



Mars 2018 / 37^e Note d'Information sur les technologies du froid

Les progrès du froid dans les supermarchés

L'IIF publie régulièrement des Notes d'Information à l'intention des décideurs du monde entier. Ces notes présentent une synthèse des connaissances sur des thèmes clés liés aux technologies du froid et à ses applications. Chaque note propose des axes de développement prioritaires pour l'avenir et expose les recommandations de l'IIF en ce sens.

Les systèmes frigorifiques traditionnels utilisés dans les supermarchés sont responsables d'émissions de CO₂ considérables dues à l'effet direct des fuites de frigorigène et à l'effet indirect d'une consommation énergétique élevée. Il est possible de réduire cette consommation d'énergie grâce aux avancées technologiques dans le secteur du froid, qui permettent de modifier la configuration et les composants des installations frigorifiques. Non seulement les nouveaux systèmes fonctionnent avec une efficacité accrue, mais ils permettent également de réduire la charge en frigorigène et les risques de fuites.

Afin de réduire les émissions de frigorigènes, des systèmes modifiés avec une charge en frigorigène plus faible et des ensembles de compresseurs répartis dans les installations du supermarché ont été mis en place. D'autres systèmes contiennent un fluide secondaire refroidi par un dispositif frigorifique situé dans une salle des machines séparée de la surface de vente. Des systèmes où chaque meuble de vente est équipé de son propre compresseur et d'une unité de condensation refroidie à l'eau ont été développés récemment.

Cette Note d'Information passe en revue les avantages et les inconvénients des alternatives possibles aux solutions traditionnelles.

Cette Note d'Information a été préparée par Renato Lazzarin, Président de la Section E de l'IIF et Yunting Ge, Vice-Président de la Commission E1, avec l'aide de Claudio Zilio, Secrétaire de la Commission B2. Elle a été revue par plusieurs experts du réseau de l'IIF.



INTERNATIONAL INSTITUTE OF REFRIGERATION
INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID

www.iifir.org

iif-iir@iifir.org

[in](#)



[#refrigeration](#)

177, boulevard Maiesherbes, 75017 PARIS – France
T: 33 (0) 1 42 27 32 35 – F: 33 (0) 1 47 63 17 98

Résumé

Les supermarchés sont les plus grands consommateurs d'énergie dans le secteur du froid commercial dans de nombreux pays.

Ce sont principalement les meubles de vente ou équipements frigorifiques situés dans la surface de vente qui requièrent du froid pour stocker les denrées périssables proposées à la vente. Les systèmes frigorifiques traditionnels utilisés dans les supermarchés sont également responsables d'importantes émissions de CO₂, dues à l'effet direct des fuites de frigorigène et à l'effet indirect d'une consommation énergétique élevée. La consommation d'énergie peut être réduite en optant pour une température intérieure et une humidité relative adaptées. Une autre façon de réduire la consommation d'énergie repose sur les progrès réalisés dans les technologies du froid qui ont permis de modifier la configuration des systèmes frigorifiques et des composants. Non seulement les nouveaux systèmes fonctionnent plus efficacement, mais ils permettent de réduire la charge en frigorigène et les fuites.

Plusieurs améliorations ont été apportées aux meubles de vente ces dernières années : éclairage plus efficace, utilisation plus répandue des portes, ventilateurs plus performants, etc. Ces progrès qui concernent des composants annexes aux systèmes de froid commercial ne sont pas abordés dans cette Note d'Information, qui se concentre sur l'évolution récente des systèmes frigorifiques.

Une grande majorité des systèmes frigorifiques utilisés dans les supermarchés sont des systèmes multiplex qui utilisent des évaporateurs à détente directe et plusieurs compresseurs avec des conduites d'aspiration et de refoulement communes. Pour tenter de réduire les émissions de frigorigènes, les systèmes ont été modifiés avec une charge en frigorigène plus faible et des ensembles de compresseurs répartis dans les installations du supermarché. D'autres systèmes intègrent un fluide secondaire refroidi par des machines frigorifiques dans un local isolé de la surface de vente. Des systèmes ont été développés récemment dans lesquels chaque meuble est équipé de son propre compresseur et d'un condenseur refroidi par eau. L'eau circulant dans une boucle et refroidie dans un refroidisseur central est utilisée pour le rejet de la chaleur lors de la condensation (systèmes frigorifiques autonomes à boucle d'eau).

Cette Note d'Information examine les avantages et les inconvénients des alternatives possibles aux solutions traditionnelles.

Introduction

Les supermarchés sont les plus grands consommateurs d'énergie dans le secteur commercial dans de nombreux pays.

L'AIE ^[1] rapporte que 3 à 5 % de la consommation totale d'électricité dans les pays industrialisés provient des supermarchés. Les systèmes frigorifiques des supermarchés traditionnels sont également responsables d'émissions de gaz à effet de serre considérables. Ces émissions sont dues à l'effet direct des fuites de frigorigène et aux émissions indirectes de CO₂ liées à l'énergie consommée ^[2, 3, 4].

Une surface de vente de 300 m² dans un supermarché (taille très courante), peut consommer environ 2 millions de kWh d'électricité par an. Les hypermarchés aux plus grandes surfaces peuvent consommer plus de 5 millions de kWh par an ^[5]. Plus de la moitié de

cette énergie est consommée par le(s) système(s) frigorifique(s), tandis que l'éclairage peut représenter jusqu'à environ 20-25 % de l'énergie totale utilisée [6]. Ce dernier chiffre peut être considérablement réduit si des systèmes d'éclairage à haute efficacité (par exemple des LED) sont utilisés à la place des lampes traditionnelles. Le reste provient principalement des systèmes de CVC (chauffage, ventilation et conditionnement d'air) et, dans une moindre mesure, d'autres postes tels que les équipements de bureau, les ordinateurs, l'eau chaude sanitaire, la préparation des aliments et la cuisson. Ce sont principalement les meubles et les équipements frigorifiques situés dans la surface de vente qui ont besoin de froid pour stocker les denrées périssables proposées à la vente. Du froid doit également être fourni dans les chambres froides où les denrées périssables sont stockées avant d'être placées dans les meubles de vente. Ces équipements peuvent être classés en fonction de la température de stockage : les meubles à moyenne température (MT) (Figure 1) avec une température d'évaporation de -7/-10 °C, pour les produits qui doivent être conservés à une température supérieure à 0 °C et inférieure à 4-7 °C ; ou les meubles à basse température (BT) (Figure 2) avec une température d'évaporation de -32/-35 °C, pour les aliments congelés qui doivent être stockés à une température inférieure à -18 °C.



Figure 1 : *Meuble de vente Moyenne Température (MT), très répandu en Italie pour la vente au détail de charcuterie et de fromage*



Figure 2 : *Meuble de vente Basse Température (BT) typique*

La charge de refroidissement du meuble frigorifique dépend de la température de l'air et de l'humidité relative de l'espace, de l'utilisation d'appareils de chauffage anti-condensation utilisés pour éviter la formation de condensation sur les portes et les surfaces extérieures d'exposition, de l'éclairage et des ventilateurs de l'évaporateur. Il est possible de réduire la consommation d'énergie en agissant sur les paramètres ambiants (une température ou une humidité relative plus basses réduisent les charges de froid et des appareils de chauffage anti-condensation), et sur les équipements auxiliaires (des ventilateurs efficaces ou un éclairage efficace, par exemple des LED à la place des lampes halogènes dans les meubles de vente). En outre, d'autres mesures évidentes telles qu'une meilleure isolation peuvent être mises en œuvre.

Il est également possible de réduire la consommation d'énergie grâce aux progrès réalisés dans les technologies des systèmes frigorifiques qui ont permis de modifier la configuration habituelle des installations frigorifiques qui alimentent les équipements frigorifiques MT et BT. Non seulement les nouveaux systèmes proposés fonctionnent de manière plus efficace, mais ils permettent de réduire la charge en frigorigène (qui peut atteindre 3 000 kg dans de nombreux supermarchés existants ^[7]) et les risques de fuites (pouvant aller jusqu'à 30 % de la charge totale chaque année ^[4]).

Cette Note d'Information décrit et analyse les systèmes frigorifiques conventionnels et avancés. Elle fournit une information sur les différentes solutions techniques et étudie leurs avantages et leurs inconvénients, en tenant compte des critères technologiques tels que la consommation annuelle d'énergie, le choix du frigorigène, la charge en frigorigène, la facilité de construction, la facilité et l'efficacité de la régulation de la puissance frigorifique, le bruit et la récupération de la chaleur rejetée par les systèmes frigorifiques.

Système multiplex

La majorité des systèmes frigorifiques que l'on trouve dans les supermarchés utilisent des serpentins évaporateurs air-frigorigène à détente directe situés dans les meubles de vente ou les refroidisseurs des chambres froides. Les compresseurs sont situés dans une salle des machines hors de la surface de vente, et les condenseurs sont souvent situés sur le toit. Ces systèmes frigorifiques dits « multiplex » nécessitent une charge importante en frigorigène et une grande quantité de conduites et de joints qui sont souvent la cause de taux de fuites de frigorigène importants. Le terme « multiplex » indique que plusieurs compresseurs ont une conduite d'aspiration commune et des collecteurs de refoulement communs (figure 3). Le gaz de refoulement est acheminé vers un condenseur éloigné, puis redirigé vers un réservoir de liquide. Les supermarchés disposent en général de deux ensembles de compresseurs, un pour les systèmes frigorifiques MT et un pour les systèmes BT.

Le principal avantage des systèmes multiplex est leur construction relativement simple. La puissance frigorifique peut facilement être régulée en mettant en service un ou plusieurs compresseurs sur l'armoire « marche-arrêt ». Parfois, l'un d'entre eux a un fonctionnement modulant. Comme les ensembles de compresseurs sont situés dans une salle des machines séparée, cela n'engendre pas de bruit dans la surface de vente. La chaleur rejetée par l'installation frigorifique peut être utilisée à la fois pour chauffer l'eau et les locaux. Le chauffage de l'eau peut nécessiter une augmentation de la température de condensation, particulièrement en hiver, lorsque le condenseur est amené à fonctionner à des températures aussi basses que 20 °C. Par conséquent, la récupération de chaleur doit tenir compte d'une possible réduction du coefficient de performance (COP) du système frigorifique.

Les principaux inconvénients de ce système sont la longueur des conduites de frigorigène et l'importante charge en frigorigène associée (fréquemment entre 1 400 et 2 300 kg). Le frigorigène le plus couramment utilisé actuellement est le R404A ^[8]. L'élimination progressive des frigorigènes à fort potentiel de réchauffement planétaire (PRP ou GWP) entraînera l'utilisation d'autres frigorigènes (point traité plus loin dans cette Note). De longs circuits frigorifiques impliquent généralement plus de raccords et de connexions, ce qui entraîne un plus grand risque de fuite de frigorigène. Des taux de fuites de frigorigène annuels atteignant 15 % de la charge totale sont signalés, certains systèmes subissant même des

fuites pouvant atteindre 30 % de la charge par an [4]. En outre, la longueur des conduites de frigorigène peut provoquer des chutes de pression élevées, ce qui réduit le coefficient de performance. Les chutes de pression doivent être examinées en même temps que la nécessité de maintenir des vitesses d'écoulement du frigorigène à un niveau permettant à l'huile d'être réacheminée vers le compresseur. Dans de nombreux systèmes, la pression d'aspiration est fixe et commune à tous les compresseurs : une pression plus élevée pour les ensembles MT et une pression plus basse pour les systèmes BT.

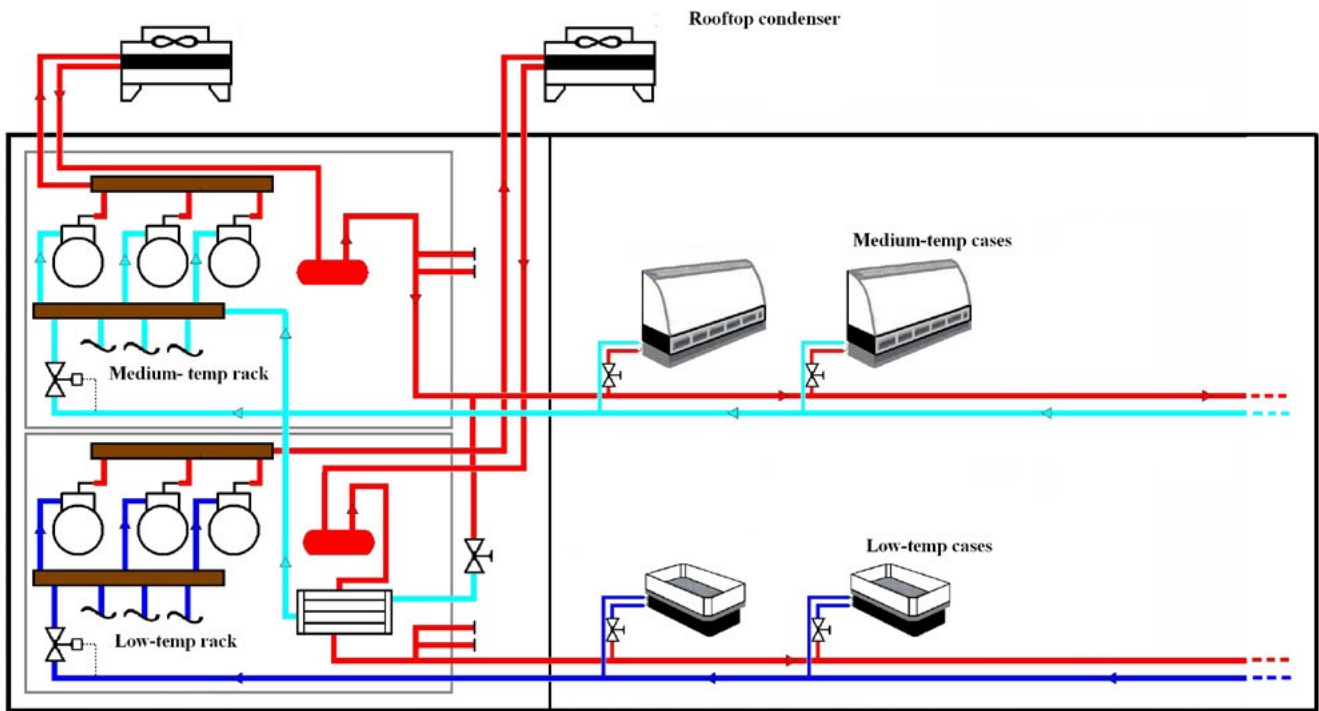


Figure 3 : Schéma d'un système frigorifique multiplex

Les commandes mécaniques classiques maintiennent une pression d'aspiration fixe pour réguler la température dans les meubles de vente. Les paramètres de régulation sont généralement basés sur les conditions de charge les plus élevées, par exemple durant les heures de fréquentation du magasin et lorsqu'il fait chaud. Dans ce contexte, aucun bénéfice ne découle d'une réduction de la charge qui surviendrait en hiver, lorsque les conditions climatiques dans le magasin sont plus sèches et plus fraîches et réduisent les charges de l'évaporateur, et lorsque le sous-refroidissement du frigorigène liquide est plus important que durant les mois d'été [9]. Une réduction de la charge permettrait une pression d'aspiration plus élevée qui se traduirait par un COP plus élevé. Ensuite, l'amélioration possible du COP grâce à une pression supérieure dans certains équipements n'est pas exploitée. Le COP peut être amélioré en adoptant un paradigme de régulation avec ladite « pression d'aspiration flottante », permettant une pression d'évaporation plus élevée pour des charges plus faibles. La pression d'aspiration peut flotter dans ces systèmes en fonction de la charge. Cependant, la pression d'aspiration est déterminée à tout moment par la pression d'évaporation minimale requise par l'un des meubles reliés à la conduite d'aspiration commune.

Le système multiplex a été amélioré ces dernières années grâce à la conception de modèles à faible charge ^[10]. La configuration est assez similaire à celle du système précédent. Grâce à une régulation rigoureuse du système, il est possible de réduire la capacité du réservoir de liquide, car la charge en fluide frigorigène est alors limitée au strict nécessaire pour alimenter les évaporateurs du meuble de vente. La charge en frigorigène représente habituellement deux tiers, voire la moitié de celle d'un système multiplex traditionnel.

Les améliorations apportées au multiplex à faible charge ne modifient pas la longueur des conduites d'aspiration et de retour, la chute de pression du frigorigène et le pourcentage de fuite d'une charge de frigorigène qui, même réduite de moitié, reste importante.

Les meubles de vente d'un système multiplex sont généralement équipés de détendeurs thermostatiques qui nécessitent une hauteur de charge minimale pour fonctionner correctement. Ensuite, la plupart des systèmes de régulation sont dotés d'une commande tout ou rien pour actionner les ventilateurs de refroidissement, dans le but de maintenir les pressions de condensation à un niveau supérieur à un niveau minimum, même si des niveaux de température ambiante extérieure étaient susceptibles d'engendrer des pressions de condensation plus basses. Par conséquent, la température de condensation ne chute pas en dessous d'une température d'environ 20 °C, même dans les conditions froides de l'hiver. En utilisant un détendeur électronique, le système peut fonctionner avec des hauteurs de charge plus basses. Dans ce cas, la température limite du condenseur dépend de la différence de pression minimale entre aspiration et refoulement afin de maintenir un débit d'huile approprié pour la lubrification ^[11,12].

Elle peut descendre jusqu'à 4 °C pour les meubles de vente BT et 15 °C pour les meubles MT.

Système à compresseurs distribués

Dans ce système, plusieurs ensembles de compresseurs (3 à 5) sont répartis dans le supermarché (figure 4).

Ils se trouvent près des meubles de vente et ont une pression d'aspiration correspondant aux meubles qu'ils alimentent. Les circuits de frigorigène sont plus courts que dans un système multiplex, entraînant une réduction de la charge en frigorigène correspondante. Les principaux inconvénients sont liés à la surface nécessaire aux installations de froid dans le magasin et au bruit généré par le compresseur dans la zone de vente. L'utilisation de compresseurs à spirale à la place de compresseurs à piston pour le système BT avec un rapport de pression plus élevé limite le bruit, mais peut s'avérer moins efficace à vitesse de rotation nominale fixe.

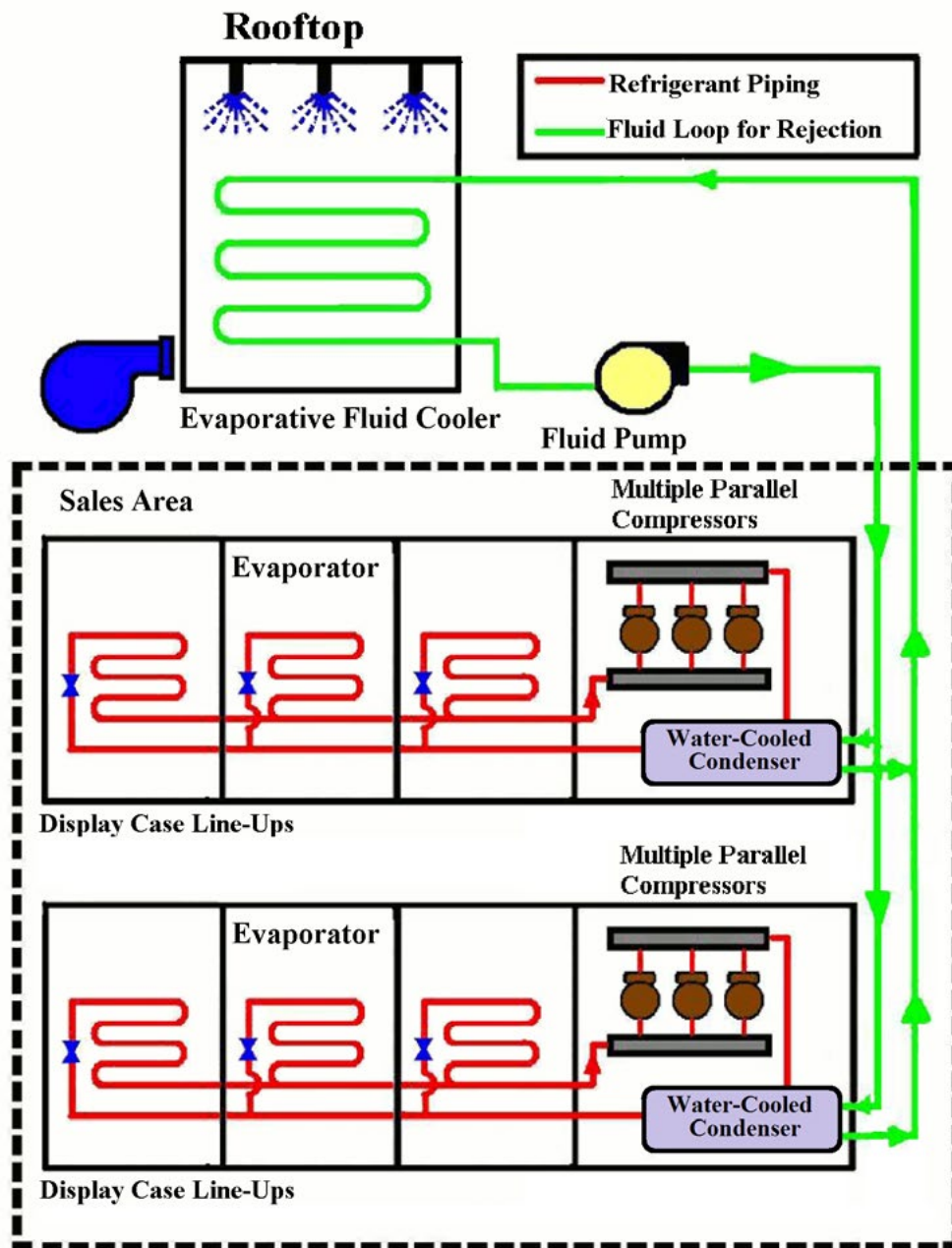


Figure 4 : Schéma d'un système à compresseurs distribués

Système avec boucle secondaire

Les systèmes avec boucle secondaire intègrent un fluide secondaire (que nous appellerons « saumure » dans la suite de cette Note d'Information) qui est refroidi par des machines frigorifiques dans une salle des machines hors de la surface de vente.

On utilise fréquemment une solution aqueuse de propylène glycol ou de formiate de potassium comme fluide secondaire. Des pompes font circuler le fluide secondaire à travers l'évaporateur du refroidisseur dans la salle des machines où le fluide est refroidi, puis vers les meubles frigorifiques de vente (figure 5).

La configuration du système est assez semblable à celle du système multiplex : deux ensembles de compresseurs (MT et BT) au moins envoient la vapeur de frigorigène vers les condenseurs en toiture. Le frigorigène liquide est ensuite acheminé vers les évaporateurs (moyenne et basse pression) où le fluide secondaire est refroidi. Des canalisations relient les évaporateurs aux meubles de vente et refroidisseurs des chambres froides. La chute de température du fluide secondaire en circulation dans les meubles de vente doit être limitée à quelques degrés Celsius, de sorte que le fluide circule à des débits élevés, généralement à 1 ms^{-1} environ. Le débit du fluide est ajusté à l'aide d'une vanne qui régule la température dans le meuble de vente.

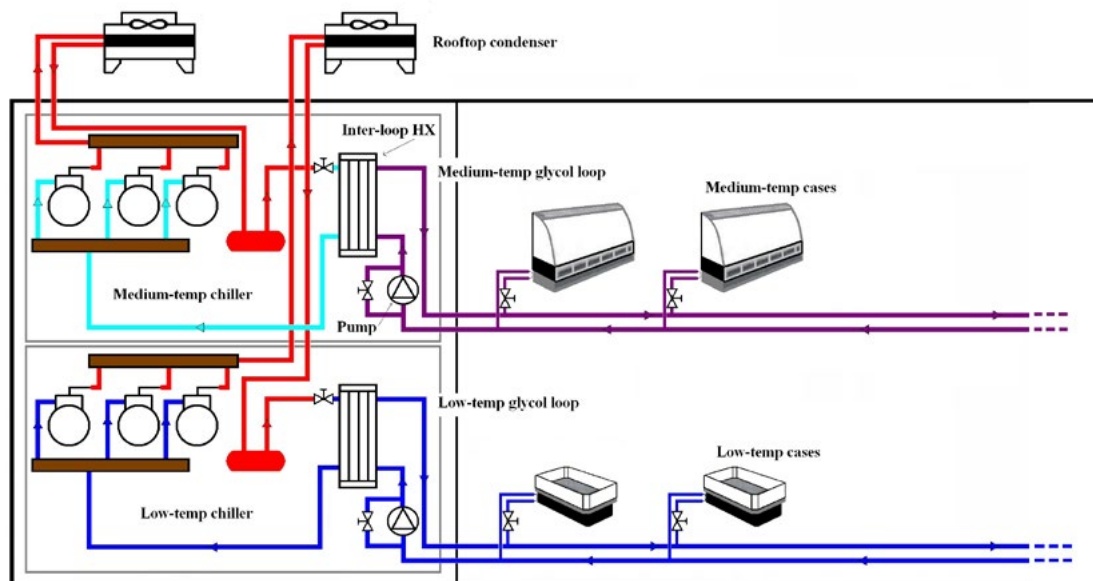


Figure 5 : Schéma d'un système avec boucle secondaire

Les évaporateurs dans les meubles de vente et autres refroidisseurs n'ont pas besoin d'être connectés par la suite à un condenseur situé à distance. Par conséquent, la charge en frigorigène est considérablement réduite, souvent à un dixième de celle d'un système multiplex, en raison de la réduction des circuits de frigorigène. La pression d'aspiration du compresseur est régie par la température de la saumure de retour de la surface de vente.

Les principaux inconvénients des systèmes à boucle secondaire sont les suivants :

- l'introduction d'un échange de chaleur supplémentaire entre le frigorigène et la saumure, qui réduit la performance par rapport aux systèmes multiplex,
- la consommation énergétique des pompes de circulation de la saumure : les fluides secondaires utilisés communément sont très visqueux, particulièrement à basses températures.

Ces inconvénients peuvent être atténués par l'utilisation d'un fluide secondaire à changement de phase. Le CO_2 a été récemment employé comme un fluide secondaire dans différentes configurations.

Système en cascade au CO₂

L'utilisation du CO₂ comme fluide secondaire dans les systèmes frigorifiques des supermarchés peut permettre de minimiser l'utilisation de fluides secondaires traditionnels, réduire la consommation électrique des pompes à liquide, améliorer le transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur associés, et finalement améliorer la performance globale du système frigorifique.

Les systèmes à boucle secondaire au CO₂ sont semblables à ceux avec saumure, comme illustré sur la figure 6 pour la conservation des aliments réfrigérés (MT) ou congelés (BT) [13]. Cependant, dans les circuits MT, un réservoir de CO₂ liquide est installé entre le condenseur en cascade et la pompe à CO₂ liquide pour assurer l'écoulement du liquide vers la pompe. Pour produire l'effet frigorifique, le CO₂ liquide à moyenne température est ensuite pompé vers l'évaporateur du meuble de vente ou du refroidisseur de chambre froide où il s'évapore. Le débit de CO₂ liquide doit être bien régulé de façon à ce que les parois intérieures de l'évaporateur restent humides. En outre, lorsque le CO₂ liquide de la boucle secondaire MT est détendu dans un réservoir BT, le CO₂ liquide à basse température peut alors être pompé et évaporé dans les meubles BT avant de retourner dans le réservoir BT, comme décrit dans la Figure 6. Dans un état de vapeur saturée, le CO₂ pourra ainsi être rejeté par le compresseur BT, comprimé et mélangé avec le flux sortant du meuble MT avant de s'écouler dans le condenseur en cascade. De ce fait, les boucles secondaires au CO₂ MT et BT peuvent être intégrées avec un système frigorifique primaire commun côté étage supérieur utilisé pour le rejet de chaleur. Les frigorigènes naturels tels que l'ammoniac, les hydrocarbures ou même le CO₂ peuvent être utilisés comme frigorigènes primaires.

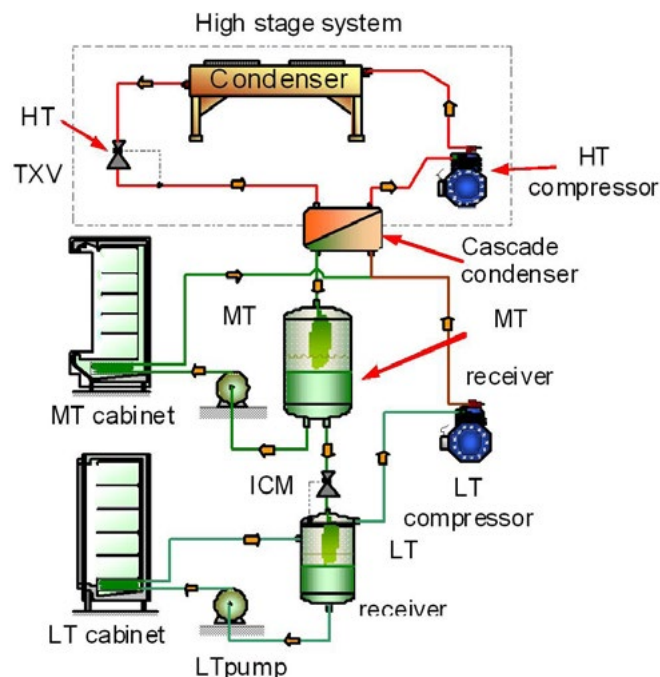


Figure 6 : Schéma d'un système avec boucle secondaire au CO₂ : combinaison MT et BT

Il convient de noter que le fluide secondaire CO₂ subit une série de changements de phase, y compris l'évaporation et/ou la condensation, alors que les fluides secondaires traditionnels ne subissent pas de changement de phase. Les processus de changement

de phase dans les meubles de vente et les condenseurs en cascade peuvent largement améliorer le transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur. De plus, il convient de souligner les propriétés thermophysiques exceptionnelles du CO_2 , plus particulièrement sa faible viscosité liquide, sa conductivité thermique liquide élevée, sa chaleur spécifique à volume constant élevée et sa masse volumique à l'état vapeur élevée. Sa faible viscosité peut réduire considérablement la chute de pression de la boucle secondaire au CO_2 , et ainsi la consommation énergétique de la pompe à liquide par rapport aux systèmes à boucle secondaire avec saumure conventionnels à la même charge thermique. En définitive, la performance globale du système frigorifique peut être considérablement améliorée [14].

Système en cascade au CO_2 avec éjecteur

La performance d'un système en cascade au CO_2/CO_2 peut être encore améliorée en installant un éjecteur côté primaire. Le principe de fonctionnement d'un éjecteur repose sur l'utilisation de l'effet Venturi d'une tuyère convergente-divergente pour convertir l'énergie de pression du fluide moteur (flux principal) en énergie cinétique pour entraîner un fluide d'aspiration (flux secondaire), puis re-comprimer ensuite les fluides mélangés en reconvertissant l'énergie cinétique en énergie de pression. Dans un système frigorifique, un éjecteur peut remplacer le dispositif de détente pour récupérer le travail du compresseur habituellement perdu dans le dispositif de détente et rendre ainsi le système plus efficace. Quand un dispositif de détente dans un système frigorifique au CO_2 transcritique est remplacé par un éjecteur, comme illustré dans la figure 7 [15, 16, 17, 18, 19, 20], le coefficient de performance (COP) peut être augmenté de plus de 10 % [21]. Il est à noter que dans un système frigorifique au CO_2 transcritique, le compresseur de CO_2 fonctionne avec une pression de décharge surcritique et une pression d'aspiration sous-critique. En outre, le processus de refroidissement du gaz CO_2 fonctionne à des températures au-dessus de son point critique, il n'y a donc pas de condensation. L'échangeur de chaleur au CO_2 côté haute pression est donc appelé refroidisseur de gaz CO_2 .

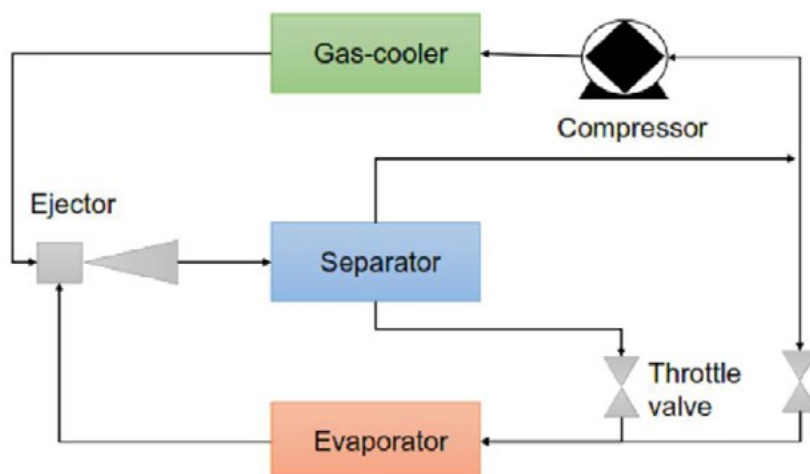


Figure 7 : Système frigorifique à détente par éjecteur transcritique

Système frigorifique autonome sur boucle d'eau (WLSC)

Dans ces systèmes, chaque meuble est équipé de ses propres évaporateur à serpentin à ailettes, compresseur, détendeur, condenseur à eau et souvent d'un variateur de fréquence (« inverter »). L'eau circulant dans une boucle et refroidie dans un refroidisseur central est reliée au condenseur de chaque meuble et utilisée pour le rejet de chaleur du meuble. La figure 8 illustre la configuration typique d'un système autonome sur boucle d'eau [22,23].

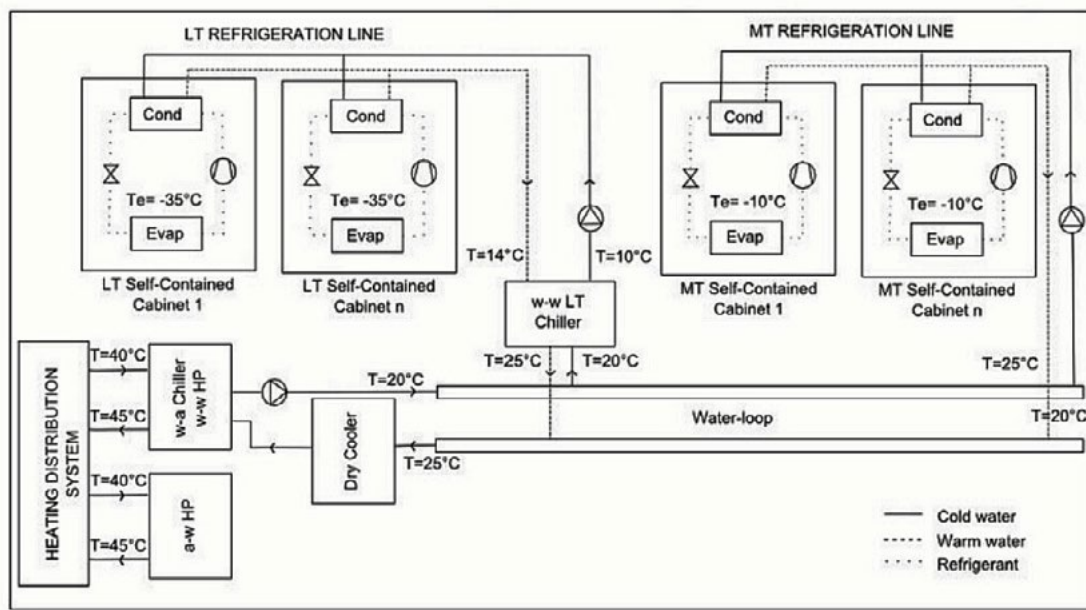


Figure 8 : Schéma d'un système autonome sur boucle d'eau

Deux boucles d'eau sont présentées : une boucle à MT et une à BT. Dans la plupart des systèmes, un refroidisseur sec est utilisé pour fournir un refroidissement naturel (par exemple pour passer de 25 °C à 20 °C) à la boucle d'eau. Si la température extérieure est trop élevée pour refroidir la boucle d'eau, on arrête les ventilateurs du refroidisseur sec et l'eau est refroidie par un refroidisseur eau-air situé en aval du refroidisseur sec. Dans les climats extrêmement chauds où un refroidisseur sec ne serait pas très efficace, seul un refroidisseur d'eau eau-air peut être installé. De plus, le système peut être équipé d'une pompe à chaleur eau-eau pour qu'en cas de besoin de chauffage, les ventilateurs du refroidisseur sec soient arrêtés et l'eau serve de source froide pour la pompe à chaleur. Ainsi, la boucle d'eau est refroidie selon les besoins, fonctionnant en même temps que la récupération de chaleur.

Pour éviter des taux de compression élevés dans le circuit BT tout en augmentant la puissance frigorifique des meubles, la température de l'eau au niveau des entrées des condenseurs (par exemple 10 °C) dans les meubles du circuit BT est inférieure à celle des meubles du circuit MT (par exemple 20 °C). Ceci est rendu possible en utilisant un refroidisseur eau-eau BT situé en amont des meubles BT.

Les systèmes autonomes sur boucle d'eau présentent plusieurs inconvénients. Le plus évident est leur complexité et, par conséquent, leur coût initial : deux cycles frigorifiques (en série) sont nécessaires pour activer le refroidisseur eau-air lorsqu'un refroidissement naturel n'est pas disponible. Le premier cycle frigorifique a lieu à l'intérieur du meuble,

le second dans le refroidisseur eau-air. Chaque échange de chaleur induit des différences de température ainsi qu'une réduction du COP. Pour des pressions d'évaporation et de condensation égales, le travail spécifique de compression est plus faible dans un système multiplex que dans un système autonome à boucle d'eau.

Un autre inconvénient du système autonome à boucle d'eau est qu'il requiert des pompes pour faire circuler l'eau à travers la boucle, et l'énergie qu'elles consomment réduit encore plus les performances du système.

Un autre inconvénient est que les compresseurs installés dans chaque meuble de vente peuvent générer du bruit dans la surface de vente.

Les principaux avantages résident dans le fait que la pression d'aspiration de chaque meuble est totalement indépendante. Ainsi, si un seul meuble nécessite une pression d'évaporation plus basse, les autres meubles peuvent fonctionner à des pressions d'évaporation différentes et supérieures. Les distances entre l'évaporateur, le compresseur et le condenseur sont également minimales avec des chutes de pression très faibles dans les conduites de raccordement et une réduction substantielle de la charge en frigorigène qui peut atteindre 5 à 10 %, comparativement à un système multiplex de même puissance. Cette caractéristique est particulièrement intéressante lorsque des hydrocarbures sont utilisés.

Les pertes de performance dues aux doubles échanges de chaleur dans la boucle d'eau peuvent être plus que compensées en équipant un système autonome sur boucle d'eau de compresseurs modulaires, de variateurs de fréquence et de détendeurs électroniques ^[11,12].

Lorsque des compresseurs modulaires sont utilisés, la température de l'air dans chaque meuble est régulée par un compresseur à vitesse variable. Lorsqu'une modulation est requise (c'est ainsi que les meubles fonctionnent la plupart du temps), le débit massique de frigorigène est réduit et l'évaporation et la condensation se font en continu la plupart du temps, contrairement à un fonctionnement en mode tout ou rien ^[24]. Puisqu'un débit massique de frigorigène plus faible réduit la puissance, la pression d'évaporation est plus élevée et la pression de condensation plus basse que dans un système avec régulation tout ou rien. Ainsi, le taux de compression est réduit et le réfrigérateur fonctionne avec un COP plus élevé que lors du fonctionnement à pleine charge. Bien sûr, le rendement du compresseur doit rester élevé, même s'il fonctionne à basse vitesse. Les moteurs CC sans balais à haut rendement et les compresseurs à vis peuvent contribuer à maintenir une efficacité acceptable, même à basse vitesse. En outre, le coût énergétique du convertisseur doit être pris en compte.

Les modèles conçus récemment peuvent maintenir la perte du variateur de fréquence à environ 3 % de la puissance totale du compresseur, contre plus de 11 % pour les modèles précédents, à condition que le compresseur fonctionne à la fréquence optimale.

La récupération de chaleur dans les systèmes frigorifiques des supermarchés

La chaleur rejetée par le système frigorifique peut être récupérée et utilisée pour le chauffage du supermarché. La désurchauffe de la vapeur du frigorigène à la sortie du compresseur peut permettre une récupération de chaleur par un serpentin dédié pour la production d'eau chaude ou le chauffage de l'air d'un espace dans tous les systèmes décrits, sauf dans les systèmes autonomes à boucle d'eau.

Dans un système autonome à boucle d'eau, la récupération de chaleur est effectuée par une pompe à chaleur dont la source froide est la boucle d'eau qui dissipe normalement la chaleur à partir du refroidisseur BT ou du circuit de refroidissement MT.

Toute la chaleur rejetée par le condenseur de toiture ne peut pas être récupérée à la pression de condensation normale. Pour obtenir une température de récupération appropriée, il faudrait une augmentation de la pression de condensation, ce qui rendrait le système frigorifique moins efficace ; la récupération de chaleur pourrait même nécessiter plus d'énergie qu'elle ne permettrait d'en économiser ^[25]. C'est la principale raison pour laquelle seule la chaleur du frigorigène désurchauffée est généralement récupérée. En outre, une augmentation de la charge en frigorigène est nécessaire pour élever la pression de condensation. Un plus grand réservoir de liquide est nécessaire pour stocker le frigorigène en excès quand l'installation fonctionne à des pressions plus basses. Chaque fois que la charge thermique est supérieure à la chaleur récupérable par désurchauffe, un système de chauffage auxiliaire est nécessaire. La chaleur récupérable peut représenter entre 20 % et 40 % du total de la chaleur rejetée, en fonction de la température de condensation et du circuit frigorifique (MT ou BT).

Cette limitation ne s'applique pas au système autonome à boucle d'eau dans lequel une pompe à chaleur peut utiliser une grande partie de la chaleur rejetée sans effet négatif sur la performance du système frigorifique autre que le coût d'entraînement de la pompe à chaleur. Une évaluation globale doit prendre en compte les différentes caractéristiques des divers systèmes.

Les frigorigènes utilisés dans les supermarchés

Comme indiqué précédemment, le frigorigène le plus fréquemment utilisé actuellement est le R404A. Le R507A est également largement utilisé. Ces deux frigorigènes sont actuellement soumis à une élimination progressive en raison de leur potentiel de réchauffement planétaire (PRP ou GWP) élevé. Le Japon a approuvé la révision de son règlement sur les fluorocarbures en 2013 ^[26]. Cette loi stipule que les frigorigènes à PRP élevé seront soumis à une réduction progressive, avec une transition vers des frigorigènes non HFC ou des frigorigènes HFC à faible PRP selon un calendrier imposé. Le R404A, en particulier, doit être remplacé par des frigorigènes ayant un PRP < 100 dans des entrepôts frigorifiques d'ici 2019 et par des frigorigènes ayant un PRP < 1500 dans les unités frigorifiques et les condenseurs d'ici 2025. Le Règlement F-gaz de l'Union européenne ^[16] a fixé les dates butoir des 1^{er} janvier 2020 et 1^{er} janvier 2022 pour la substitution du R507A et du R404A par des frigorigènes de remplacement de moyen terme (PRP < 2500) et de long terme (PRP < 150) respectivement. En 2015, l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) ^[27] a requalifié le statut du R507A et du R404A d'acceptable à inacceptable dans la fenêtre allant du 20 juillet 2016 au 1^{er} janvier 2020, en fonction de l'application, du type et de la taille de l'installation frigorifique.

Les frigorigènes de substitution potentiels peuvent être « naturels » (dioxyde de carbone, hydrocarbures, ammoniac) ou fluorés. Dans cette catégorie, seuls deux HFC (le R161 et le R152a) et un certain nombre d'hydrofluorooléfines (HFO) peuvent être envisagés afin d'atteindre l'objectif d'un faible PRP. La plupart des HFO sont classés « légèrement inflammables » (A2L selon la norme 34 de l'ASHRAE).

Les hydrocarbures, et en particulier le propane (R290) et le propylène (R1270), peuvent être utilisés pour certaines applications avec une charge réduite. Les restrictions concernant les frigorigènes inflammables ou A2L sont définies dans les pays par des réglementations locales. La plupart des pays en Europe se réfèrent à la norme EN 378. Les appareils frigorifiques commerciaux équipés d'un compresseur incorporé ou d'une unité de condensation à distance sont soumis à la norme CEI 60335-2-89, qui impose une limite de charge de 150 g pour les hydrocarbures. La dernière révision de la norme EN 378 (2017) a partiellement assoupli les limites strictes de charge des frigorigènes inflammables. Le calcul de la charge autorisée dépend du type de système frigorifique, du niveau d'inflammabilité du frigorigène et de la surface au sol occupée (pour les systèmes fonctionnant avec des frigorigènes qui sont en contact avec les surfaces occupées).

Les systèmes centralisés avec une charge en frigorigène hydrocarbure relativement élevée sont autorisés à condition que les composants contenant le frigorigène inflammable soient confinés et qu'une boucle secondaire soit utilisée. Des considérations similaires peuvent être appliquées à l'ammoniac.

L'utilisation du dioxyde de carbone comme frigorigène à la fois dans les systèmes trans-critiques et dans l'étage basse pression des systèmes en cascade combinés, a augmenté et ce, plus particulièrement dans les climats froids. Les principales contraintes quant à l'utilisation de tous les frigorigènes mentionnés ci-dessus ont été abordées dans une récente Note d'Information de l'IIF ^[7].

Évaluation des différents systèmes dans la littérature technique

Plusieurs auteurs ont procédé à une évaluation des différents systèmes, en prenant en compte divers aspects tels que les dépenses énergétiques, le TEWI (impact de réchauffement total équivalent), le coût d'investissement et les coûts d'exploitation annuels, entre autres.

Une comparaison de nombreuses caractéristiques peut être effectuée avec les descriptions du système, mais des analyses quantitatives sont nécessaires pour comparer les coûts. La principale difficulté pour procéder à des comparaisons réside dans les nombreuses variables pouvant influencer les résultats finaux. Celles-ci incluent :

- le type de supermarché (taille de la surface de vente, nombre de meubles de vente MT et BT, type et taille des chambres froides) ;
- le climat sur le lieu d'implantation du supermarché ;
- les conditions à l'intérieur du supermarché (température et humidité relative) ;
- les fuites de frigorigène.

En outre, la performance technique des équipements a un impact majeur sur les indicateurs de performance.

Toutes les comparaisons disponibles dans la littérature ne concordent pas toujours.

Une explication possible est que les systèmes anciens et non optimisés sont parfois comparés avec de nouveaux systèmes optimisés.

En principe, tous les auteurs s'accordent sur le fait que le système multiplex traditionnel a les coûts initiaux les plus faibles, les coûts d'exploitation les plus importants et les taux

annuels de fuite de frigorigène les plus élevés. Les systèmes multiplex à faible charge peuvent apporter une amélioration, en particulier s'ils sont équipés de détendeurs électroniques. Le principal désaccord entre les comparaisons disponibles concerne les mérites relatifs d'autres systèmes, avec différentes évaluations de leurs performances. Alors qu'un auteur attribue la meilleure évaluation au système à compresseurs distribués et la pire au système autonome sur boucle d'eau, mais avec des compresseurs régulés en tout ou rien ^[10], un autre auteur ^[5] donne la plus mauvaise note au système à boucle secondaire de glycol. D'autres auteurs ^[22], sur la base des données expérimentales d'un supermarché en conditions réelles, indiquent une économie annuelle potentielle de plus de 15 % pour un système autonome à boucle d'eau par rapport à un système multiplex traditionnel, même si les économies sont réduites à 8 % avec un multiplex équipé d'un détendeur électronique avec pression d'aspiration flottante.

Les principaux avantages des systèmes autonomes sur boucle d'eau sont le faible taux de compression requis, indépendant pour chaque meuble, les plus faibles chutes de pression dans les circuits et la récupération de chaleur via une pompe à chaleur qui ne nécessite pas d'augmentation de la pression de condensation, comme c'est le cas pour les autres types de systèmes mentionnés ci-dessus. Mais ces avantages sont atténués par l'énergie de pompage et l'existence d'un double cycle frigorifique. On estime le coût initial de l'investissement environ 30 % plus élevé que pour le multiplex classique, en raison de la nécessité d'un refroidisseur BT et d'une pompe à chaleur et du coût spécifique plus élevé des compresseurs (plusieurs compresseurs sont nécessaires, un pour chaque meuble, même s'ils sont de plus faible puissance). Ce coût d'investissement plus élevé est en partie compensé par un coût d'installation plus faible. En fait, comme les compresseurs et les conduites de frigorigènes sont contenus dans le meuble, le fabricant du meuble peut réaliser une partie des opérations d'installation et standardiser ainsi le processus.

En conclusion, la conception d'un nouveau supermarché ou la rénovation d'une installation existante doit faire l'objet d'une évaluation attentive par des ingénieurs experts, et de simulations appropriées afin de sélectionner les paramètres d'équipement optimaux.

Les résultats finaux peuvent être très différents, même avec des systèmes frigorifiques similaires. Les conditions climatiques avec des besoins de chauffage en hiver, des hivers froids ou doux et la répartition des meubles à basse et moyenne température peuvent entraîner des différences significatives concernant les avantages et les inconvénients propres à chacun des systèmes étudiés.

Conclusion

Dans le passé, la plupart des supermarchés étaient dotés de systèmes frigorifiques multiplex. Le principal inconvénient du concept traditionnel est la charge élevée en frigorigène et les importantes fuites de frigorigènes annuelles qui peuvent en découler.

La conception du système multiplex a été modifiée afin de limiter cet inconvénient en réduisant la charge en frigorigène et en passant d'une pression d'aspiration fixe à une pression d'aspiration flottante. Différents systèmes ont fait leur apparition par la suite : d'abord avec des ensembles de compresseurs distribués dans le supermarché, puis avec des compresseurs installés dans chacun des meubles de vente, comme pour le système autonome sur boucle d'eau.

Un autre concept consiste à séparer les équipements frigorifiques des meubles de vente et de les connecter avec des boucles secondaires. Cette approche a fait l'objet d'une solution mixte avec l'utilisation de CO₂ dans une boucle secondaire, qui peut inclure un cycle frigorifique pour les meubles BT.

Ces concepts alternatifs limitent la charge en frigorigène par rapport au système multiplex traditionnel et, par conséquent, limitent les risques de fuite. Concernant les coûts, les solutions alternatives sont généralement plus onéreuses lorsqu'il s'agit du coût d'investissement, mais la réduction potentielle des coûts d'exploitation compense généralement largement ce surcroît d'investissement. Le résultat final dépend fortement de la taille et de la localisation du supermarché. Les progrès technologiques décrits ci-dessus peuvent représenter des avantages importants en ce qui concerne les dépenses énergétiques et l'environnement. Il est donc recommandé de procéder à un examen attentif des différentes options techniques pour chaque projet, qu'il s'agisse d'un supermarché neuf ou d'une rénovation.



Recommandations

D'importants progrès ont été réalisés dans le domaine des technologies du froid concernant les systèmes traditionnels qui sont relativement économiques et faciles à installer, mais nécessitent une charge en frigorigène importante et ont généralement des taux de fuites élevés.

Les nouveaux systèmes permettent de limiter la charge en frigorigène et les fuites et également d'économiser de l'énergie et un meilleur contrôle opérationnel.

C'est la raison pour laquelle l'IIF insiste sur la nécessité de :

- développer des campagnes efficaces dans le monde entier pour promouvoir les avantages économiques et environnementaux des nouvelles technologies du froid pour les supermarchés, afin de sensibiliser les gestionnaires de supermarchés, les décideurs et les représentants de l'industrie ;
- former les professionnels du froid aux nouvelles technologies du froid appliquées aux supermarchés, en proposant des cours spécifiques et des programmes de formation sur les outils de simulation et de modélisation de pointe pour les concepteurs et les installateurs ;
- promouvoir et financer la recherche sur l'analyse des performances des technologies avancées du froid pour les supermarchés dans différents lieux et climats ;
- mettre en place un système d'incitation visant à promouvoir la rénovation ou la mise hors service des anciens systèmes frigorifiques de supermarchés ayant des taux de fuites élevés.

Références

- [1] IEA. *IEA Annexe 26 : Advanced supermarket/heat recovery systems: Final Report Volume 1 – Executive Summary*. Oak Ridge : 2003, 78 pages.
Disponible sur : <<https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub57707.pdf>> (Consulté le 15/02/2018)
- [2] GE Y. T., TASSOU S. A. Performance and optimal design of supermarket refrigeration systems with supermarket model “SuperSim”, Part I: Model description and validation. *Revue Internationale du Froid*. 2011, vol. 34, pages 527-539.
Disponible sur : <<http://bit.ly/RIF-GeTassou>> (Consulté le 14/02/2018)
- [3] TASSOU S. A., GE Y. T. HADAWAY A., et al. Energy consumption and conservation in food retailing. *Applied. Thermal Engineering*. 2011, vol. 31, pages 147-156.
Disponible sur : <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00692330/document>>
- [4] DEVIN E., MICHINEAU T., MOULINS F., et al. *Étude sur le confinement des fluides frigorigènes [en ligne]*. Rapport Final, N° de convention: 1481C0048. Paris : AFCE, Cemafrroid, IRSTEA et ADEME, 2015, 81 pages.
Disponible sur : <<http://afce.asso.fr/wp-content/uploads/2015/09/Rapport-AFCE-final.pdf>> (Consulté le 14/02/2018)
- [5] ZHANG, Ming. Energy Analysis of Various Supermarket Refrigeration Systems. **In** : *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. 17-20 juillet 2006, Purdue, 9 pages.
Disponible sur : <<https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1855&context=iracc>> (Consulté le 14/02/2018)
- [6] LUNDQVIST, P.G. Recent refrigeration equipment trends in supermarkets: energy efficiency as the leading edge? *IIR Bulletin*. 2000, vol. 5, pages 3-29.
- [7] IIF, KAUFFELD Michael. Frigorigènes alternatifs : les options actuelles sur le long terme et leurs applications. *31^e Note d'Information sur les technologies du froid. [en ligne]*. Avril 2016.
Disponible sur : <http://www.iifir.org/userfiles/file/publications/notes/NoteTech_31_FR.pdf> (Consulté le 14/02/2018)
- [8] PNUE/ONU-Environnement. *Fact Sheet 4: Commercial Refrigeration*. **In** : Site web UNEP Ozone Secretariat **[en ligne]**. Octobre 2015.
Disponible sur : <<http://bit.ly/FactSheet4>> (Consulté le 14/02/2018)
- [9] SINGH A. Optimum refrigeration control with E2. **In** : site web d'Emerson **[en ligne]**.
Disponible sur : <<http://www.emersonclimate.com/en-us/whitepapers/optimum-refrigeration-control-with-e2.pdf>> (Consulté le 6 février 2018)
- [10] WALKER D. H. *Development and demonstration of an advanced supermarket/HVAC system [en ligne]*. Final Analysis Report. Oak Ridge, 2001, 116 pages.
Disponible sur : <<http://bit.ly/OakRidgeWalker>> (Consulté le 14/02/2018)
- [11] LAZZARIN R., NARDOTTO D., NORO M. Electronic Expansion Valves Versus Thermal Expansion Valves. *ASHRAE Journal*. 2009, vol. 51, pages 34-38.
Disponible sur <<https://technologyportal.ashrae.org/Journal/ArticleDetail/867>> (Consulté le 14/02/2018)
- [12] LAZZARIN R., NORO M. Experimental comparison of electronic and thermostatic expansion valves performances in an air conditioning plant. *Revue Internationale du Froid*. 2008, vol. 31/1, pages 113-118.
Disponible sur <<http://bit.ly/RIF-Lazzarine-Noro-2008>> (Consulté le 14/02/2018)
- [13] SUAMIRI I. N. *Integration of trigeneration and CO₂ based refrigeration systems for energy conservation [en ligne]*. Thèse de doctorat en philosophie. Londres : Brunel University, 2012, 272 pages.
Disponible sur : <<http://bit.ly/Suamir>> (Consulté le 14/02/2018)
- [14] PEARSON A. Using CO₂ to reduce refrigerant charge. *ASHRAE Journal*. 2012, vol. 54, pages 38-44.
Disponible sur : <<https://technologyportal.ashrae.org/journal/articledetail/1239>> (Consulté le 14/02/2018)

[15] SÁNCHEZ D., LLOPIS R., Cabello, et al. Conversion of a direct to an indirect commercial (HFC134a/CO₂) cascade refrigeration system: energy impact analysis. *Revue Internationale du Froid*. 2017, vol. 73, pages 183-199.

Disponible sur : <<http://bit.ly/Sanchez-Llopis-2017>> (Consulté le 15/02/2018)

[16] COMMISSION EUROPÉENNE. *Règlement (UE) n ° 517/2014 du Parlement européen et du Conseil du 16 avril 2014 relatif aux gaz à effet de serre fluorés et abrogeant le règlement (CE) n ° 842/2006 Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE [en ligne]*. Journal officiel de l'Union européenne, 5 mai 2014, 36 pages.

Disponible sur : <<http://bit.ly/F-gaz>> (Consulté le 15/02/2018)

[17] BESHAR M., AUTE V., SHARMA V., et al. A comparative study on the environmental impact of supermarket refrigeration systems using low GWP refrigerants. *Revue Internationale du Froid*. 2015, vol. 56, pages 154-164.

Disponible sur : <<http://bit.ly/RIF-Beshr-Aute-2015>> (Consulté le 15/02/2018)

[18] SAWALHA, S., PERALES CABREJAS, C., LIKITTHAMMANIT, et al. Experimental investigation of NH₃/CO₂ cascade system and comparison with R-404A system for supermarket refrigeration, *In* : Refrigeration, I.I. (Ed.), *22^e Congrès International du Froid*. IIR – IIF, Pékin, Chine. 2007

Disponible sur : <<http://bit.ly/ICR-Sawalha-Perales-2007>> (Consulté le 15/02/2018)

[19] LI D, GROLL E. A. Transcritical CO₂ refrigeration cycle with ejector-expansion device. *Revue Internationale du Froid*. 2005, vol. 28 : page 73.

Disponible sur <<http://bit.ly/RIF-Li-Groll-2005>> (Consulté le 15/02/2018)

[20] BESAGNI G, MEREU R, INZOLI F. Ejector refrigeration : A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, vol. 53, pages 373–407.

Disponible sur : <<http://bit.ly/Besagni-Mereu-2016>> (Consulté le 15/02/2018)

[21] MORTAZA YARI M, MAHMOUDI S.M.S. Thermodynamic analysis and optimization of novel ejector-expansion TRCC (transcritical CO₂) cascade refrigeration cycles (Novel transcritical CO₂). *Energy*. 2011, vol. 36, pages 6839-6850.

Disponible sur : <<http://bit.ly/MortazaYari-Mahmoudi-2011>> (Consulté le 15/02/2018)

[22] BAGARELLA G., LAZZARIN R., NORO M. Annual energy analysis of a water-loop self-contained refrigeration plant and comparison with multiplex systems in supermarkets. *Revue Internationale du Froid*. 2014, vol. 45, pages 55-63.

Disponible sur <<http://bit.ly/RIF-Bagarella-Lazzarine-2014>> (Consulté le 15/02/2018)

[23] BAGARELLA G., LAZZARIN R., NORO M. On the activation strategy of the chiller in water-loop self-contained supermarkets: An experimental analysis. *Revue Internationale du Froid*. 2015, vol. 57, pages 94-102.

Disponible sur : <<http://bit.ly/RIF-Bagarella-Lazzarine-2015>> (Consulté le 15/02/2018)

[24] BAGARELLA G., LAZZARIN R., LAMANNA B. Cycling losses in refrigeration equipment: An experimental evaluation. *Revue Internationale du Froid*. 2013, vol. 36, pages 2111-2118.

Disponible sur : <<http://bit.ly/RIF-Bagarella-Lazzarin-2013>> (Consulté le 15/02/2018)

[25] ARIAS J., LUNDQUIST P. Heat recovery and floating condensing in supermarkets. *Energy and Buildings*. 2006, vol.38, pages73-81

Disponible sur : <<http://bit.ly/EB-Arias-Lundquist-2006>> (Consulté le 15/02/2018)

[26] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY (METI). *Act for Partial Revision of the Act on Ensuring the Implementation of Recovery and Destruction of Fluorocarbons concerning Designated Products*. Japon, 19 avril 2013.

[27] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Protection of Stratospheric Ozone: Change of Listing Status for Certain Substitutes Under the Significant New Alternatives Policy Program; Final Rule, vol. 80, [en ligne]*. Federal Register, Part II, 40 CFR Part 82, 20 juillet 2015.

Disponible sur : <<http://bit.ly/EPA-FinalRule20>> (Consulté le 15/02/2018)