



Avril 2016 / 31e Note d'Information sur les technologies du froid

Frigorigènes alternatifs : les options actuelles sur le long terme et leurs applications

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.

La 26e Note d'Information de l'IIF « Tour d'horizon des réglementations limitant l'utilisation des HFC. Le point sur le Règlement « F-gaz » de l'UE » a présenté les derniers développements réglementaires à l'échelle internationale, afin de limiter l'utilisation des HFC du fait de leur impact sur le réchauffement planétaire. Cette note a également précisé les exigences et les implications du Règlement « F-gaz » de l'UE, entré en vigueur le 1er janvier 2015.

Pour les acteurs du secteur du froid, les principales répercussions concernent les décisions à prendre sur le remplacement ou la conversion de leurs installations frigorifiques et le choix des frigorigènes alternatifs aux HFC les plus appropriés.

Cette Note d'Information fournit en premier lieu les caractéristiques des principaux frigorigènes à faible PRP susceptibles de remplacer les HFC et examine ensuite, application par application, les options envisageables à long terme.

Cette Note d'Information a été préparée par Michael Kauffeld (membre d'honneur de la Commission B2 de l'IIF), et a été revue par plusieurs experts des commissions de l'IIF.



INTERNATIONAL INSTITUTE OF REFRIGERATION
INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID

www.iifir.org

iif-iir@iifir.org



[#refrigeration](https://twitter.com/refrigeration)

177, boulevard Malesherbes, 75017 PARIS – France

T: 33 (0) 1 42 27 32 35 – F: 33 (0) 1 47 63 17 98

Introduction

Dans l'UE, les alternatives à faible PRP (Potentiel de Réchauffement Planétaire, en anglais « GWP » pour Global Warming Potential) aux HFC ont déjà gagné une part significative du marché dans certains secteurs : plus de 90 % des nouveaux réfrigérateurs/congérateurs ¹ ménagers et quelque 25 % des nouveaux conditionneurs d'air industriels en 2011 utilisent des frigorigènes alternatifs [Kau2012]. Cependant, dans d'autres secteurs, les technologies à faible PRP ont un poids mineur. Cela pourrait bientôt évoluer grâce au nouveau Règlement « F-gaz » et à d'autres réglementations imminentes sur les HFC, essentiellement aux États-Unis, au Canada et au Japon. En tenant compte des projets de réglementations actuellement en discussion dans d'autres pays et de l'utilisation actuelle des frigorigènes à faible PRP dans quantité de pays, la part de marché occupée par ces frigorigènes va probablement augmenter à l'échelle internationale.

Les frigorigènes à faible PRP présentent un plus faible impact en termes d'émissions directes. En outre, de nombreuses technologies à faible PRP permettent des réductions supplémentaires d'émissions indirectes grâce à une meilleure efficacité énergétique que les technologies traditionnelles aux HFC.

Fondamentalement, aucune alternative ne pourra remplacer à elle seule les HFC dans toutes les applications, de même qu'il n'existe pas de HFC unique susceptible d'être utilisé pour toutes les applications. La technologie à faible PRP la plus appropriée dépendra de nombreux facteurs, comme la situation économique et réglementaire en vigueur localement, mais aussi la situation climatique ainsi que d'autres facteurs. Néanmoins, il est évident que les HFC peuvent être éliminés dans la majorité des secteurs et remplacés par des alternatives sûres, abordables et efficaces sur le plan énergétique dans les nouveaux équipements.

Tour d'horizon des alternatives à faible PRP

L'ammoniac

L'ammoniac (R717) a le plus faible PRP (0) de tous les frigorigènes adaptés aux systèmes frigorifiques. Les systèmes frigorifiques utilisant l'ammoniac ont généralement une efficacité énergétique supérieure aux systèmes frigorifiques aux HFC. Même si l'ammoniac est toxique (la valeur limite d'exposition admissible (VEA) est de 50 ppm ou de 35 mg/m³), son odeur âcre lui confère un effet d'avertissement important. Certains mélanges ammoniac-air peuvent s'enflammer. Les limites d'inflammation correspondent à une concentration comprise entre 15 et 30 % en volume dans l'air.

L'ammoniac est un gaz alcalin dont la densité est plus faible que l'air. En l'associant à l'eau, il se forme de l'ammoniaque sous forme liquide (hydroxyde d'ammonium) ; en l'associant au dioxyde de carbone, du carbonate d'ammonium. L'acier est le matériau le plus communément utilisé pour les systèmes frigorifiques à l'ammoniac, car les mélanges ammoniac-eau sont corrosifs vis-à-vis du cuivre et du laiton. L'aluminium peut aussi être utilisé tant que l'alliage d'aluminium est exempt de cuivre et de zinc. L'aluminium résiste à l'ammoniac et à l'ammoniac contenant jusqu'à 10 % d'eau [Kau1998].

Dans les systèmes frigorifiques, étant donné que l'ammoniac provoque des températures élevées en fin de compression, les systèmes frigorifiques pour des applications à basse température doivent être conçus avec deux étages, avec un système de refroidissement intermédiaire entre les deux étages de compression. Par ailleurs, les températures élevées en fin de compression offrent d'excellentes possibilités pour la récupération de chaleur perdue. L'ammoniac reste le frigorigène de référence dans les systèmes frigorifiques industriels depuis plus de 130 ans. De par sa toxicité, il est utilisé uniquement dans les systèmes

¹ Selon le Règlement « F-gaz » de l'UE, les réfrigérateurs et congérateurs ménagers doivent utiliser des frigorigènes avec un PRP inférieur à 150 à compter du 1er janvier 2015

indirects dans les zones accessibles au public, par exemple dans des systèmes utilisant des frigoporteurs liquides ou plus récemment des frigoporteurs diphasiques pour les gammes de températures moyennes et/ou basses. Depuis peu, l'ammoniac est souvent utilisé dans l'étage haute température des systèmes frigorifiques en cascade au CO₂.

Le dioxyde de carbone

Le CO₂ (R744) est un gaz sans couleur ni odeur, qui est ininflammable et plus lourd que l'air. Même s'il est le plus gros responsable du réchauffement planétaire occasionné par l'homme, la quantité de CO₂ nécessaire dans un système frigorifique aurait une incidence négligeable sur le changement climatique si une fuite devait avoir lieu dans l'atmosphère. Le CO₂ est non toxique à de faibles concentrations, mais peut être nocif à des concentrations plus élevées. La concentration maximale admissible (CMA) pour un espace de travail est de 5.000 ppm soit 0,5 % en volume dans l'air. Un danger immédiat pour la vie ou la santé (DIVS) existe pour des concentrations de CO₂ supérieures à 4 % dans l'air (40.000 ppm). Au-delà d'une concentration de 10 % dans l'air, le CO₂ présente un effet anesthésiant et devient immédiatement mortel au-dessus de 30 % [Rhi2009].

Le CO₂ est utilisé à des pressions nettement plus élevées que d'autres frigorigènes. Dans les pompes à chaleur pour le chauffage de l'eau, les refroidisseurs de bouteilles à groupe incorporé et les systèmes frigorifiques transcritiques de supermarchés, le CO₂ est utilisé à des pressions pouvant atteindre 130 bar du côté haute pression. Les pressions de fonctionnement élevées exigent des matériaux plus solides et/ou des parois plus épaisses. En revanche, la puissance frigorifique volumétrique du CO₂ est largement supérieure à celle des frigorigènes traditionnels, ce qui permet la conception de systèmes plus compacts et de tuyauteries au diamètre plus faible. Ainsi, malgré des parois plus épaisses en raison de la pression accrue, l'utilisation de matériaux pour les tuyauteries est plus réduite [Hei2005]. Un plus petit déplacement du cylindre du compresseur permet de garantir une puissance adéquate du système. Les chutes de pression conduisent à de plus faibles chutes de température de saturation et donc à de moindres pertes d'efficacité énergétique. En raison de coefficients de transfert de chaleur plus élevés, les températures d'évaporation, par exemple, peuvent être augmentées d'environ 2 K par rapport aux HFC [Hei2005].

Comme la température critique du CO₂ est faible (31 °C), à des températures ambiantes élevées, les systèmes utilisant le CO₂ fonctionneront la plupart du temps dans un cycle transcritique². Le rejet de la chaleur se fait alors en refroidissant le fluide supercritique comprimé côté haute pression, en réduisant constamment sa température. Les conditions côté basse pression restent sous-critiques dans des conditions normales. Habituellement, l'efficacité énergétique des systèmes frigorifiques transcritiques est inférieure à celle des systèmes frigorifiques classiques pour lesquels le frigorigène est condensé côté haute pression. Cette caractéristique peut être en partie compensée par l'application d'un échangeur de chaleur interne, dont l'impact positif sur l'efficacité énergétique est plus marqué dans le cas du CO₂ transcritique que dans celui d'autres frigorigènes. Le choix de la haute pression a une influence tout aussi essentielle sur l'efficacité énergétique. Il existe une haute pression optimale pour chaque température de sortie du refroidisseur de CO₂ à l'état gazeux ; par exemple, la haute pression doit être ajustée en fonction de la température de l'air ou de l'eau de refroidissement afin d'obtenir un «COP» (coefficient de performance) maximum.

² La différence entre la température de condensation du frigorigène et la température critique est importante pour l'efficacité de l'équipement, sauf si celui-ci est explicitement conçu pour fonctionner en mode transcritique (comme c'est souvent le cas avec les systèmes au CO₂). Pour un équipement classique à cycle de compression de vapeur, la température de condensation se situe bien en dessous de la température critique, car les propriétés thermodynamiques du frigorigène (telles que la pente des isentropes dans la zone vapeur) et la déviation du cycle de Carnot due à une diminution de la variation d'entropie à température constante, entraînent une diminution de la puissance et de l'efficacité puisque les températures de rejet de chaleur (condensation du frigorigène) augmentent et se rapprochent de la température critique.

La régulation d'un système frigorifique au CO₂ doit tenir compte de cette caractéristique et doit ajuster en permanence la haute pression afin d'assurer une faible consommation énergétique. La régulation électronique est en mesure de permettre que le système fonctionne avec la plus faible consommation d'énergie possible, et ce, pour une large gamme de conditions de fonctionnement [Cec2007].

À des températures ambiantes avoisinant 26 °C, les systèmes frigorifiques classiques au CO₂ refroidis par air peuvent atteindre une efficacité énergétique comparable à celle des systèmes frigorifiques à évaporation directe utilisant les HFC. À des températures ambiantes plus basses (inférieures à 24 °C), le système au CO₂ obtient même une meilleure efficacité énergétique [Fin2011]. De nouveaux développements tels que les petits systèmes frigorifiques à sous-refroidissement mécanique et les systèmes avec éjecteurs comme dispositifs de détente et compression parallèle permettent de ramener cette température de transition à des valeurs plus élevées, par exemple, autour de 30 °C pour le sous-refroidissement mécanique et 40 °C pour le cycle à éjecteur [Haf2015].

Comme le CO₂ offre une très bonne efficacité énergétique à des températures de condensation et d'évaporation basses, il est souvent le frigorigène de prédilection pour l'étage basse température dans les systèmes frigorifiques commerciaux et industriels en cascade, avec l'ammoniac ou les hydrocarbures dans l'étage supérieur. Le Règlement « F-gaz » de l'UE encourage explicitement ces solutions pour les systèmes frigorifiques centralisés des supermarchés avec des mesures d'interdiction de mise sur le marché pour lesquelles les frigorigènes jusqu'à un PRP de 1.500, comme le R134a, sont autorisés dans l'étage supérieur d'un système indirect. Beaucoup de fabricants de systèmes frigorifiques offrent de tels systèmes en cascade dans leur gamme de produits standards [Sie2007]. Ces systèmes sont compétitifs vu les coûts d'investissement induits, en particulier pour les hypermarchés. Dans ces applications en cascade, les températures de condensation typiques du système au CO₂ avoisinent 0 °C et, en conséquence, la pression de service maximale de CO₂ est maintenue en dessous de 40 bar³. Les systèmes en cascade au CO₂ permettent d'atteindre une bonne efficacité énergétique surtout lorsqu'ils sont combinés avec de l'ammoniac ou des hydrocarbures dans l'étage haute température.

Les hydrocarbures

Les hydrocarbures sont nettement moins coûteux que les HFC. Ils présentent un potentiel de réchauffement planétaire inférieur à 20 et un potentiel d'appauvrissement de l'ozone nul. Ils sont non toxiques, pratiquement inodores et répondent à beaucoup des spécifications requises pour les frigorigènes. Cependant, ils sont inflammables (voir Tableau n°1). Néanmoins, ils sont très répandus en Europe et en Asie dans les réfrigérateurs ménagers et les meubles de vente autonomes avec des charges en frigorigène inférieures ou égales à 150 g, ce qui correspond à la valeur limite supérieure définie par la norme CEI 60335-2-89⁴. Pour des charges supérieures, des exigences particulières sont prescrites au regard de leur inflammabilité. En général, un système frigorifique initialement conçu pour les HFC nécessitera entre 50 et 60 % de frigorigène en moins (en masse) quand il est chargé en hydrocarbures [GTZ2010]. Une diminution importante de la charge en frigorigène est possible, si la charge minimale en frigorigène fait partie des exigences de conception [IIR2014]. Les équipements frigorifiques à groupe incorporé actuels, avec des charges en frigorigène inférieures à 150 g,

³ À défaut de précautions particulières en matière de sécurité, comme par exemple la présence d'un système frigorifique auxiliaire, d'un vase d'expansion, d'un point froid ou d'un récipient sous pression attitré, la pression du CO₂ risque de dépasser les 40 bar pendant des périodes prolongées d'immobilisation. La pression de saturation du CO₂ à 25 °C s'élève à 64 bar ! Il est donc conseillé de mettre en place les soupapes de sécurité et les composants qui s'imposent en cas de pressions plus élevées.

⁴ La CEI 60335-2-89 est une norme de la Commission Électronique Internationale qui détaille les exigences de sécurité pour les appareils électriques commerciaux dotés d'un compresseur incorporé ou qui se déclinent en deux unités assemblées en un seul appareil en conformité avec les instructions du fabricant (système split).

peuvent atteindre des puissances frigorifiques allant jusqu'à environ 1.000 watts [Rhi2009 et Pad2015]. Hoehne *et al.* [Hoe2004] indiquent 50 g par kW de puissance frigorifique comme valeur limite accessible, en utilisant des échangeurs de chaleur à plaques et/ou à micro-canaux ; ainsi 150 g de charge en hydrocarbure permettraient d'atteindre une puissance frigorifique de 3 kW sans modification des normes de sécurité. Des modifications sont en train d'être apportées à la norme EN378 et devraient entrer en vigueur courant 2016. Elles visent à étendre la charge limite à 500 g pour les équipements hermétiquement scellés si une évaluation appropriée des risques est réalisée [Rinne2015].

Tableau n°1 : Limites et températures d'inflammabilité de certains hydrocarbures [AL2007]. Les étincelles électriques suffisent comme source d'inflammation- l'énergie requise est d'environ 0,25 mJ.

	Limites inférieure et supérieure d'inflammabilité dans l'air sec en volume (%)	Température d'inflammabilité (°C)
Isobutane (R600a)	1,3 - 9,8	543
Propane (R290)	1,7 - 10,9	470
Propène (R1270)	2,0 - 11,1	460
À titre de comparaison : essence	ca. 1,1 - 7,0	ca. 300

Les hydrocarbures utilisés comme frigorigènes sont plus lourds que l'air. Des mélanges inflammables avec l'air sont donc formés dans les zones basses. Lorsque de plus grandes charges en frigorigène sont utilisées, des détecteurs de gaz et des dispositifs d'évacuation d'air appropriés doivent être installés au niveau du sol. Les hydrocarbures se mélangent très bien avec les huiles minérales. Les huiles synthétiques hygroscopiques utilisées avec les HFC sont à éviter.

- **L'isobutane (HC-600a)** est le frigorigène standard pour les réfrigérateurs et congélateurs ménagers en Europe et dans de nombreux pays d'Asie. Plus de 40 millions d'appareils utilisant l'isobutane sont produits chaque année dans le monde. L'isobutane est également utilisé pour les plus petites unités commerciales à groupe incorporé, comme par exemple, les congélateurs-coffres pour crème glacée. En raison de niveaux de pression et de rapports de pression inférieurs, les équipements frigorifiques fonctionnant à l'isobutane sont plus silencieux que les équipements comparables utilisant le HFC-134a.
- **Le propane (HC-290)** est utilisé par certains fabricants pour les refroidisseurs de bouteilles à groupe incorporé, les congélateurs coffres et les vitrines à usage alimentaire. Ces unités ont généralement des puissances frigorifiques plus élevées que les réfrigérateurs domestiques, nécessitant l'usage du propane, frigorigène dont la pression est plus élevée. Lorsque les exigences réglementaires en matière de sécurité sont remplies (c'est-à-dire CEI 60335-2-89), le propane est un excellent frigorigène pour ces unités. Il peut être utilisé avec des composants disponibles sur le marché, est miscible avec les huiles minérales, et provoque des températures de fin de compression plus faibles. Plusieurs fabricants ont signalé une meilleure efficacité énergétique pour les unités au propane que pour les unités comparables utilisant les HFC ; par exemple, van Gerwen [Ger2008] a fait état d'une efficacité supérieure de 8 % lors d'essais de meubles de vente pour crèmes glacées (R290 vs R404A) et Jürgensen [Jür2004] a mesuré des gains d'efficacité de 10 % dans un congélateur commercial (R290 vs R404A). Par ailleurs, les rapports de pression et les différences de pression sont plus faibles avec le R290 qu'avec le R404A, entraînant des émissions sonores inférieures.

- **Le propène (HC-1270)** ou propylène est un hydrocarbure doté d'une liaison carbone insaturée (double liaison de carbone). De ce fait, il est moins stable que le propane. Les systèmes utilisant le propylène peuvent atteindre une efficacité énergétique légèrement meilleure que le même système au propane. C'est pour cette raison qu'un fabricant allemand de systèmes frigorifiques commerciaux a utilisé le propylène dans ses systèmes frigorifiques indirects pour supermarchés dans les années 1990 [Rhi2009]. Ces systèmes ont ensuite été abandonnés au profit de systèmes en cascade au dioxyde de carbone en raison de la performance énergétique médiocre des systèmes à frigoporteur liquide dans la partie basse température (congélateur) des systèmes. Les essais effectués sur un prototype d'unité de transport frigorifique ont montré que le propylène permettait d'obtenir une amélioration de l'efficacité énergétique de l'ordre de 12 à 17 % par rapport au R404A [Bur2011].

Une amélioration de 5 à 10 % de l'efficacité énergétique lors de la conversion d'une installation des HFC aux hydrocarbures semble être un chiffre raisonnable, imputable aux propriétés des hydrocarbures ; les publications mentionnant des améliorations d'énergie supérieures tiennent généralement compte de l'optimisation des composants.

L'eau

L'eau (R718) est le fluide le plus bénin sur le plan écologique (non toxique, ininflammable, ODP nul et PRP négligeable) et le plus communément utilisé comme fluide caloporteur en froid indirect⁵ et en conditionnement d'air (refroidisseurs d'eau). Les propriétés thermophysiques de l'eau (pression de vapeur très basse et point de congélation à 0 °C) restreignent son utilisation en tant que frigorigène à des applications supérieures à 0 °C. Plusieurs entreprises ont ou vont commercialiser des refroidisseurs au R718 de 45 kW ou annoncent des puissances de plusieurs centaines de kW entre 2015 et 2016. Des travaux de recherche et de développement se poursuivent pour utiliser ces mêmes compresseurs dans la production (sous vide) de coulis de glace. Les premiers systèmes ont déjà été installés sous la forme de pompes à chaleur sur eau de mer et de canons à neige pour des installations de ski couvertes.

Les HFC insaturés

Les HFC insaturés - des molécules à double liaison carbone, également appelées hydrofluoro-oléfiniques (HFO) - ont été développés à partir de molécules de propylène en guise d'alternative aux HFC dont le potentiel de réchauffement planétaire (PRP) est élevé. Les HFC insaturés sont utilisés seuls, comme le HFC-1234yf pour les systèmes de conditionnement d'air automobiles, ou bien associés à d'autres HFC, afin de réduire le PRP du mélange. Les HFC insaturés possèdent une forte réactivité et donc des durées de vie dans l'atmosphère plus courtes, ce qui abaisse leur PRP.

Des inquiétudes existent autour du potentiel impact environnemental d'un usage à grande échelle des HFO et des émissions qui en résultent. L'acide trifluoroacétique (TFA), par exemple, est un sous-produit fréquent en cas de décomposition des HFC ; pour autant, le HFC-1234yf libère 4 à 5 fois plus de TFA que le HFC-134a [Lue2010]. Le remplacement des HFC actuels par des HFC insaturés risquerait donc d'augmenter la concentration en TFA. En conséquence, le Règlement européen « F-gaz » demande que soient communiqués, au titre de l'Article 19, les « autres gaz fluorés à effet de serre »⁶, afin que la quantité utilisée puisse être contrôlée et si nécessaire, que des mesures soient prises en conséquence.

⁵ Pour des températures inférieures au point de congélation de l'eau, des additifs sont ajoutés comme différents sels, alcools ou glycols, mais c'est l'eau qui constitue habituellement la plus grande proportion de ces mélanges.

⁶ cf. Annexe II du Règlement « F-gaz » qui fournit une longue liste de gaz fluorés y compris de nombreux HFO tels que le R1234yf et le R1234ze(E).

Les HFC insaturés ont un faible PRP, car leur double atome de carbone les rend instables dans l'atmosphère. Cette même double liaison atomique entraîne leur décomposition en de nouveaux composants chimiques à l'intérieur d'organismes vivants [Sch2010], limitant ainsi leurs usages potentiels (médicaments, agents propulseurs...). Un autre problème réside dans la légère inflammabilité des HFO : ils sont classés A2L selon la norme 34 de l'ASHRAE et la norme ISO 817 car, lorsque soumis à une température de 23 °C et 101,3 kPa, ils ont une vitesse de combustion maximale de 10 cm/s, dépassant ainsi les limites exigées par la classe 2, soit une limite d'inflammabilité supérieure à 3,5 % du volume d'air et une chaleur de combustion inférieure à 19.000 kJ/kg. Même si cela peut paraître négligeable, cela peut constituer un frein à certaines utilisations et dans tous les cas, cela exige certaines précautions. De plus, la décomposition des HFC insaturés lors d'un incendie et leur recombinaison consécutive peuvent être à l'origine de produits de décomposition, par exemple le fluorure d'hydrogène (HF) et le fluorure de carbonyle (COF₂, limite toxicité de 1 ppm), qui sont toxiques pour l'homme. La valeur DIVS (danger immédiat pour la vie et la santé) du fluorure d'hydrogène dans l'air est de 30 ppm.

En plus des éléments précédemment cités, les HFO sont relativement coûteux. Le prix actuel des HFO est un peu plus élevé qu'attendu lorsqu'il sera produit à grande échelle, mais même pour une production à grande échelle, on s'attend de toute façon à ce que le coût des HFO soit bien plus élevé que celui des HFC.

Compte tenu de tous ces risques potentiels, on peut donc légitimement s'interroger sur l'avenir à long terme des HFC insaturés. Pour certaines applications, les HFO peuvent certainement constituer une alternative à court et moyen terme.

R32 et mélanges HFC-HFO

Il convient également de citer le R32 (HFC-32). Il a été choisi par plusieurs fabricants de systèmes de conditionnement d'air pour remplacer le R407C ou le R410A, en particulier en Asie. Le R32 n'est pas toxique mais il est légèrement inflammable (classification de sécurité A2L ASHRAE/ISO) ; cependant, lorsqu'il est mélangé à l'air, les flammes se propagent à des vitesses beaucoup plus faibles que les mélanges d'hydrocarbures. Le R32 est donc considéré comme moins dangereux que les hydrocarbures.

Le HFC-32 est utilisé en tant que composant du R410A, du R407C et d'autres mélanges de la série R407. Son PRP (675) est relativement élevé, mais il est largement inférieur à celui du R410A, du HCFC-22 ou du R407C, qu'il peut remplacer. Sa pression et sa puissance volumétrique sont 1,5 fois plus élevées que celles du HCFC-22 et 10 % plus que celles du R410A. C'est également un composant des nouveaux mélanges HFC-HFO avec un PRP faible ou intermédiaire. Ces mélanges sont particulièrement appropriés pour les conversions immédiates lorsque la durée de vie de l'installation est prolongée. Dans la perspective d'une réduction progressive (« phase-down ») plutôt qu'une élimination des HFC, le R32, ainsi que tous les mélanges susmentionnés, qui se multiplient rapidement, font probablement partie des solutions envisageables à court et moyen terme.

Ces différentes alternatives constituent les options essentielles en termes de frigorigènes à composant unique. Comme McLinden *et al.* l'ont démontré après avoir analysé les 100 millions de composés recensés dans la base de données PubChem, et en affinant progressivement avec des critères encore plus restrictifs la liste des fluides susceptibles de convenir en tant que frigorigènes avec un PRP faible, jusqu'à atteindre 21 candidats : « Il n'y a pas de fluide « magique » qui constituerait une solution de remplacement immédiate (« drop-in »). [...] En d'autres termes, nous nous heurtons aux limites de ce que la chimie permet. » Les auteurs donnent comme argument que les 21 candidats qu'ils ont identifiés représentent tous des alternatives viables pour les frigorigènes à composant unique et à moyenne et haute pression [McL2015] ⁷.

⁷ En plus des fluides décrits dans cette Note d'Information, McLinden *et al.* (McL2015) identifient le diméthyléther (frigorigène utilisé par Jacob Perkins pour son appareil breveté en 1834) et les éthers fluorés comme candidats possibles ; une série de fluides déjà mentionnés par des chercheurs japonais pendant le séminaire NIST sur les frigorigènes alternatifs en 1989.

Options possibles par application

La seconde partie de cette Note d'Information se concentre sur les applications individuelles en proposant des technologies viables, déjà disponibles dans le contexte de l'application des réglementations de l'UE et de la réduction progressive de l'utilisation des HFC. Différentes solutions utilisant des frigorigènes à faible PRP sont décrites ci-dessous.

Froid commercial

Le froid commercial peut se diviser en trois principales catégories d'équipements : les unités autonomes ou à groupe incorporé (similaires aux réfrigérateurs ménagers) avec des puissances frigorifiques allant de quelques centaines de watts à presque 5 kW, les unités à condensation aux puissances frigorifiques allant de quelques kW à presque 100 kW et les grands systèmes frigorifiques centralisés de supermarchés aux puissances frigorifiques allant jusqu'à 1.500 kW et aux charges de HFC pouvant atteindre 3.000 kg.

Les unités autonomes (à groupe incorporé)

Les unités autonomes sont conçues avec les frigorigènes à faible PRP suivants : HC-600a, HC-290 et R744 (CO₂).

On annonce souvent que l'efficacité énergétique des unités utilisant les hydrocarbures est jusqu'à 30-40 % plus élevée que celle d'appareils comparables utilisant les HFC [Jür2004, Ped2008, Mas2014] ; 5 à 10 % de cette amélioration peuvent être attribués aux meilleures propriétés de transfert et thermodynamiques des hydrocarbures : le reste est probablement dû à la modification des composants tels que l'amélioration du compresseur ou de la conception de l'échangeur de chaleur, ainsi qu'à un entraînement à vitesse variable. On estime que 800.000 appareils commerciaux aux hydrocarbures ont été fabriqués avant 2010 [Sch2011].

Les appareils au CO₂ permettent d'obtenir une efficacité énergétique légèrement supérieure à celle des appareils aux HFC sous des climats tempérés ou intérieurs [Sch2011]. Plusieurs milliers d'appareils au CO₂ ont été produits, principalement des refroidisseurs de bouteilles.

Les deux options sont techniquement viables et plusieurs centaines de milliers d'unités commerciales à groupe incorporé utilisant des hydrocarbures ont été fabriquées avec des charges en frigorigène allant jusqu'à 150 g pour la plupart des fabricants. Certains fabricants européens commercialisent des équipements avec une charge en hydrocarbures allant jusqu'à 1 kg et même jusqu'à 2,5 kg en fonction des réglementations nationales en vigueur [RTOC2010]. Ces derniers temps, des appareils avec condenseurs refroidis à l'eau ont été introduits sur le marché. Ces appareils sont reliés à une boucle d'eau classique ou à une boucle d'eau glycolée afin de rejeter la chaleur de toutes les unités autonomes à groupe incorporé installées sur le marché.

Les unités de condensation

À travers le monde, environ 34 millions d'unités de condensation sont utilisées principalement dans de petits magasins ou dans des chambres froides individuelles [RTOC2010]. Les alternatives aux HFC pour les unités de condensation sont également les hydrocarbures et le CO₂. Tandis que les hydrocarbures (principalement le HC-290) sont viables en évaporation directe (DX) uniquement dans de petits systèmes pour des raisons de sécurité (1,5 à 25 kg de charge en hydrocarbures maximum dans les zones non publiques selon les réglementations nationales), le CO₂ peut être utilisé partout. D'un point de vue technique, les hydrocarbures pourraient couvrir la gamme entière des unités de condensation et consommer entre 5 et 10 % d'énergie en moins que les unités de condensation aux HFC. En raison de l'inflammabilité des frigorigènes de type hydrocarbure, des précautions

particulières comme l'installation de détecteurs de fuites ou de systèmes de ventilation sont à prendre, ce qui correspond à une augmentation pouvant aller jusqu'à 25 % de la valeur de l'investissement initial [Sch2011].

Face à ces problèmes de sécurité, si les hydrocarbures sont utilisés dans des zones accessibles au public, comme une épicerie, des systèmes à boucle secondaire (communément appelés systèmes frigorifiques indirects) sont nécessaires dans de nombreux pays pour des puissances frigorifiques plus importantes. De tels systèmes indirects peuvent fonctionner de manière efficace dans les gammes de températures moyennes, mais elles consomment davantage d'énergie dans les gammes de températures basses en fonctionnant avec un frigoroporteur liquide. Utiliser le CO₂ comme frigorigène secondaire d'évaporation permet d'utiliser des unités de condensation aux hydrocarbures, également efficaces d'un point de vue énergétique pour des applications à basse température. Les pompes à CO₂ nécessaires à cela sont disponibles au niveau mondial.

Le CO₂ peut aussi être utilisé en tant que frigorigène unique. De telles unités de condensation au CO₂ sont censées fonctionner avec une meilleure efficacité énergétique que les unités de condensation aux HFC dans les climats froids et tempérés alors qu'elles sont censées consommer plus d'énergie dans les climats chauds. Ces trois cas de figure, c'est-à-dire expansion directe d'hydrocarbure, systèmes indirects et systèmes à compression de vapeur au CO₂, sont techniquement viables et ont fait leurs preuves dans quelques installations pour le CO₂ jusqu'à plusieurs centaines d'installations pour de petits systèmes directs et indirects aux hydrocarbures. Pour autant, aucun de ces systèmes alternatifs ne peut atteindre une efficacité énergétique aussi élevée que celle des systèmes aux HFC.

Les systèmes centralisés

Les systèmes centralisés sont l'option privilégiée dans les supermarchés étant donné qu'ils atteignent une meilleure efficacité énergétique que les meubles de vente à groupe incorporé et les unités de condensation. Ils fonctionnent avec des armoires de compresseurs installées dans une salle des machines, utilisant traditionnellement du HFC dans des systèmes frigorifiques à détente directe. Parce que tous ces meubles/évaporateurs sont connectés à tous les compresseurs dans un système composé, les charges en HFC sont assez élevées, pouvant atteindre 3.000 kg pour les supermarchés, ce qui implique des émissions élevées en cas de défaillance de composant comme des ruptures de tuyauteries dues à des vibrations excessives. De plus, les centaines de joints des systèmes de grande taille étant sujets à des fuites régulières, de tels systèmes ont souvent des taux de fuites de HFC de l'ordre de 10-15 % [Sch2011].

Pour les systèmes frigorifiques centralisés des supermarchés, au moins sept ou huit alternatives « sans HFC » existent [Rhi2009]. Les frigorigènes alternatifs utilisés sont l'ammoniac, le CO₂ et les hydrocarbures, principalement le propane (HC-290) et le propylène (HC-1270). Tandis que le CO₂ peut être utilisé à l'intérieur des zones commerciales, toutes les autres alternatives sont confinées dans la salle des machines ou dans une installation extérieure en raison de la toxicité (ammoniac) ou de l'inflammabilité (HC-290 et HC-1270) du frigorigène.

Avec le CO₂ comme unique frigorigène dans un système DX déporté, dans les climats tempérés, la consommation énergétique annuelle est généralement plus basse que dans un système aux HFC [Fin2011, Saw2008]. L'efficacité énergétique des systèmes standards au CO₂ est meilleure que celle des systèmes aux HFC comparables pour des températures inférieures à 22 °C, environ équivalente pour des températures comprises entre 22 °C et 26 °C, et moins bonne pour des températures ambiantes plus élevées [Fin2011]. La faisabilité technique a fait ses preuves avec plus de 4.000 systèmes équivalents répartis dans toute l'Europe, 1.000 autres en Asie et Australie et plus de 100 en Amérique du Nord [Masson2014]. Passer des HFC au CO₂ peut réduire l'empreinte carbone des

supermarchés de 25 % [EPA2010]. Avec de nouveaux développements comme les systèmes à économiseur (détente bi-étagée avec recompression de la vapeur instantanée), les unités de sous-refroidissement mécaniques, les systèmes à éjection et les machines de détente, l'efficacité des systèmes au CO₂ peut augmenter dans l'avenir étant donné que de tels systèmes offriront une meilleure efficacité énergétique, même dans les climats plus chauds [Huf2012 et Haf2015].

L'ammoniac et les hydrocarbures exigent des systèmes à boucle secondaire (indirects) dans les zones accessibles au public. Traditionnellement, les fluides liquides (à base d'eau) sont utilisés à la fois dans les applications à moyenne température (MT) et basse température (BT). En raison de la viscosité élevée des fluides à base d'eau dans les applications BT, la consommation d'énergie est plus élevée dans les systèmes indirects BT que dans les systèmes DX comparables. Par conséquent, les frigoporteurs liquides sont principalement utilisés dans les applications à moyenne température là où ils ont des efficacités énergétiques similaires aux systèmes aux HFC à détente directe avec un coût supérieur de 10 à 30 % [Sch2011]. La boucle BT d'un système indirect à l'ammoniac ou aux hydrocarbures est désormais généralement construite comme un système au CO₂ en cascade pour parvenir à une meilleure efficacité énergétique que celle des systèmes aux HFC. Tous les systèmes indirects ainsi que la solution CO₂ en cascade sont techniquement réalisables et ces systèmes se retrouvent par milliers dans les supermarchés du monde entier et particulièrement au Canada, en Allemagne, au Luxembourg, en Scandinavie et en Suisse [pour les systèmes en cascade : Masson2014]. Les systèmes indirects sont également en train de grignoter des parts de marché aux États-Unis [EPA2010].

Les systèmes distribués dont les compresseurs sont installés à proximité des vitrines, à l'intérieur ou très proches de la surface de vente (plutôt que dans une salle de machine distincte), sont aussi très répandus aux États-Unis et ont été promus lors de l'édition 2014 du Salon Euroshop de Düsseldorf, en Allemagne, et ce, par plusieurs fabricants. Dans le cas où ils sont installés à l'intérieur de la surface de vente, les compresseurs sont logés dans des enceintes insonorisées et les condenseurs sont refroidis par une boucle d'eau. Ces systèmes peuvent considérablement réduire la charge en frigorigène et, à condition que les précautions de sécurité nécessaires soient prises, on peut également utiliser des frigorigènes de type hydrocarbure. Les systèmes distribués (avec HFC) représentent 40 % des nouvelles installations aux États-Unis [EPA2010]. En plus de réduire la charge en frigorigène, la proximité des compresseurs avec les vitrines et les refroidisseurs permet à ces systèmes d'utiliser beaucoup moins de tuyauterie que les systèmes à détente directe traditionnels, entraînant ainsi une diminution des pertes de pression de la ligne d'aspiration.

Froid industriel

Les systèmes de froid industriel sont caractérisés par des taux d'extraction de chaleur compris entre 10 kW et 10 MW, avec des températures d'évaporation typiques de -50 °C à +20 °C. Environ 75 % de la puissance frigorifique industrielle dans son ensemble est installée dans l'industrie alimentaire, le reste se trouvant dans les procédés industriels et les applications destinées aux loisirs [Sch2011]. Plus de 90 % des grandes installations de froid industriel utilisent l'ammoniac (R717). Pour les systèmes de froid industriel plus petits [RTOC2010], la part de marché de l'ammoniac s'élève à seulement 5 % en Inde et en Chine et à 25 % en Europe et en Russie. Les systèmes industriels utilisant l'ammoniac sont en général 15 % plus efficaces sur le plan énergétique que leurs équivalents aux HFC, et 40 % des systèmes européens de froid industriel utilisent de l'ammoniac [Sch2011].

Les hydrocarbures ne sont pas beaucoup utilisés, sauf dans les situations où des mesures de sécurité sont imposées, par exemple dans une usine pétrochimique. « Ils offrent une

excellente efficacité et sont compatibles avec la plupart des matériaux et des lubrifiants. Toutefois, les précautions nécessaires pour éviter l'inflammation sont nettement plus coûteuses que celles qui sont requises pour les systèmes à l'ammoniac. » [RTOC2010]

Le CO₂ présente une excellente efficacité lorsqu'il est utilisé dans l'étage basse température d'un système en cascade, combiné à l'ammoniac dans l'étage haute température, en particulier dans l'industrie alimentaire, où le frigorigène doit s'évaporer dans un équipement de congélation installé dans l'usine. Dans les climats froids, le CO₂ est aussi efficace sur le plan énergétique s'il est utilisé seul.

L'air peut être utilisé avec une bonne efficacité énergétique dans les applications à basse température, à savoir inférieure à -50 °C. Un fabricant au moins offre de tels systèmes et annonce des améliorations de l'efficacité énergétique de 20 % à -50 °C et de 33 % à -60 °C par rapport au R22 [Mac2011].

Transport frigorifique

Les frigorigènes naturels sont utilisés dans une faible mesure à bord des navires dans le monde entier (ammoniac, CO₂) [RTOC2010]. Pour les navires de pêche européens, le système en cascade ammoniac-CO₂ est l'option à privilégier car il utilise environ 6 % d'énergie en moins [Sch2011].

Les premiers essais sur le terrain ont débuté sur de petites flottes de conteneurs utilisant du CO₂. Dans l'avenir, les hydrocarbures pourraient également devenir une option techniquement envisageable pour les conteneurs frigorifiques.

Un fabricant propose un système à compression bi-étagé pour conteneurs frigorifiques intermodaux [RTOC2014]. Celui-ci atteint une efficacité énergétique comparable à celle des systèmes aux HFC en climat froid ou tempéré [RTOC2014]. Des tests antérieurs et actuels effectués sur des conteneurs et des camions utilisant du CO₂ laissent à penser que le CO₂ sera introduit à plus grande échelle lorsque des compresseurs plus efficaces avec plus d'un étage de compression (en cours de développement) seront disponibles sur le marché [RTOC2014].

L'utilisation du HC-290 dans les unités frigorifiques des camions a fait l'objet de tests sur un petit nombre de véhicules au Royaume-Uni ainsi qu'en Allemagne. Les préoccupations en matière de sécurité ont jusqu'alors empêché une application plus large, alors même que de nombreux camions sont équipés d'un système de chauffage auxiliaire fonctionnant aux hydrocarbures, rendant cette appréhension des frigorigènes de type hydrocarbures difficilement compréhensible. Un nouveau camion frigorifique au propylène (HC-1270) a été mis au point par une société allemande et est actuellement testé sur le terrain dans une chaîne de supermarchés allemande. L'unité frigorifique utilise une technologie innovante à base de variateur de fréquence (« inverter ») tout en étant très économe en énergie [Bur2011]. Elle a remporté le prix allemand du froid (German Refrigeration Award) en 2011. Pour une introduction plus large sur le marché, les constructeurs et les clients perçoivent la nécessité de disposer de règles juridiques et de normes spécifiques aux hydrocarbures dans les applications mobiles. D'un point de vue énergétique, les hydrocarbures sont à privilégier étant donné qu'ils permettent de réduire la consommation d'énergie comparée à celle des unités au R404A [Bur2011]. Les calculs révèlent des potentiels d'efficacité énergétique pour les hydrocarbures [Bur2011, Vieth2012].

Les systèmes cryogéniques ou à boucle ouverte qui évaporent le CO₂ ou l'azote (N₂) liquide chargés dans un conteneur isolé à bord du camion, sont des alternatives peu coûteuses en maintenance au cycle à compression de vapeur standard. Hormis la possibilité de concentration localisée en CO₂ ou N₂ avec le risque d'asphyxie associé, la technologie dans son ensemble a besoin de davantage d'énergie puisque la liquéfaction du liquide cryogénique s'effectue à des températures bien plus basses que la température d'évaporation normale

d'un système à compression de vapeur. De surcroît, le système a besoin de recharges régulières, ce qui implique pour l'utilisateur de prévoir des infrastructures de stockage et de recharge pour les gaz liquéfiés. Ainsi, les systèmes à boucle ouverte sont utilisés en priorité pour la distribution locale.

Conditionnement d'air

Les systèmes de conditionnement d'air peuvent être répartis en systèmes de conditionnement d'air fixe et systèmes mobiles pour véhicules. Les systèmes fixes peuvent à leur tour se subdiviser en systèmes unitaires conçus pour le conditionnement d'air de pièces simples (systèmes mono-split et mobiles), en systèmes multisplit qui desservent plusieurs pièces ou des bâtiments entiers (souvent équipés de la technologie VRF – débit de frigorigène variable) et en systèmes de conditionnement d'air centraux avec distribution du froid par air (unités centrales de traitement d'air ou systèmes à conduits) ou par eau (refroidisseurs). Les puissances frigorifiques varient en fonction du nombre de pièces à desservir et vont de moins d'1 kW pour les systèmes unitaires à plusieurs MW pour des systèmes centraux volumineux (refroidisseurs).

Conditionnement d'air fixe

Les conditionneurs d'air pour le refroidissement et le chauffage allant de 2,0 kW à 420 kW (la majorité ayant une puissance de moins de 35 kW) représentent une part significative du marché du conditionnement d'air [RTOC2010]. La plupart des systèmes de conditionnement d'air en Europe utilisent les frigorigènes HFC avec des charges comprises entre quelques centaines de grammes seulement (unités mobiles scellées en usine) et quelques kilos pour les unités split, voire plusieurs tonnes pour d'importants groupes de refroidissement centralisés. Les taux de fuites vont de 1 % pour les nouveaux refroidisseurs, jusqu'à 2,5 % pour de petites unités scellées en usine et jusqu'à environ 8 % pour des unités multisplit. Face à une demande en espaces climatisés toujours croissante – suscitée par la proportion élevée de voitures climatisées – on s'attend à une hausse importante de la demande européenne en HFC sur le marché du conditionnement d'air fixe. À noter que l'augmentation la plus importante du marché du froid et du conditionnement d'air concerne essentiellement les pays émergents comme la Chine, l'Inde, la Malaisie pour ne citer qu'eux.

« Les hydrocarbures sont une alternative idéale dans beaucoup de systèmes de conditionnement d'air et de pompes à chaleur. Il semble que le nombre de fabricants ayant recours aux hydrocarbures comme frigorigènes ait diminué ces dernières années. Cela s'explique apparemment par l'approvisionnement limité en compresseurs, dû au moins en partie à la nouvelle directive « Équipements sous pression ». Les autres raisons tangibles sont les exigences de plus en plus strictes spécifiées dans les normes de sécurité européennes et internationales qui rendent difficile la conception de systèmes à un prix compétitif sur le marché. » [Pal2008]

Unités scellées en usine y compris les unités mobiles

Les unités scellées en usine sont des systèmes monobloc et des systèmes mono-split équipés de tuyauteries de frigorigène souples avec des puissances frigorifiques comprises entre 1 et 10 kW. La plupart d'entre elles fonctionnent avec des HFC à des charges de 0,3 à 3 kg [Sch2011]. Le HC-290 est utilisé dans plusieurs petites unités mobiles avec des efficacités énergétiques supérieures de 5-10 % à celles des unités aux HFC équivalentes. La puissance frigorifique de ces unités varie de 500 à 3.200 W et la charge de frigorigène s'élève à 100-500 g [Pal2008].

Climatiseurs split

Les hydrocarbures sont utilisés en respectant les normes de sécurité en vigueur, en particulier pour les climatiseurs mono-split muraux et plafonniers avec une puissance

frigorifique pouvant atteindre environ 7 kW en Chine et en Inde [Sch2011]. Les coûts de production réels sont de 0,5 à 1,5 % inférieurs à ceux des produits équivalents aux HFC. Si le coût d'investissement initial de la ligne de production prend en compte la sécurité et la formation du personnel chargé de la production et de l'exploitation, le coût est environ 0,5 % plus élevé par unité produite, le prix total d'une unité aux hydrocarbures est sensiblement identique au final. Un remplacement d'environ 50 % à 65 % de l'ensemble des HFC est considéré comme techniquement faisable en Europe compte tenu de la réglementation en vigueur en matière de sécurité [Sch2011]. Le risque d'inflammabilité associé à des charges plus importantes en frigorigène interdit l'utilisation d'hydrocarbures dans des systèmes de plus grande taille installés dans des espaces occupés en vertu des réglementations en vigueur en matière de sécurité. Bien que techniquement possibles et pas plus onéreuses [Sch2011], ces restrictions empêchent actuellement une utilisation plus répandue des hydrocarbures comme frigorigènes dans les systèmes de conditionnement d'air.

Pour les unités multisplit de plus grande taille, les réglementations actuelles en matière de sécurité empêchent l'utilisation des hydrocarbures comme frigorigènes dans les espaces occupés en raison de la charge en frigorigène plus importante dans les systèmes multisplit. Le CO₂ pourrait constituer une alternative pour les systèmes split de plus grande taille et devrait se traduire par des efficacités énergétiques similaires au moins dans les climats tempérés, en tenant compte de l'expérience avec les systèmes frigorifiques commerciaux.

Systèmes à conduits

Les systèmes de conditionnement d'air à conduits couvrent plusieurs catégories, y compris les systèmes en toiture à conduits, les systèmes centraux à conduits et les systèmes à régulation fine. Dans l'UE, ces systèmes utilisent généralement des HFC dont les charges sont comprises entre 5 et 150 kg. Les mêmes options techniques décrites pour les systèmes multisplit s'appliquent aux systèmes à conduits même si, en raison de plus grandes charges de frigorigènes indirectes, les hydrocarbures seront limités le plus souvent à des applications indirectes.

Refrroidisseurs

L'eau glacée produite par les refroidisseurs est pompée d'un bout à l'autre d'un bâtiment afin de refroidir plusieurs pièces. Les refroidisseurs sont répartis en différentes catégories en fonction du compresseur utilisé, à savoir des compresseurs volumétriques (piston alternatif ou vis) et des compresseurs centrifuges. Dans l'UE, la plupart utilisent des HFC avec des charges comprises entre 5 et 10.000 kg, même s'il existe des refroidisseurs qui utilisent de l'ammoniac, des hydrocarbures et de l'eau. Dans quantité d'autres pays, les CFC et les HCFC sont encore utilisés dans les refroidisseurs.

L'utilisation de frigorigènes alternatifs à faible PRP est techniquement possible étant donné que la distribution s'effectue par boucles d'eau dans le bâtiment. Les refroidisseurs à l'ammoniac et aux hydrocarbures existent déjà sur le marché, et présentent une efficacité énergétique environ 10 % supérieure dans les petits refroidisseurs aux hydrocarbures et 20 % dans les petits refroidisseurs à ammoniac. Le CO₂ devrait offrir la même efficacité énergétique dans les climats tempérés et 10 % d'efficacité énergétique en moins dans les climats chauds. En ce qui concerne les refroidisseurs centrifuges de grande taille, utiliser l'eau comme frigorigène est une solution inoffensive pour l'environnement, avec une augmentation de 5 à 10 % de l'efficacité énergétique [Mad2011]. Depuis quelques temps, des sociétés, un peu partout dans le monde, proposent des refroidisseurs utilisant du R1234ze ou du R1233zd comme frigorigènes avec des coefficients de performance (COP) légèrement supérieurs à celui du R134a.

Pompes à chaleur (pour le chauffage uniquement)

Les pompes à chaleur réservées au chauffage servent à chauffer des espaces et/ou de l'eau potable. Les eaux souterraines, le sol et l'air extérieur sont les sources de chaleur les plus courantes de ces appareils de chauffage. Les coefficients de performance habituels de ces systèmes avoisinent quatre, ce qui signifie qu'ils produisent quatre fois plus de chauffage qu'ils ne consomment d'électricité pour entraîner le compresseur. Utiliser un système de pompe à chaleur pour le chauffage permet de réduire fortement les émissions de CO₂ par rapport à un chauffage avec des combustibles fossiles. L'importance de cette réduction dépend du bouquet énergétique du pays, à savoir le niveau d'émissions de CO₂ associé à la production d'électricité. Environ 98 % des pompes à chaleur européennes utilisent désormais des HFC comme frigorigènes avec des charges de 1,5 à 15 kg pour produire 5 à 50 kW de chauffage [Sch2011].

La plupart des pompes à chaleur réservées au chauffage chauffent de l'eau sanitaire ou de l'eau destinée au chauffage des locaux via un système de chauffage hydronique. Pour ces systèmes, les hydrofluorocarbures sont une solution techniquement viable dotée d'une excellente efficacité énergétique. Les pompes à chaleur au HC-290 ou au HC-1270 étaient utilisées dans les années 1990 et 2000 lorsque les CFC ont été interdits. Cependant, la majorité de la production a été interrompue avec l'introduction de la directive « Équipements sous Pression » (DEP), qui a imposé une certification supplémentaire des compresseurs utilisant les HC, d'où un surcoût pour les fabricants. En conséquence, des mélanges de HFC – R407C, R404A et R410A – les ont remplacés [Sch2011]. Les pompes à chaleur actuelles aux hydrocarbures (HC-290, HC-600a) sont disponibles pour des puissances <20 kW auprès de 18 fabricants européens au moins [Pal2008]. Les prix unitaires sont censés être 5 % plus élevés en raison des exigences de sécurité à respecter [Sch2011].

Les pompes à chaleur au CO₂ sont commercialisées en particulier au Japon. Les caractéristiques thermodynamiques du CO₂, avec sa capacité calorifique uniforme ⁸ pendant le refroidissement du gaz dans le cycle transcritique (voir paragraphe « Le dioxyde de carbone ») offrant ainsi une bonne correspondance de glissement de température avec l'eau à chauffer, en font le frigorigène idéal pour le cycle des pompes à chaleur à chauffage d'eau en cas de besoin en températures d'eau élevées. Dans ces conditions, les émissions de CO₂ sont réduites de moitié environ par rapport aux chauffe-eaux à combustion traditionnels [FEPC2011]. Plus de deux millions de pompes à chaleur « eco cute » avaient été vendues fin octobre 2009 [Mor2009], notamment grâce aux subventions accordées par les fournisseurs d'électricité et le gouvernement japonais qui souhaitaient remplacer les systèmes de chauffage à résistance électrique afin de réduire la charge imposée au réseau électrique.

Conclusions

Il est techniquement et économiquement possible de construire et d'exploiter des systèmes frigorifiques avec un impact limité sur le climat. Cela peut s'obtenir de plusieurs façons, comme expliqué précédemment. L'option à retenir dépend des préférences de chacun, de la réglementation et des normes de sécurité en vigueur dans le pays, de la disponibilité des composants et des compétences ainsi que de l'acceptation ou non de payer un prix pouvant être légèrement plus élevé pour le système, du moins au début. Dans de nombreux cas, un investissement plus élevé au départ peut être amorti grâce aux coûts d'exploitation et de maintenance inférieurs des systèmes améliorés.

L'efficacité énergétique de ces systèmes frigorifiques alternatifs peut être au moins aussi élevée que celle des technologies utilisant les HFC. Dans les pays comme le Danemark et

⁸ Sauf à proximité du point critique où l'on observe un pic, comme c'est le cas pour la plupart des substances.

la Suède, dont l'histoire est marquée par des lois environnementales progressistes, de nombreux systèmes sans ou avec peu de HFC, ont déjà été construits et exploités avec une bonne efficacité énergétique.

Clause de non-responsabilité

Dans la mesure où les performances de plusieurs types de systèmes dépendent de multiples paramètres différents en matière de conception et de fonctionnement, il est impossible d'en déduire de façon générale et avec précision les performances relatives des différents frigorigènes. Même si les chiffres qui figurent dans cette Note d'Information ne sont donc fournis qu'à titre indicatif, les auteurs considèrent qu'ils offrent malgré tout une vision objective de la situation actuelle.

Remerciements

Le contenu de cette Note d'Information de l'IIF se fonde en partie sur le document élaboré par M. Kauffeld : Availability of low GWP alternatives to HFCs Feasibility of an early phase-out of HFCs by 2020. EIA report – Environmental, mai 2012

Références

- [AL2007] Air Liquide Sicherheitsdatenblätter für technische Gase. Online 2007
- [Bur2011] Burke M, Grosskopf P. Development of environmentally friendly transport refrigeration machines. 23e Congrès International du Froid de l'IIF, 21-26 août 2011, Prague, République tchèque
- [Cec2007] Cecchinato L. *et al.* An experimental analysis of a supermarket plant working with carbon dioxide as refrigerant. 22e Congrès international du froid de l'IIF, 21-26 août 2007, Beijing, Chine
- [EPA2010] US-EPA. Transitioning to low-GWP alternatives in commercial refrigeration. Fact sheet, octobre 2010
- [FEPC2011] FEPC. Electricity review Japan. The Federation of Electric Power Companies of Japan, janvier 2011
- [Fin2011] Finckh O, Schrey R, Wozny M. Energy and efficiency comparison between standardized HFC and CO₂ transcritical systems for supermarket applications. 23e Congrès International du Froid de l'IIF, 21-26 août 2011, Prague, République tchèque
- [Ger2008] Gerwen R van, Gerard A, Roberti F. Ice cream cabinets using a hydrocarbon refrigerant: from technology concept to global rollout. 8e Conférence IIF-Gustav Lorentzen sur les fluides actifs naturels, 7-10 septembre 2008, Copenhague, Danemark
- [GTZ2010] GTZ. Guidelines for the safe use of hydrocarbon refrigerants. Eschborn, Allemagne, septembre 2010, p. 220
- [Haf2015] Hafner A, Hemmingsen AK. R744 refrigeration technologies for supermarkets in warm climates. 24e Congrès International du Froid de l'IIF, 16-22 août 2015, Yokohama, Japon
- [Hei2005] Heinbokel B, Gernemann A. Eine neuentwickelte CO₂-Kälteanlage für den Normal- und Tiefkühlbereich in einem Schweizer Hypermarkt. DKV Jahrestagung 2005, Würzburg
- [Hoe2004] Hoehne M, Hrnjak P. Charge minimization in hydrocarbon systems. 6e Conférence IIF-Gustav Lorentzen sur les fluides actifs naturels (GL2004), 29 août-1er septembre 2004, Glasgow, Royaume-Uni

[Huf2012] Huff H, Finckh O, Verma P, Liu H. Viable solutions to increase efficiencies of transcritical CO₂ systems for commercial refrigeration. 10e Conférence IIF-Gustav Lorentzen sur les fluides actifs naturels (GL2012), 25-27 juin 2012, Delft, Pays-Bas

[IIR2014] Institut International du Froid : 25e Note d'Information sur les technologies du froid: Réduction de la charge en frigorigène dans les systèmes frigorifiques, mai 2014. http://www.iifir.org/userfiles/file/publications/notes/NoteTech_25_FR.pdf

[Jür2004] Jürgensen H, Nielsen OK, Tiedemann T. Application related design of hermetic propane compressors for small refrigeration systems. Compresseurs 2004 : 5e Conférence internationale sur les compresseurs et les frigorigènes, 29 septembre-1er octobre 2004, Castá Papiernicka, Slovaquie

[Kau1998] Kauffeld M, Hansen S. Kleine Ammoniak-Kälteanlage. Ki Luft-und Kältetechnik 34, 6 (1998), p. 278-283

[Kau2012] Kauffeld M. Availability of low GWP alternatives to HFCs feasibility of an early phase-out of HFCs by 2020. Rapport EIA (Environmental Investigation Agency), mai 2012

[Lue2010] Luecken DJ, Waterland RL, Papasavva S, Taddonio KN, Hutzel WT, Rugh JP, Andersen SO. Ozone and TFA impacts in North America from degradation of 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (HFO-1234yf), a potential greenhouse gas replacement. Environ. Sci. Technol. 2010, 44, p. 343-348

[Mac2011] Machida A, Boone J. Development of air refrigeration system "Pascal Air". 23e Congrès International du Froid de l'IIF, 21-26 août 2011, Prague, République tchèque

[Mad2011] Madsbøll H. Water as refrigerant. 23e Congrès International du Froid de l'IIF, 21-26 août 2011, Prague, République tchèque

[Masson2014] Masson N. Natural refrigerants in food retail: an overview of market, technology and policy trends in North America, Europe, China & Japan. Chillventa, 14 octobre 2014

[Mas2014] Mastrullo R, Mauro AW, Menna L, Vanoli GP. Replacement of R404A with propane in a light commercial vertical freezer: a parametric study of performances for different system architectures. Energy Conversion and Management 82 (2014), p. 54-60

[McL2015] McLinden MO, Brown JS, Kazakov AF, Domanski PA. Hitting the bounds of chemistry: limits and tradeoffs for low-GWP refrigerants. 24e Congrès International du Froid de l'IIF, 16-22 août 2015, Yokohama, Japon

[Mor2009] Mori S. Summary of comments made at a press conference by Shosuke Mori, FEPC Chairman, 11 novembre 2009

[Pad2015] Padilla Fuentes Y, Hrnjak P, Elbel S. Low-charge propane refrigeration system technology for single and multi-door bottle coolers. 24e Congrès International du Froid de l'IIF, 16-22 août 2015, Yokohama, Japon

[Pal2008] Palm B. Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration systems – A review, Revue internationale du froid, Volume 31, Issue 4, June 2008, p. 552-563

[Ped2008] Pedersen PH, Christensen B. Development and test of bottle coolers with natural refrigerants. 8e Conférence IIF-Gustav Lorentzen sur les fluides actifs naturels, 7-10 septembre 2008, Copenhague, Danemark

[Rhi2009] Rhiemeier JM, Harnisch J, Kauffeld M, Leisewitz A. Comparative assessment of the climate relevance of supermarket refrigeration systems and equipment. Environmental Research of the Federal Ministry of the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety Research Report 206 44 300, UBA-FB 001180/e, mars 2009

[Rinne2015] Rinne F. Neue Kältemittelgemische und Future Proof Solutions für die Gewerbekälte. Deutsche Kälte-und Klimatagung 2015, 18-20 novembre 2015, Dresde, Allemagne

[RTOC2010] Report of the refrigeration, air conditioning and heat pump technical options committee: 2010 Assessment. PNUE, Nairobi

[RTOC2014] Report of the refrigeration, air conditioning and heat pump technical options committee: 2014 Assessment. PNUE, Nairobi

[Saw2008] Sawalha S. Carbon dioxide in supermarket refrigeration. Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2008. <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:13782/FULLTEXT01.pdf>

[Sch2010] Schuster P, Bertermann R, Rusch GM, Dekant W. Biotransformation of 2,3,3,3-tetrafluoropropene (HFO-1234yf) in rabbits, Toxicology and Applied Pharmacology, Volume 244, No 3, 1er mai 2010, p. 247-253

[Sch2011] Schwarz W, Gschrey B, Leisewitz A, Herold A, Gores S, Papst I, Usinger J, Oppelt D, Croiset I, Pedersen PH, Colbourne D, Kauffeld M, Kaar K, Lindborg A. Preparatory study for a review of Regulation (EC) No 842/2006 on certain fluorinated greenhouse gases. Final report, septembre 2011

[Sie2007] Sienel T, Finckh O. CO₂-DX Systems for medium-and low-temperature refrigeration in supermarket applications. 22e Congrès International du Froid de l'IIF, 21-26 août 2007, Beijing, Chine

[Vieth2012] Vieth M. Vergleich von Kältemitteln für die Transportkühlung aufgrund von Treibhausgasemissionen. Bachelor thesis, Technical University of Braunschweig, Allemagne, 22 mai 2012 http://www.kaelte-klima-portal.de/index.php/de/component/docman/doc_download/161-vergleich-von-kaeltemitteln-fuer-die-transportkuehlung-aufgrund-von-treibhausgasemissionen?Itemid=45



Recommandations

- Il convient d'introduire le plus souvent possible des frigorigènes à faible PRP, en particulier des frigorigènes naturels, dans les systèmes frigorifiques et de conditionnement d'air. Les efforts pour faire progresser davantage les technologies à faible PRP devraient être intensifiés.
 - Des frigorigènes naturels sont déjà utilisés dans de nombreuses applications et offrent à la fois une bonne efficacité énergétique et une bonne fiabilité en termes de sécurité. Ils devraient être promus afin de limiter l'impact des émissions de frigorigènes sur les changements climatiques.
 - Des obstacles continuent d'empêcher la mise en œuvre de solutions à faible PRP dans certaines applications où les technologies doivent encore être améliorées afin d'offrir des équipements appropriés à des prix abordables, en particulier dans les climats chauds.
 - Les normes et les réglementations en matière de sécurité devraient être adaptées aux technologies à faible PRP. L'adoption de nouvelles normes internationales et de réglementations nationales est nécessaire, en particulier concernant l'utilisation sûre des frigorigènes inflammables.
 - La participation des pays en développement à climat chaud à la définition des normes devrait être renforcée.
-

