bien de petites chambres dont les volumes sont compris entre 10 et 20 m³ que de grands entrepôts de centaines de milliers de mètres cubes (Figure 2). Toutes les chambres/entrepôts frigorifiques ont pour fonction d'entreposer un produit à une température adéquate et d'éviter une perte de qualité de la manière la plus économique possible.

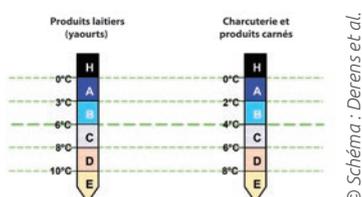


Fig.2

Dans les chambres/entrepôts à froid positif, la régulation de la température est cruciale pour la sécurité alimentaire car une élévation de la température peut nuire à la sécurité et à la durée de conservation des aliments. Dans les chambres/entrepôts à froid négatif, la question de la sécurité alimentaire ne se pose pas si l'on part du principe que la température ambiante est maintenue sous un seuil de -10 °C, considérée comme la température minimale acceptable pour éviter la croissance bactérienne. Des pertes de qualité alimentaire peuvent toutefois se produire car dans bien des cas, les aliments sont entreposés à une température supérieure à leur température de transition vitreuse (température à laquelle l'eau ne peut plus geler). La température de transition vitreuse de la majorité des aliments est inférieure à -30 °C et la plupart des installations d'entreposage à l'état congelé fonctionnent entre -18 °C et -22 °C (Nesvadba, 2007³). Derens *et al.* (2007⁴) ont affirmé que les températures des entrepôts frigorifiques étaient mieux contrôlées que dans n'importe quel autre secteur de la chaîne du froid (Figure 3).



© Schéma : Derens *et al.*



© Schéma : Derens *et al.*

4 Problématiques actuelles et tendances du marché

La réduction des coûts liés au stockage frigorifique représente un enjeu majeur. Elle peut être réalisée en réduisant la consommation d'énergie (et par conséquent les émissions indirectes) ou en exploitant les chambres/entrepôts pendant les périodes soumises aux tarifs d'heures creuses (opération souvent appelée « transfert de charge »). La conception de la chambre/de l'entrepôt et son utilisation sont des aspects extrêmement importants de la réduction de la consommation énergétique. Les chambres/entrepôts frigorifiques contribuent également aux émissions directes par la perte de frigorigènes, c'est pourquoi l'utilisation de frigorigènes à faible potentiel de réchauffement planétaire (PRP) est un enjeu majeur dans la conjoncture actuelle.

4.1. Émissions indirectes

Les émissions indirectes sont conditionnées par la charge de refroidissement, le type de combustibles dans la production d'électricité et le rendement de l'installation. Les charges thermiques de la chambre froide/de l'entrepôt frigorifique sont principalement dues à la transmission (par les murs et le plafond), l'infiltration par les portes, aux charges fixes telles que les ventilateurs, le chauffage au sol (le cas échéant), les dégivrages et les charges thermiques émises par le personnel et les machines (Figure 4).

Dans l'idéal, l'installation devrait être conçue pour un fonctionnement en efficacité maximale dans les conditions les plus courantes. La réalisation de cet objectif requiert une connaissance des conditions ambiantes saisonnières locales (température et humidité) afin de définir les températures de condensation, le condenseur du système frigorifique étant généralement localisé à l'extérieur du bâtiment, ainsi que des modèles d'utilisation et des charges thermiques pour la chambre froide/l'entrepôt.

Les chambres froides consomment des quantités d'énergie considérables. Dans les installations de stockage frigorifique, 60 à 70 % de l'énergie électrique peut être utilisée pour le froid. En 2002, l'IIF estimait que les chambres/entrepôts frigorifiques consommaient entre 30 et 50 kWh.m³ par an (Duiven et Binard, 2002⁵). Des études plus récentes menées sur un nombre réduit de chambres froides/entrepôts frigorifiques ont montré que la consommation énergétique peut dépasser considérablement ce chiffre, et souvent atteindre le double (Evans and Gigiel, 2007, 2010⁶). Ces études ont aussi montré que des économies d'énergie de 30 à 40 % pouvaient être réalisées en optimisant l'utilisation des chambres froides/entrepôts frigorifiques, en réparant les équipements actuels et en remplaçant les équipements écoénergétiques. Néanmoins, les exploitants de chambres/entrepôts frigorifiques sont souvent réticents à installer de nouveaux équipements lorsqu'ils ne disposent pas d'informations suffisantes sur les économies qu'ils pourraient réaliser.

Peu d'études comparant les performances de grands nombres d'entrepôts frigorifiques ont été publiées. Evans *et al.* (2015⁷), ont

³Nesvadba, P, 2007. Thermal properties and ice crystal development in frozen foods. In *Frozen Food Science and Technology*, edited by Evans, J.A. Blackwell Publishing.
⁴Derens, E., Palagol, B., Cornu, M., Guilpart J., 2007. The food cold chain in France and its impact of food safety. IIR ICR2007, Beijing, China.
⁵Duiven, J.E., Binard, P., 2002. Refrigerated storage: new developments. Bulletin of the IIR, No. 2002-2.
⁶Evans, J.A., Gigiel, A., 2010. Reducing energy consumption in cold storage rooms. IIR ICC2010, Cambridge, UK.

Fig.2 : Installations de stockage frigorifique traditionnelles : petite chambre froide (gauche), grand entrepôt frigorifique (droite).
 Fig. 3 : Températures tout au long de la chaîne du froid en France.

compilé des données à partir de 429 chambres froides/entrepôts frigorifiques (167 à froid positif, 187 à froid négatif et 75 mixtes). Les données recueillies provenaient de 23 pays. Les résultats de l'étude sont présentés dans le Tableau 1. Elle démontre qu'il existe des différences de consommation énergétique considérables entre les chambres/entrepôts frigorifiques. Dans de nombreux cas, la consommation énergétique par mètre cube (aussi appelée consommation énergétique spécifique) de l'entrepôt le plus efficace était moitié moins importante que celle consommée par l'entrepôt le moins écoénergétique. Ces résultats peuvent s'expliquer par de nombreuses raisons autres qu'un manque d'efficacité. À titre d'exemple, la chambre/l'entrepôt frigorifique dont la consommation énergétique spécifique est la plus élevée peut avoir une utilisation plus intensive et une fonction différente par rapport à la chambre/l'entrepôt frigorifique ayant la consommation énergétique spécifique la plus faible.

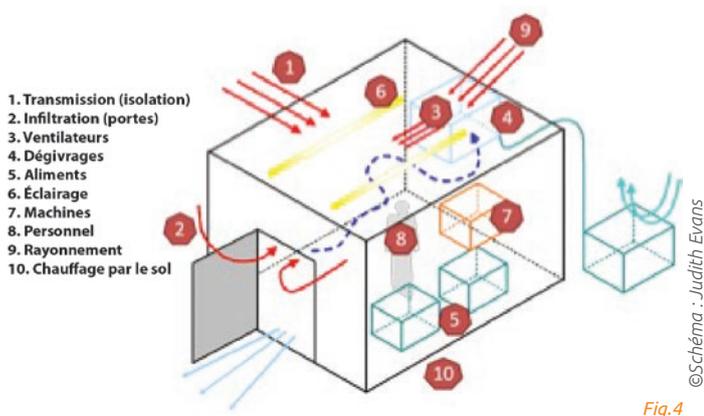


Fig. 4 : Charges thermiques dans un entrepôt frigorifique.

4.2. Émissions directes

L'importance des fuites de frigorigène varie considérablement entre les différents types d'équipement frigorifique et d'un pays à l'autre. Les taux de fuites qui apparaissent dans le Tableau 2, qui sont a priori représentatifs de la région UE-15, sont basés sur l'inventaire des gaz à effet de serre de 2007 (Defra, 2010⁸) et montrent d'importantes variations entre les différents types d'équipement. Le froid industriel (y compris l'entreposage frigorifique) est responsable de fuites de frigorigène de l'ordre de 8 % par an. Les données sur les frigorigènes dans les pays en développement sont peu nombreuses, mais les données recueillies par Giz (2017⁹) sembleraient indiquer que les émissions de frigorigènes peuvent être environ deux fois plus élevées dans les pays en développement que dans les pays industrialisés.

Tableau 1 : Valeurs de la consommation énergétique spécifique pour les chambres/entrepôts frigorifiques contrôlés (Evans *et al.*, 2015⁷)

		Positives (kWh.m ⁻³ .an ⁻¹)	Négatives et mixtes (kWh.m ⁻³ .an ⁻¹)
Tous types de chambre froide/ entrepôt frigorifique	Nombre de chambre/ entrepôt frigorifique	167	262
	Moyenne	55,7	71,5
	Minimum	4,4	6,0
	Maximum	250,4	391,6
	Écart type	34,7	40,6

⁷Evans, J., Foster A., Huet, JM., Reinholdt, L., Fikiin, K., Zilio, C., Houska, M., Landfeld A., Bond, C., Scheurs, M., Van Sambeek, T., 2015. Specific energy consumption values for various refrigerated food cold stores. IIR ICR2015, Yokohama, Japan.

⁸Defra, 2010. 2010 Guidelines to Defra / DECC's GHG conversion factors for company reporting: methodology paper for emission factors.

⁹Giz. 2017. <http://www.green-cooling-initiative.org/technology/chillers/green-cooling-potential/>.

Tableau 2 : Émissions de frigorigènes dans le secteur du froid. (Defra, 2007⁸)

Type d'équipement	Fourchette habituelle de la taille de charge (kg)	Facteur d'émission de l'installation (% de la charge initiale)	Émissions en fonctionnement (% de la charge initiale/an)	Frigorigène restant à disposition (% de la charge initiale)	Frigorigène récupéré (% de la charge restante)
Froid domestique	0,05 - 0,5	1,0 %	0,3 %	80 %	99,0 %
Applications commerciales autonomes	0,2 - 6	1,5 %	2,0 %	80 %	94,5 %
Applications commerciales de moyenne et grande taille	50 - 2 000	2,0 %	11,0 %	100 %	95,0 %
Transport frigorifique	3 - 8	1,0 %	8,0 %	50 %	94,0 %
Froid industriel (y compris la transformation alimentaire et le stockage frigorifique)	10 - 10 000	1,0 %	8,0 %	100 %	95,0 %
Refrigerateurs	10 - 2 000	1,0 %	3,0 %	100 %	95,0 %
Conditionnement d'air résidentiel et commercial, y compris les pompes à chaleur	0,5 - 100	1,0 %	8,5 %	80 %	95,0 %
Conditionnement d'air mobile	0,5 - 1,5	1,0 %	7,5 %	50 %	88,0 %

5 Frigorigènes actuels et alternatives possibles

Le choix d'un frigorigène est une problématique environnementale, sécuritaire et de développement durable majeure. Dans l'industrie alimentaire, la majorité des chambres/entrepôts à froid négatif et positif utilisent des systèmes frigorifiques à détente. Les systèmes à détente directe sont composés de deux échangeurs de chaleur (un condenseur et un évaporateur), d'un dispositif conçu pour pomper et augmenter la pression du frigorigène (compresseur) et d'un système de détente, ainsi que des dispositifs de contrôle, des cuves de stockage et des dispositifs de sécurité associés. Dans les plus grandes installations, les systèmes de recirculation à pompage sont courants et fonctionnent souvent avec de l'ammoniac (R717). Dans ce système, le frigorigène est contenu dans une grande cuve appelée « réservoir tampon » et il est pompé jusqu'à l'évaporateur ou vient l'alimenter par gravité.

Aujourd'hui, nombre de chambres/entrepôts frigorifiques fonctionnent avec de l'ammoniac, frigorigène à très faible PRP mais qui est modérément inflammable et toxique. Afin de garantir un fonctionnement sans danger, il est absolument nécessaire de mettre en place des formations à la sécurité et des pratiques sécuritaires pour l'utilisation d'un frigorigène tel que l'ammoniac. La formation est un enjeu fondamental pour faciliter la transition vers des frigorigènes à faible PRP qui présentent un risque d'inflammabilité ou de toxicité. Le coût est souvent le principal élément pris en considération. Une prise en compte des coûts sur la durée de vie devrait s'opérer, car cela favorise souvent les systèmes dont les coûts initiaux et de maintenance peuvent être plus élevés, mais dont les coûts énergétiques sont plus faibles.

Dans certains cas, des systèmes en cascade peuvent être utilisés. Le système en cascade au CO₂ le plus courant comprend du CO₂ côté basse température, fonctionnant sous son seuil de température critique et de l'ammoniac côté haute température. Cette conception peut garantir un réchauffement à basse température de l'eau chaude mais n'est pas adaptée au réchauffement à haute température.

D'après le PNUE (2017¹⁰), le froid industriel représente environ 2 % de la consommation de HFC (en termes d'eqCO₂) et d'après les prévisions, il devrait augmenter d'environ 6,7 % par an entre 2015 et 2050. Une transition se fait visiblement de l'ammoniac aux frigorigènes HFC, notamment dans les pays où des accidents se sont produits, ou qui ont eu des problèmes de sécurité (c'est notamment le cas dans les pays de l'Article 5). Des normes de sécurité ont bien été mises en place par la réglementation locale et l'ISO (Organisation internationale de normalisation) et la CEI ainsi que des normes régionales (telles que la norme européenne). En ce qui concerne les systèmes industriels, la norme ISO 5149 (2014) et la norme européenne 378 (2008/2012) couvrent la conception, la construction et la sécurité.

Les chambres/entrepôts de faible volume fonctionnent généralement avec des frigorigènes HCFC ou HFC et certains entrepôts et chambres les plus récents fonctionnent avec des frigorigènes naturels (en priorité le CO₂, R744). En outre, bien qu'ils ne représentent qu'une petite part du marché, les entrepôts et chambres frigorifiques utilisent un frigorigène secondaire (par exemple de l'eau, de la saumure, des glycols, des huiles de silicone ou un fluide diphasique à changement de phase comme le Flo-Ice™) qui est refroidi par un système frigorifique centralisé puis pompé

jusqu'à la chambre /l'entrepôt frigorifique pour l'extraction de chaleur. L'avantage de ces systèmes est qu'un frigorigène toxique ou inflammable peut être utilisé dans le circuit primaire qui est isolé du processus de refroidissement (améliorant ainsi la sécurité) et la charge du circuit primaire en frigorigène peut être minimisée.

La cogénération d'électricité et de chaleur, les technologies de polygénération et de trigénération qui peuvent utiliser de nombreuses sources d'énergie pour produire de nombreux apports énergétiques ont la capacité de réduire la consommation énergétique en cas d'utilisation de ces apports. L'énergie primaire utilisée pour ces systèmes peut comprendre les carburants fossiles, les biocarburants et l'énergie renouvelable et les apports énergétiques comprennent la chaleur, l'énergie électrique et le refroidissement. Dans les entrepôts et les chambres frigorifiques traditionnels dont l'entreposage frigorifique constitue la seule fonction, les apports énergétiques peuvent être peu utiles, bien que les entrepôts et les chambres frigorifiques soient souvent situés au même endroit ou à proximité d'autres installations de production qui peuvent bénéficier des apports énergétiques.

En de très rares occasions, des systèmes à absorption peuvent être utilisés dans les chambres /entrepôts frigorifiques s'il existe de la chaleur excédentaire pour faire fonctionner le système. Les systèmes à absorption font varier le point d'ébullition d'un frigorigène en l'associant à un autre fluide. Pour la variation du point de congélation, il s'agit généralement d'ammoniac-eau. À l'avenir, une augmentation de l'utilisation de la récupération de chaleur pourrait être justifiée et l'utilisation de réseaux électriques et de systèmes thermiques urbains pourrait être attractive et économique.

Bien que plusieurs technologies de froid innovantes soient en cours de développement (par exemple magnéto-caloriques, thermoélectriques, thermoacoustiques), elles semblent présenter peu d'intérêt dans le cadre du stockage frigorifique. La plupart de ces technologies ont été conçues pour de plus petits systèmes frigorifiques dans un cadre commercial ou domestique.

Tableau 3 : Récapitulatif des frigorigènes actuels et leurs alternatives

Les chambres froides/entrepôts frigorifiques		
Taille de la chambre/de l'entrepôt	Frigorigènes actuels à PRP plus élevé (PRP kg-CO ₂)	Frigorigènes alternatifs à plus faible PRP (PRP kg-CO ₂)
Petits volumes : moins de 100m ³	HFC-134a (1360), HFC-404A (4200), HCFC-22 (1810), HFC-410A (1920), HFC-407C (1920), HFC-507A (3990), HFC-422D (2470)	Une large gamme de frigorigènes HFO et de mélanges de HFO, HC-290 (5), HC-1270 (1,8)
Grands volumes : supérieurs à 100m ³		Primaire : R-744 (1), R-717 (0) Secondaire : Saumure, glycols, huiles de silicone

¹⁰ UNEP, 2017. Montreal Protocol on Substances that deplete the ozone layer. UNEP, Report of the Technology and Economic Assessment Panel.

6 Perspectives de développement et défis à relever

Il existe de nombreuses façons d'exploiter ou de contrôler le froid alimentaire qui permettent d'économiser de l'énergie. De nombreux exploitants de chambres /d'entrepôts frigorifiques utilisent des stratégies de régulation pour économiser de l'énergie. Il peut s'agir de la régulation des ventilateurs des évaporateurs, du système frigorifique ou de la température à l'intérieur de la chambre froide/de l'entrepôt.

La réduction de la consommation énergétique devrait se concentrer sur trois axes principaux :

- Réduction des charges thermiques dans la chambre ou l'entrepôt frigorifique.
- Amélioration de la maintenance et des activités de l'exploitation.
- Amélioration du fonctionnement/de l'efficacité du système frigorifique.

La moindre augmentation de la température de refroidissement du système frigorifique (température d'évaporation) ou réduction de la température de rejet de chaleur (température de condensation) sera une source d'économie d'énergie. Dans de nombreux cas, et notamment dans les chambres et entrepôts à froid négatif, les températures sont maintenues à des niveaux plus bas que nécessaire afin de garder une marge de sécurité en cas de dysfonctionnement de l'installation.

Souvent, les exploitants mettent en place des stratégies pour réaliser des économies financières (pas nécessairement énergétiques) en mettant les systèmes frigorifiques à l'arrêt pendant les périodes de pointe de demande énergétique, lorsque l'énergie est plus coûteuse.

L'énergie peut en effet être quatre fois plus coûteuse aux heures où la demande est la plus forte qu'aux heures creuses. Pendant cette période, il est possible de laisser augmenter légèrement la température ambiante et de l'abaisser ensuite lorsque le coût de l'énergie diminue à nouveau.

À l'avenir, l'utilisation de sources renouvelables telles que les énergies éolienne, houlomotrice et solaire joueront probablement un rôle dans la réduction de l'impact environnemental de l'énergie consommée par les chambres ou entrepôts frigorifiques.

6.1. Défis techniques et potentiel

L'énergie représente un coût important pour le fonctionnement des chambres/entrepôts frigorifiques alimentaires. Les travaux issus de plusieurs audits énergétiques ont montré que des économies d'énergie considérables peuvent être réalisées dans les chambres et entrepôts frigorifiques. Une étude réalisée par Evans *et al.*, (2014¹¹), a démontré que des économies d'énergie pouvaient être réalisées en optimisant l'utilisation des chambres/entrepôts frigorifiques, en réparant les équipements actuels et en remplaçant les équipements écoénergétiques. Souvent, ces améliorations ont permis des retours sur investissements à court terme, en moins d'un an.

D'importants travaux ont été effectués en Grande-Bretagne et sont maintenant étendus à l'Europe pour réduire les fuites de frigorigène (Cowan *et al.*, 2010¹² et 2011¹³). La législation, les mesures budgétaires, les nouvelles technologies, les frigorigènes alternatifs et d'autres initiatives ont contribué à apporter des améliorations majeures en matière de fuites de frigorigène. Le règlement Européen F-gaz (règlement 842/2006) garantit que l'installation, la

maintenance, la mise en service, et le démantèlement des systèmes frigorifiques contenant ou conçus pour contenir des HFC peuvent uniquement être réalisés par des professionnels dûment certifiés. Cette réglementation requiert une détection régulière des fuites par du personnel correctement formé. Toutes ces obligations sont en vigueur depuis juillet 2009.

La mise en application du règlement F-gaz traduit une transition vers des frigorigènes à faible PRP. L'ammoniac est un frigorigène à faible PRP largement utilisé dans le stockage frigorifique, mais son utilisation nécessite des normes de sécurité élevées et une formation complète des techniciens du froid. De nombreux frigorigènes alternatifs à faible PRP présentent des problèmes liés à leur pression de fonctionnement élevée ou à leur inflammabilité. Il existe par conséquent davantage de problèmes relatifs à la sécurité et à la formation des techniciens du froid pour garantir une utilisation et une installation des systèmes en toute sécurité.

La mise en œuvre de la récupération de chaleur dans les chambres froides et les entrepôts frigorifiques et une meilleure intégration de ces derniers aux infrastructures « locales » pourraient permettre des économies à l'avenir. La chaleur à basse température peut être récupérée dans les refroidisseurs d'huile des compresseurs et 60 % de la puissance du moteur du compresseur peuvent être absorbés par l'huile. Des systèmes qui utilisent la chaleur du refoulement du compresseur ou les refroidisseurs d'huile des compresseurs ont été développés pour préchauffer l'eau dans une chaudière.

6.2. Politiques d'orientation

L'industrie du froid et du conditionnement d'air a connu un développement et une modernisation considérables au cours des trois dernières décennies, en partie suite à la mise en œuvre de politiques environnementales internationales dans le cadre desquelles de nombreux frigorigènes utilisés efficacement depuis des décennies sont tenus responsables de l'appauvrissement de la couche d'ozone ainsi que du réchauffement de la planète. L'élimination progressive des substances appauvrissant la couche d'ozone (SAO), dans le cadre du Protocole de Montréal, a déclenché des changements importants dans l'industrie, qui s'est tournée vers des frigorigènes et des technologies de substitution dont le potentiel d'appauvrissement de l'ozone (PAO) est nul.

En octobre 2016, l'amendement de Kigali au Protocole de Montréal a donné une autre dimension au mandat du Protocole de Montréal en y ajoutant le contrôle de la production et de la consommation des hydrofluorocarbures (HFC), ce qui constituera une contribution majeure de la lutte contre le changement climatique. Le contrôle de la production et de la consommation des HFC s'ajoutera aux bienfaits pour le climat déjà obtenus par le Protocole de Montréal à travers l'élimination progressive des SAO, y compris les CFC et les HCFC. Les émissions de HFC sont également répertoriées dans le groupe des GES (gaz à effet de serre) dans le cadre des conventions relatives au climat, c'est-à-dire l'Accord de Paris et précédemment le Protocole de Kyoto. Toutefois, les mesures visant à contrôler spécifiquement les émissions de HFC dans le cadre du régime climatique ne sont pas encore fixées, à l'exception des exigences de déclaration au titre de la CCNUCC (Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques).

L'impact des frigorigènes utilisés par les équipements frigorifiques sur le climat dépend des effets directs et indirects. L'effet direct provient de leur PRP et de la quantité de frigorigène émise dans l'atmosphère (à la suite d'une fuite, d'un accident, ou d'une mauvaise

¹¹Evans, J.A., Hammond, E.C., Gigiel, A.J., Foster, A.M., Reinholdt, L., Fikiin, K., Zilio, C., 2014. Assessment of methods to reduce the energy consumption of food cold stores. *Applied Thermal Engineering* 62 (2014) 697-705.

¹²Cowan, D., Gartshore, J., Chaer, I., Francis, C., Maidment, G., 2010. REAL Zero – reducing refrigerant emissions & leakage - feedback from the IOR project, *Proceedings of the Institute of Refrigeration, Proc. Inst. R.* 2009-10. 7-1.

¹³Cowan, D., Beermann, K., Chaer, I., Gontarz, G., Kaar, K., Koronaki, I., Maidment, G., Reulens, W., 2011. Improving F-Gas containment in the EU – results from the Real Skills Europe Project. IIR IC2011, Prague, Czech Republic.

6 Perspectives de développement et défis à relever

manipulation ou dégazage sauvage). L'effet indirect provient de l'énergie consommée lorsque l'appareil est en fonctionnement, phénomène qui, pendant la vie utile de l'appareil, est lié au CO₂ (au CH₄ dans une moindre mesure) produit par les centrales électriques à énergie fossile. Il est généralement plus important que l'effet direct. Minimiser les impacts direct et indirect des émissions de tous les types de frigorigènes passe par une meilleure conception des équipements, de meilleures pratiques en ce qui concerne leur mise en service et leur entretien sur le terrain, des procédures de démantèlement raisonnées et l'application de normes et réglementations locales pertinentes.

Plusieurs organisations importantes élaborent des normes relatives au secteur du froid et du conditionnement d'air. La brochure du PNUÉ (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) sur les normes internationales en matière de froid et de conditionnement d'air (PNUÉ, 2014¹⁴) répertorie les principales organisations internationales de normalisation et donne quelques exemples d'organisations nationales et régionales de normalisation.

Le secteur de la chaîne du froid est l'un des secteurs d'activité les plus importants, mais il est aussi le plus négligé dans l'approche commerciale globale. Ceci est dû au fait que la chaîne du froid s'intègre dans différents domaines économiques, sociaux et techniques : industrie alimentaire, santé, froid, transport, tourisme, etc. Les normes et les orientations qui définissent le choix d'une technologie de la chaîne du froid qui ait un impact environnemental moindre, un fonctionnement efficace sur le plan énergétique et qui soit abordable économiquement, sont dispersées entre différents groupes et entités au sein d'un même pays. En septembre 2015, la communauté internationale a adopté les objectifs de développement durable (ODD) pour 2030 qui stipulent que l'objectif n° 2 « Faim zéro » est le deuxième objectif mondial devant être atteint d'ici 2030. Cela implique automatiquement le besoin urgent de gérer efficacement les dossiers de la « sécurité alimentaire » et du « gaspillage alimentaire » qui dépendent des capacités de la chaîne du froid. Bien que cet objectif puisse être considéré comme le principal objectif en lien direct avec la chaîne du froid, d'autres objectifs sont également liés à l'activité de la chaîne du froid, comme l'objectif n° 3 : Bonne santé et bien-être, l'objectif n° 9 : Industrie, innovation et infrastructure, l'objectif n° 12 : Consommation et production durables, ou encore l'objectif n° 13 : Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques. Par conséquent, l'approche intégrée pour relever les défis de la chaîne du froid peut entraîner des avantages multiéconomiques et environnementaux.

¹⁴PNUÉ, 2014. Normes internationales sur le froid et le conditionnement d'air. Introduction à leur rôle dans le contexte de l'élimination des HCFC dans les pays en développement.

Conclusion

Le secteur de l'entreposage frigorifique est généralement vu comme l'un des secteurs de la chaîne du froid alimentaire où le contrôle de la température est le mieux maîtrisé. La majorité des chambres froides et des entrepôts frigorifiques utilisent des frigorigènes à faible PRP. Les émissions proviennent donc principalement de la consommation d'énergie. Il a été démontré que la consommation énergétique des chambres et entrepôts frigorifiques varie considérablement et que nombre d'entre eux pourraient réduire leur consommation énergétique en mettant en place de bonnes pratiques ou des équipements et des composants efficaces.

Avertissement : les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'ONU Environnement et de l'IIF aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. En outre, les opinions exprimées ne représentent pas nécessairement la décision ou la politique déclarée de l'ONU Environnement et de l'IIF, pas plus que la citation de noms commerciaux ou de procédés commerciaux ne constitue une approbation.