

ALTERNATIVES AUX HFC A FORT GWP DANS LES APPLICATIONS DE REFRIGERATION ET DE CLIMATISATION

ALTERNATIVES TO HIGH GWP HFCs IN REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING APPLICATIONS

1^{er} juillet 2013

Projet réalisé par l'AFCE – Convention n° 1281C0114

Coordonnées de l'organisme : François HEYNDRICKX – 55b, rue Porte Rabel, 61300 L'AIGLE

Coordination technique : Lucie LE FLOCH – Direction Production et Energies Durables- Service
Entreprise et Eco Technologies – ADEME Angers



RAPPORT FINAL

En partenariat avec :



L'étude a été réalisée par EReIE, le CEMAFROID et ARMINES CES et coordonnée par EReIE.



Les auteurs du rapport sont respectivement

Denis CLODIC et Xueqin PAN - EReIE
Eric DEVIN, Thomas MICHINEAU - Cemafroid
Stéphanie BARRAULT - ARMINES CES

En français :

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

En anglais:

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

Sommaire

Résumé pour décideurs	5
Résumé	8
Abstract	11
Lexique	14
1. Contexte de l'étude	16
1.1 Objet du rapport	16
1.2 Commanditaire	16
1.3 Présentation des organismes ayant réalisé l'étude	17
2. Approche méthodologique de l'étude.....	17
2.1 Segmentation par domaines et sous-domaines.....	17
2.2 Sources d'informations	20
2.3 Format de présentation des résultats.....	20
2.4 Utilisation du contenu des fiches et des indicateurs	20
2.4.1 Les fiches de données fluides frigorigènes.....	21
2.4.2 Les fiches applications.....	21
2.4.3 Les fiches techniques des alternatives à compression de vapeur	26
3. Synthèse du corpus réglementaire et normatif en France et en Europe	27
3.1 Introduction.....	27
3.2 Les réglementations applicables aux installations frigorifiques et de climatisation	27
3.2.1 Règlementation liée à l'impact sur l'effet de serre (règlement 842/2006)	27
Règlement (CE) 842/2006	27
3.2.2 Règlementation applicable aux ATmosphères EXplosibles (ATEX) / directive 94/9/CE et 99/92/CE	30
3.2.3 Règlementations applicables aux Equipements Sous Pression (DESP et CTP)	32
3.2.4 Règlementation applicables aux Installations Classées pour l'Environnement ICPE	34
3.2.5 Règlementation applicables aux Etablissement Recevant du Public (ERP)	37
3.3 Normes applicables aux installations frigorifiques et de climatisation	38
3.3.1 Les normes de la série EN 378 - Systèmes de réfrigération et pompes à chaleur - Exigences de sécurité et d'environnement	38
3.3.2 Norme ASHRAE 34 - Designation and safety classification of refrigerants	40
3.3.3 Les normes sectorielles applicables aux installations ou équipements	40
3.4 Directive éco-conception 2009/125/CE	41
4. Les fluides frigorigènes des systèmes a compression de vapeur.....	42
4.1 Introduction.....	42
4.2 Origine du choix des CFC et des HCFC comme fluides frigorigènes	43
4.3 Des chlorofluorocarbones (CFC) aux hydrofluorocarbones (HFC).....	43
4.4 Le renouveau des fluides frigorigènes Hydrocarbures, Ammoniac et CO ₂	47
4.5 Les hydrofluorocarbures insaturés (dits HFO)	51
4.6 Les HFC à GWP < 750	54
4.7 Les mélanges de HFO et de HFC	56
5. Etude des alternatives par secteur clé de la réfrigération et de la climatisation	58
5.1 Banques de fluides frigorigènes dans les différents secteurs d'application.....	59
5.2 Réfrigérateurs et congélateurs domestiques	62
5.3 Froid commercial - Meubles frigorifiques de vente et chambres froides pour GMS (grande et moyenne surfaces).....	62
5.3.1 Présentation du secteur	62
5.3.2 Alternatives aux systèmes à détente directe utilisant le R-404A en froid positif seul ou froid négatif et positif (fiche FC1)	64
5.3.3 Alternatives aux groupes hermétiques utilisant du HFC-134a	64

5.3.4 Alternatives aux groupes autonomes utilisant du R-404A.....	65
5.3.5 Conclusions.....	65
5.4 Engins de transport frigorifique	65
5.5 Froid dans les industries agro-alimentaires (IAA)	67
5.6 Climatisation à air	70
5.7 Pompes à Chaleur (PAC) résidentielles.....	71
5.8 Groupe refroidisseurs d'eau (chillers)	72
5.9 Climatisation embarquée.....	73
 6. Données relatives aux technologies alternatives aux systèmes a compression contenant des HFC à fort GWP	 74
6.1.1 Machine frigorifique à absorption	75
6.1.2 Machine frigorifique à adsorption	77
6.1.3 Machine frigorifique à cycle de Brayton	79
6.1.4 Machine frigorifique Stirling	81
6.1.5 Machine frigorifique à tube pulsé	83
6.1.6 Machine frigorifique thermo-acoustique.....	85
6.1.7 Machine frigorifique magnétocalorique	87
6.1.8 Machine frigorifique thermoélectrique (TE).....	89
6.1.9 Systèmes à glace carbonique et systèmes à azote liquide	91
 7. Synthèse des interviews.....	 93
7.1 utilisateurs clés, organismes représentatifs et entités apparentées par domaine et sous- secteur	 93
7.2 Profil des personnes interrogés	94
7.3 Situation résultant des enquêtes	94
 Annexe 1 : Présentation du consortium	 96
Annexe 2 : liste des Experts du consortium ayant participé à l'étude	99
Annexe 3 : Liste des entreprises consultées dans le cadre de l'étude	104
Annexe 4 : Liste des rapports et publications utilisés dans le cadre de cette étude.....	105
Annexe 5 : Liste des textes réglementaires	106
Annexe 6 : Liste des normes et recommandations	107
Annexe 7 : Valeurs des GWP de fluides frigorigènes	108
Annexe 8 : Comparaison de la segmentation adoptée avec celle proposée par SKM [SKM12]	110
Annexe 9 : Analyse sectorielle des banques et demandes pour la maintenance des installations de froid et de climatisation du parc français.	 113
A9 – 1 Le R-404A et R-507	113
A9 – 2 Le R-410A	115
A9 – 3 Le R-407C.....	117
A9 – 4 Le HFC-134a.....	119

Résumé pour décideurs

Ce rapport vise à présenter une vue de l'utilisation actuelle des fluides frigorigènes en France dans le contexte européen et mondial. Le contexte européen est bien sûr celui de la mise à jour du règlement 842/2006 sur les fluides fluorés dit « F-Gas », mais aussi celui du contexte international où USA et Chine se sont mis d'accord sur un calendrier de réduction des HFC à fort GWP. USA et Chine proposent que le suivi de ce calendrier de réduction soit établi en parallèle avec le calendrier d'arrêt de production des HCFC, et que ces deux calendriers soient suivis par les parties signataires au protocole de Montréal. Cette proposition, vigoureusement combattue par l'Inde (et le Brésil dans une moindre mesure), indique cependant un possible consensus international sur la nécessité d'établir un calendrier de réduction des HFC à **fort GWP**.

On notera que la définition de « **fort GWP** » se situe pour l'Europe au niveau de l'utilisation massive du HFC-134a (GWP = 1370) puisque la directive 40/2006 en interdit la charge en climatisation automobile pour les plateformes neuves dès 2011 et une interdiction complète pour les véhicules neufs au 1^{er} janvier 2017. On peut déduire que le seuil de GWP fixé à 150 par la même directive 40/2006 peut être considéré comme « bas ». De nombreux fluides présentent des GWP entre 1 et 20, et peuvent être qualifiés de très bas. **En fait, « bas » et « haut » ne prennent sens pour les GWP qu'en les mettant en rapport avec les quantités totales émises.** C'est bien le produit de la masse émise à l'atmosphère par le GWP qui est le problème. D'ailleurs, les réglementations en préparation visent un calendrier de réduction de la mise sur le marché de produits fluorés ayant un GWP exprimé en équivalent CO₂. Ces produits peuvent être des aérosols, des agents d'expansion et surtout des fluides frigorigènes qui sont dominants (80 à 90 %) pour les quantités de fluides fluorés mises sur le marché. Ce rapport traite uniquement des fluides frigorigènes et des systèmes de réfrigération et de climatisation et analyse quels en sont les besoins et donc le calendrier souhaitable pour éliminer progressivement les fluides à GWP « forts ». L'analyse des systèmes frigorifiques autres que la compression de vapeur est effectuée ; elle indique que des niches existent, certaines significatives, mais que les ordres de grandeurs n'ont rien à voir. On peut estimer le nombre de systèmes frigorifiques et de climatisation pour le monde à 2,7 milliards dont 1,5 milliards de réfrigérateurs domestiques ; les machines qui ne sont pas à compression de vapeur, essentiellement des machines à absorption, représentent quelques centaines de milliers d'unités (soit 0,03 % du parc total) en incluant les minibars d'hôtels.

L'analyse des options de remplacement est établie par secteur d'applications et prend en compte aussi bien les fluides inorganiques comme l'ammoniac et le CO₂, que les hydrocarbures et les molécules fluorées, soit insaturées (HFO Hydro-fluoro-oléfines) ou à GWP faible comme le R-152a (GWP = 133) ou moyen comme le HFC-32 (GWP= 716). On verra que ces molécules peuvent être utilisées comme fluides purs ou en mélange pour obtenir des propriétés d'usage souhaitables. Allons maintenant droit au but en établissant les secteurs où les fluides de remplacement sont connus, voire établis.

Pour le froid domestique, le HFC-134a est en Europe déjà très massivement (90 à 95 %) remplacé par l'isobutane du fait que les charges sont faibles (< 150 g) et la conception de la sécurité des réfrigérateurs a été revue.

Plus généralement, **les hydrocarbures** peuvent être utilisés en petit froid commercial et en charge modérée avec **des systèmes directs** pour des charges allant jusqu'à 1,5 kg, voire plus en systèmes indirects. Ces options demandent une analyse approfondie des questions de sécurité associée. En dehors du froid domestique où le système est entièrement soudé, la généralisation des systèmes aux hydrocarbures semble hasardeuse pour des charges supérieures à 150 g, sauf si le système est entièrement soudé et que la charge est en rapport avec le volume de la pièce où est installé l'équipement.

Pour la climatisation automobile, même si la controverse entre les tenants du CO₂ et les tenants du R-1234yf continue en Europe, la viabilité technique du R-1234yf est prouvée et la production de masse des climatisations automobiles fonctionnant avec ce fluide commence.

Pour le froid négatif (-35 à -38 °C) en froid commercial centralisé, correspondant aux supermarchés et aux hypermarchés, le CO₂ à basse température fonctionnant en cascade avec un fluide adapté à la moyenne température (-10 °C) constitue une alternative déjà éprouvée. Le fluide dit moyenne température peut être, dans le futur, soit du R-1234yf, soit aussi du CO₂ pour les latitudes où le nombre d'heures à température supérieure à 25 °C est limité (10 % de l'année) car le CO₂ perd fortement en efficacité énergétique du fait d'une température critique très basse (31 °C).

En procédés industriels agro-alimentaires, l'ammoniac est déjà très utilisé et pour limiter cette charge d'ammoniac on retrouve l'architecture en cascade : CO₂ à la basse température (de -35 °C à -50 °C) et l'ammoniac à la température intermédiaire (-20 °C à -10 °C). A noter que la durée de vie des installations peut être de 30 ans, que les investissements peuvent être très importants, que la conversion d'un HFC à l'ammoniac est impossible (incompatibilité du cuivre et de l'ammoniac) et donc que les changements prennent du temps. Certaines configurations de site (habitations proches, règles ICPE...) rendent parfois l'usage de l'ammoniac difficile.

Au-delà de ces certitudes, pour les autres applications, nous sommes dans une période de foisonnement de propositions d'options techniques à des maturités fort différentes. On distinguera les secteurs où le client final est une entreprise des secteurs où le client final est le simple citoyen ; on distinguera aussi les secteurs où la globalisation fait que le choix est mondial et où les décideurs (les fabricants d'équipements) sont hors frontières nationales.

C'est clairement **le cas de la climatisation à air** où le marché mondial se situe autour de 60 millions d'unités dominé par les firmes japonaises, américaines, coréennes et maintenant chinoises. Les deux fluides massivement utilisés sont le HCFC-22 dans les pays en développement et le R-410A dans les pays développés. Ce secteur voit le plus grand nombre de propositions de fluides de remplacement. On n'imagine pas le passage aux hydrocarbures compte tenu des questions de sécurité sur de tels parcs d'équipements. Les fluides candidats sont le HFC-32 lui-même ou des mélanges qui comportent toujours du HFC-32 (GWP = 716) et l'un des HFO disponibles : R-1234yf ou R-1234ze. Les GWP de ces mélanges se situent autour de 500. La question (qui est tout à fait modélisable) est : est-ce un niveau acceptable sur le long terme ? A noter que la plupart de ces mélanges sont très modérément inflammables et que les normes de sécurité doivent être adaptées.

Les pompes à chaleur résidentielles sont soit des systèmes air / air de climatisation réversibles, et les options sont identiques à ce qui est décrit ci-dessus, soit des systèmes air/eau, les plus répandus en France ; le fluide frigorigène est essentiellement aussi du R-410A et les fluides candidats sont les mêmes : HFC-32 et mélanges HFC/HFO à base de HFC-32. **Pour les pompes à chaleur industrielles**, suivant le niveau de températures, les fluides candidats pour le futur sont le R-1234ze et le R-1233zd.

Au-delà de ces secteurs, majeurs en termes de quantités de fluides utilisés et pour couvrir l'ensemble des secteurs, l'analyse s'effectue dans ce rapport par domaine d'application : les systèmes de référence sont décrits, les HFC à fort GWP sont identifiés et, pour ces systèmes, les alternatives existantes sont analysées ainsi que celles en cours de développement, selon les informations disponibles. L'ensemble est synthétisé au sein des "Fiches Application".

Systèmes directs et indirects : en parallèle avec la question du choix du fluide frigorigène d'un système thermodynamique défini, il existe un degré de liberté très important dans plusieurs secteurs d'application : le recours à caloporteur / frigoporteur. Le système thermodynamique n'est plus en contact direct avec l'ambiance finale. Les groupes refroidisseurs d'eau en sont l'exemple typique. Les circuits à eau glycolée en froid commercial ou industriel aussi. Le CO₂ peut lui-même être utilisé en frigoporteur. En froid commercial, en climatisation tertiaire, en pompes à chaleur résidentielles cette architecture fait sens, limite drastiquement la charge de fluide et donne des degrés de liberté nouveaux pour le choix des fluides, en particulier pour gérer l'inflammabilité ou la toxicité. Les systèmes indirects doivent être conçus pour maintenir une efficacité énergétique au moins égale à la référence à détente directe.

Il a fallu environ 15 ans pour sortir respectivement des CFC, puis des HCFC pour les installations neuves et gérer certaines installations existantes sur 10 ans de plus, sachant que les options de remplacement étaient connues et que la réglementation fixait un calendrier d'arrêt de production. Ici, nous sommes dans un calendrier de restriction forte des tonnes équivalent CO₂ des fluides fluorés autorisées à être mises sur le marché, ce qui laisse à la fois plus de degrés de liberté et donc plus d'arbitrages délicats aux niveaux des clients finaux et au niveau des offreurs d'options techniques.

Résumé

L'approche méthodologique de cette étude consiste à :

- décrire les fluides frigorigènes utilisés dans les spécificités de chaque application,
- rassembler et traiter les informations les plus à jour sur les solutions alternatives que ce soient des fluides frigorigènes à faible GWP ou des technologies alternatives à la compression de vapeur
- synthétiser les réglementations et les normes applicables
- interviewer des utilisateurs finaux, des constructeurs d'équipements et des fabricants de fluides frigorigènes
- établir des fiches synthétiques sur les fluides frigorigènes à fort GWP et sur leurs possibles remplaçants
- établir des fiches par application
- synthétiser et comparer l'ensemble des alternatives disponibles ou en cours de développement pour chacun des 33 systèmes de référence identifiés dans les neuf domaines d'application du froid et de la climatisation au sein de « Fiches Application »

L'analyse des options de remplacement est établie par secteur d'applications et prend en compte aussi bien les fluides inorganiques comme l'ammoniac et le CO₂, que les hydrocarbures et les molécules fluorées soit insaturées (HFO Hydro-fluoro-oléfines), ou à faible GWP comme le R-152a (GWP = 133), ou moyen comme le HFC-32 (GWP = 716). On verra que ces molécules peuvent être utilisées comme fluides purs ou en mélange pour obtenir des propriétés d'usage souhaitables.

Systèmes directs et indirects : en parallèle avec la question du choix du fluide frigorigène d'un système thermodynamique défini, il existe un degré de liberté très important dans plusieurs secteurs d'application : le recours au caloporteur / frigoporteur. Le système thermodynamique n'est plus en contact direct avec l'ambiance finale. Les groupes refroidisseurs d'eau en sont l'exemple typique. Les circuits à eau glycolée en froid commercial ou industriel aussi. Le CO₂ peut lui-même être utilisé en frigoporteur. Cette architecture fait sens, limite drastiquement la charge de fluide et donne des degrés de liberté nouveaux pour le choix des fluides, en particulier pour gérer l'inflammabilité ou la toxicité.

Pour le froid domestique, en Europe, le HFC-134a est déjà très massivement (90 à 95 %) remplacé par l'isobutane du fait que les charges sont faibles (< 150 g) et que la conception de la sécurité des réfrigérateurs a été revue.

Pour les installations de fortes puissances des hypermarchés, le concept futur limitera drastiquement la charge à la température de réfrigération « positive » (-12 °C) par recours à un circuit frigoporteur indirect et en utilisant soit du HFC-134a à court terme, ou du CO₂ ou du R-1234yf à moyen terme, la basse température (-35 à 30 °C) fonctionnant au CO₂ en détente directe. Ce même concept peut se décliner à l'identique en supermarchés où, selon la latitude et le nombre d'heures à température d'air extérieur supérieure à 25 °C, le système peut être entièrement au CO₂.

Pour les groupes de condensation, qui sont des produits génériques, il est vraisemblable que les mélanges à GWP autour de 300 se substitueront au R-404A, car les précautions ATEX pour des mélanges très faiblement inflammables sont fortement différentes de celles qui sont nécessaires pour les hydrocarbures. Enfin, les groupes stand-alone auront le choix entre les mêmes mélanges, le propane, l'isobutane et le R-1234yf.

En procédés industriels agro-alimentaires, l'ammoniac est déjà très utilisé ; pour limiter cette charge d'ammoniac, on retrouve l'architecture en cascade : CO₂ à la basse température (de -35 °C à -50 °C) et l'ammoniac à la température intermédiaire (-20 °C à -10 °C). A noter que la durée de vie des installations peut être de 30 ans, que les investissements peuvent être très importants, que la conversion d'un HFC à l'ammoniac est impossible (incompatibilité du cuivre et de l'ammoniac), et donc, que les changements prennent du temps. Certaines configurations de sites (habitations proches,...) rendent parfois l'usage de l'ammoniac difficile.

Les **transports frigorifiques** sont des systèmes à détente directe qui utilisent soit du HFC-134a, soit du R-404A. Les options techniques en présence pour le remplacement de ces fluides sont :

- d'un côté le R-1234yf pour le HFC-134a,
- pour le R-404A, une entreprise mondiale propose déjà un système autonome fonctionnant au CO₂, mais les mélanges à GWP autour de 300 et contenant du HFC-32 et du R-1234yf ou du R-1234ze sont à l'étude ; d'ailleurs un rapport AHRI est consacré à cette application.

Pour la **climatisation à air** où le marché mondial se situe autour de 60 millions d'unités, dominé par les firmes japonaises, américaines, coréennes et maintenant chinoises, les deux fluides massivement utilisés sont le HCFC-22 dans les pays en développement et le R-410A dans les pays développés. Ce secteur voit le plus grand nombre de propositions de fluides de remplacement. On n'imagine pas le passage aux hydrocarbures compte tenu des questions de sécurité sur de tels parcs d'équipements. Les fluides candidats sont le HFC-32 lui-même, des mélanges qui comportent toujours du HFC-32 (GWP = 716) et l'un des HFO disponibles, R-1234yf ou R-1234ze. Les GWP de ces mélanges se situent autour de 500.

Les **pompes à chaleur résidentielles** sont soit des systèmes air / air de climatisation réversibles, et les options sont identiques à ce qui est décrit ci-dessus, soit des systèmes air/eau, les plus répandus en France ; le fluide frigorigène est essentiellement aussi du R-410A et les fluides candidats sont les mêmes : HFC-32 et mélanges HFC/HFO à base de HFC-32. **Pour les pompes à chaleur industrielles**, suivant le niveau de températures, les fluides candidats pour le futur sont le R-1234ze et le R-1233zd.

Pour les **groupes refroidisseurs d'eau de petite et moyenne puissances fonctionnant au R-407C**, les fluides de remplacement sont des fluides à base de HFC-32 et des GWP de l'ordre de 300 car la concentration de HFC-32 reste égale ou inférieure à 40 %.

Pour les groupes fonctionnant au R-410A on trouvera les mêmes mélanges candidats avec des teneurs en HFC-32 autour de 70 % et donc des GWP autour de 500.

A noter que comme les groupes refroidisseurs d'eau peuvent être compacts et placés en dehors des espaces occupés, il est possible **d'utiliser de l'ammoniac** à partir d'une puissance typiquement supérieure à 250 kW froid, pour compenser les surcoûts dus aux échangeurs. Il est aussi possible **d'utiliser du propane R-290**, ce qui est proposé par certaines firmes européennes.

Pour les puissances > 350 kW, deux segments doivent être distingués :

- celui des **groupes à vis**, où le choix des fluides frigorigènes comporte le R-407C, le R-410A et le HFC-134a et où les fluides candidats pour le futur peuvent donc être l'ammoniac, les mélanges HFC/HFO et le R-1234ze
- celui des **groupes centrifuges** qui fonctionnent uniquement au HFC-134a. Pour les groupes centrifuges, les essais sont assez avancés et le R-1234ze semble bien être le fluide de référence pour le futur.

Pour la climatisation automobile, même si la controverse entre les tenants du CO₂ et les tenants du R-1234yf continue en Europe, la viabilité technique du R-1234yf est prouvée et la production de masse des climatisations automobiles fonctionnant avec ce fluide commence.

La revue des technologies alternatives montre qu'il existe des niches pour certaines technologies mais qu'aucune ne peut, à l'heure actuelle, prendre des parts de marché où ces technologies puissent faire jeu égal avec les systèmes à compression de vapeur. Seules les machines à absorption, nées en même temps que la réfrigération elle-même, gardent des segments de marché non négligeables pour les groupes refroidisseurs d'eau.

Il a fallu environ 15 ans pour sortir respectivement des CFC, puis des HCFC pour les installations neuves et gérer certaines installations existantes sur 10 ans de plus, les options de remplacement étaient connues et une réglementation fixait un calendrier d'arrêt de production.

Ici nous sommes dans un calendrier de restriction forte des tonnes équivalent CO₂ des fluides fluorés, ce qui laisse à la fois plus de degrés de liberté et donc plus d'arbitrages délicats aux niveaux des clients finaux et au niveau des offreurs d'options techniques.

Contexte

Le contexte européen est bien sûr celui de la mise à jour du règlement 842/2006 sur les fluides fluorés dit « F-Gas », mais aussi celui du contexte international où USA et Chine se sont mis d'accord sur un calendrier de réduction des HFC à fort GWP. USA et Chine proposent que le suivi de ce calendrier de réduction soit établi en parallèle avec le calendrier d'arrêt de production des HCFC, et que ces deux calendriers soient suivis par les parties signataires au protocole de Montréal. Cette proposition indique un possible consensus international sur la nécessité d'établir un calendrier de réduction des HFC à **fort GWP**.

Périmètre objectif du document

Ce document vise à faire l'état des lieux sur la maturité des options techniques que ce soit des fluides frigorigènes à faible GWP pour les systèmes à compression de vapeur ou des technologies alternatives à la compression de vapeur.

Le contexte réglementaire et normatif est rappelé.

Les applications frigorifiques et de climatisation où les fluides frigorigènes à fort GWP sont actuellement en usage sont présentées et les enjeux en termes de quantité stockées dans les installations et les besoins en maintenance sur la durée de vie typique de ces installations sont détaillés. Il est montré ce qui est disponible et ce qui en préparation, que ce soit pour les fluides connus (CO₂, ammoniac, hydrocarbures) ou les nouveaux HFO : R-1234yf ou R-1234ze ainsi que les mélanges de ces fluides avec des HFC à faible GWP, R-152a (GWP = 133) ou moyen, HFC-32 (GWP = 716).

Cible

- Les décideurs de chaque domaine d'application de la réfrigération et de la climatisation.
- Les fonctionnaires de l'état français et de la commission européenne en charge de la mise à jour de la réglementation européenne 842/2006.
- Les cadres d'entreprise en charge des évolutions réglementaires associés aux choix des fluides frigorigènes.
- Les associations professionnelles du froid et de la climatisation.
- Les consultants des entreprises spécialisées sur l'analyse des impacts environnementaux des fluides frigorigènes.
- Les organisations non gouvernementales spécialisées sur les questions environnementales.
- Les organismes internationaux comme le PNUE.

Bénéfice pour le lecteur

- Disposer d'une analyse par secteur d'application de la réfrigération et de la climatisation sur les options de remplacement des fluides à fort GWP et de leur degré de maturité.
- Disposer d'une information à jour sur les fluides à faible GWP et sur les technologies alternatives à la compression de vapeur.
- Disposer d'une information à jour et synthétique des normes de sécurité et de la réglementation européenne.

Mots clés

Fluide frigorigène, HFC, HFO, CO₂, ammoniac, hydrocarbures, GWP, PRG, compression de vapeur, fluides à faible GWP, réglementation F-GAS, absorption, adsorption, thermoélectricité, froid thermo-acoustique, machine Stirling, tube pulsé, froid magnétique, cycle à air, COP, ATEX, normes de sécurité, pompe à chaleur, PAC, climatisation, système frigorifique.

Abstract

The methodological approach of this study consists in:

- Describing refrigerants used according to specifications of each application,
- Collect and analyze the most recent information on alternative solutions either for low-GWP refrigerants or technologies alternative to vapor compression
- synthesize applicable regulations and standards
- interview end users, equipment manufacturers and refrigerant producers
- elaborate factsheets on
 - high GWP refrigerants and their possible substitutes, and
 - by technology,
- synthesize and compare all available alternatives or under development for each of the 33 reference systems identified in the nine application domains of refrigeration and air conditioning in "Application Factsheet"

The analysis of alternative options is established by application sector and takes into account inorganic fluids such as ammonia and CO₂ as well as hydrocarbons and fluorinated molecules either unsaturated (HFO Hydro-fluoro-olefins) or low GWP such as R-152a (GWP = 133), or medium such as HFC-32 (GWP = 716). We will see that those molecules can be used either as pure refrigerants or in mixtures to obtain desirable property of use.

Direct and indirect systems: in parallel with the refrigerant choice of a defined thermodynamic system, a very important option exists in several application sectors: the use of heat transfer fluid (HTF). The thermodynamic system is no longer in direct contact with the ambience. Chillers are the typical example of such indirect system, and so are glycol-water circuits in commercial or industrial refrigeration. CO₂ can also be used as a HTF. This architecture makes sense, limits drastically the refrigerant charge and gives easiness for refrigerant choices, in particular for flammability or toxicity management.

Domestic refrigeration: in Europe, HFC-134a is already massively (90 to 95%) replaced by isobutane since charges are very low (< 150 g) and the design of safety of refrigerators has been reviewed.

High-refrigeration-capacity installations in hypermarkets: the future concept will limit drastically the charge to the « medium » temperature level (-12°C) via the use of indirect HTF circuit and HFC-134a (for short-term), or CO₂ or R-1234yf (for medium term), the low temperature operating with CO₂ in direct expansion system. This same concept can be implemented identically in supermarkets where, according to the latitude and number of hours at outdoor air temperature of 20°C the system can operate entirely with CO₂.

Condensing units: they are generic systems, it is likely that refrigerant blends with GWP in the range of 300 will replace R-404A, because ATEX precautions for very low-flammability refrigerant blends are much different of those necessary for hydrocarbons. For stand-alone equipment, the choice will be between the same refrigerant blends, propane, isobutene, and R-1234yf.

Food processing: ammonia is already largely used; the cascade architecture, with CO₂ at the low temperature (from -35°C to -50°C) and ammonia at the medium temperature (-20°C to -10°C), allows ammonia charge limitation. The lifetime of installations can be of 30 years, investment costs can be very significant, conversion from HFC to ammonia is impossible (copper and ammonia are not compatible), and so changes take time. Some location configurations (near residential buildings, etc.) may forbid the use of ammonia.

Refrigerated transports: those direct expansion systems use either HFC-134a or R-404A. Technical options for the replacement of those refrigerants are:

- R-1234yf for HFC-134a
- For R-404A, a worldwide company proposes already an autonomous system operating with CO₂, but refrigerant blends with GWP in the range of 300 and composed of

HFC-32 and R-1234yf or R-1234ze are under study; an AHRI report is dedicated to this application.

Air conditioning: the overall market is in the range of 60 million units, dominated by Japanese, American, Korean, and now Chinese companies. Two refrigerants are massively used: HCFC-22 in developing countries and R-410A in developed countries. This sector offers the largest number of refrigerant substitutes. Because of security concerns on such a large equipment fleet, no one can think of a general use of hydrocarbons. Refrigerant candidates are HFC-32 itself, refrigerant blends still containing HFC-32 and one of the available HFOs, R-1234yf or R-1234ze. GWPs of those blends are around 500.

Heat pumps for residential buildings are either air-to-air reverse air-conditioning systems, and options are identical to that described above, or air-to-water systems, most common in France; the refrigerant is also essentially R-410A and candidate refrigerants are the same: HFC-32 and HFC/HFO blends based on HFC-32. For **heat pumps in industry**, depending on the temperature levels, candidate refrigerants for the future are R-12134ze and R-1234zd.

Small and medium capacities R-407C chillers: refrigerant candidates are those based on HFC-32 and GWPs in the range of 300 because HFC-32 concentration remains equal or lower than 40%.

R-410A chillers: the same refrigerant-blend candidates are proposed with 70%-concentration of HFC-32 and so GWPs in the range of 500.

Since chillers can be compact and installed out of occupied spaces, the **use of ammonia** is possible, from a typical refrigerating capacity higher than 250 kW, so as to compensate the additional costs due to heat exchangers. It is also possible **to use propane R-290**, which is proposed by some European companies.

For refrigerating capacities higher than 350 kW, two segments have to be distinguished:

- **screw chillers**, where the choice of refrigerants includes R-407C, R-410A, and HFC-134a, and where reference refrigerants for the future can be ammonia, HFO/HFC blends, and R-1234ze
- **centrifugal chillers** operating only with HFC-134a. For those groups tests are well advanced and R-1234ze seems to be the reference refrigerant for the future.

Mobile air conditioning: even if the controversy between CO₂ proponents and R-1234yf advocates continues in Europe, the technical viability of R-1234yf is proven and the mass production of mobile air-conditioning systems to be charged with this refrigerant is starting.

The review of **alternative technologies** shows that niches exist for certain technologies but none of them can, currently, take market shares where those technologies can be at par with vapor compression systems. Only absorption systems, born at the same time as the refrigeration process itself, keep significant market segments for water chillers.

It took about 15 years to phase out respectively CFCs, and then HCFCs for new installations and manage some existing facilities over an additional ten years, the replacement options were known and regulations had set a phase-out production schedule. Here we are in a strong restriction schedule of CO₂ equivalent metric tonnes of fluorinated refrigerants, leaving both more degrees of freedom and therefore more delicate balance between end users and providers of technical options.

Context

The European context is the update of the regulation 842/2006 on fluorinated gases named "F-Gas", but also that of the international context where USA and China have come to an agreement on a schedule for the reduction of high-GWP HFCs. USA and China propose that the monitoring of this schedule be established in parallel with the schedule for the end of

production of HCFCs, and that those two schedules be applied by the Parties to the Montreal Protocol. This proposal indicates a possible international consensus on the need to determine a schedule for the reduction of **high-GWP** HCFCs.

Scope objective of the document

This document is intended to establish the current maturity of technical options whether on low GWP refrigerant for vapor compression systems or alternative technologies to those systems.

The regulation and standard contexts is reminded.

Refrigeration and air-conditioning applications using currently high-GWP refrigerants are presented and stakes in terms of quantities stored in equipments and maintenance needs over the typical lifetime of those installations are detailed. Available and undergoing developments are presented, for known refrigerants (CO₂, ammoniac, hydrocarbons) or new HFOs: R-1234yf or R-1234ze, as well as blends of those refrigerants with either low GWP HFC, HFC-152a (GWP = 133) or medium GWP, HFC-32 (GWP = 716).

Target audience

- Decision-makers of each refrigeration and air-conditioning application sector
- Officers of the French government and the European Commission in charge of updating the European regulation 842/2006
- Company executives in charge of regulatory changes associated with choice of refrigerants
- Refrigeration and air-conditioning professional associations
- Consultants of enterprises specialized in the analysis of environmental impacts of refrigerants
- Non-governmental organizations specialized in environmental issues
- International organizations such as UNEP.

Benefit for the reader

- Have an analysis on options for refrigerant candidates to replace high-GWP refrigerants and their maturity, for each refrigeration and air conditioning application sector
- Have an updated information on low-GWP refrigerants and on alternative technologies to vapor compression
- Have an updated and synthesized information on safety standards and the European regulation

Keywords

Refrigerant, HFC, HFO, CO₂, ammonia, hydrocarbons, GWP, vapor compression, low-GWP refrigerants, F-GAS regulation, absorption, adsorption, thermo-electricity, thermo-acoustic refrigeration, Stirling machine, pulsed tube, magnetic refrigeration, air cycle, COP, ATEX, safety standards, PED, heat pump, air conditioning, refrigeration system.

Lexique

Capacité volumétrique (kJ/m^3) : Puissance frigorifique (ou calorifique pour une pompe à chaleur) produite par le débit volumique du compresseur dans des conditions de référence pour les températures de condensation et d'évaporation. Cette valeur permet de comparer des fluides entre eux quant à la taille des compresseurs et indirectement le prix de l'installation.

COP : Coefficient de Performance c'est le rapport entre la puissance thermique utile (frigorifique pour une machine de froid, calorifique pour une pompe à chaleur) sur l'énergie électrique dépensée par le compresseur. Le COP peut aussi inclure la consommation électrique de pompes et de ventilateurs selon la frontière où s'effectue le bilan.

COP Saisonnier : Ce COP est utilisé pour prendre en compte les variations des températures extérieures et fait sens pour analyser le comportement des systèmes à charge partielle.

CFC : Chloro-Fluoro-Carbures, molécules dérivées du méthane ou de l'éthane, où tous les atomes d'hydrogène sont substitués par des atomes de chlore ou de fluor.

Drop-in : Conversion d'installation correspondant seulement au changement du fluide frigorigène, sans autre modification (ni composants, ni huile).

Emissions (de fluide frigorigène) : rejet à l'atmosphère de fluide frigorigène quelle qu'en soit la cause. Le rapport annuel sur les émissions de fluides fluorés est une obligation de la convention sur les climats (1992)

ERP : Etablissement recevant du public

GWP : Global Warming Potential ou Pouvoir de Réchauffement Global (PRG). Le CO_2 est la molécule de référence, son GWP est de 1 quel que soit l'horizon d'intégration prenant en compte sa durée de vie dans l'atmosphère. Le GWP des autres molécules est un rapport à celui du CO_2 qui prend en compte la durée de vie atmosphérique du produit et sa valeur d'absorption du spectre infrarouge dans l'atmosphère.

HCFC : Hydro-Chloro-Fluoro-Carbures, molécules dérivées du méthane ou de l'éthane ; où la substitution des atomes d'hydrogène par des atomes de chlore ou de fluor est incomplète.

HFC : Hydro -Fluoro-Carbures molécules dérivées du méthane ou de l'éthane où la substitution des atomes d'hydrogène par des atomes de fluor est incomplète.

HCFO : Hydro-Chloro-Fluoro-Oléfines, molécules dérivées du propylène où la substitution des atomes d'hydrogène par des atomes de chlore ou de fluor est incomplète. La double liaison éthylénique rend cette molécule fragile dans l'atmosphère où elle est décomposée par le radical hydroxyle $-\text{OH}$.

HFO : Hydro-Fluoro-Oléfines, molécules dérivées du propylène où la substitution des atomes d'hydrogène par des atomes de fluor est incomplète. La double liaison éthylénique rend cette molécule fragile dans l'atmosphère où elle est décomposée par le radical hydroxyle $-\text{OH}$.

ICPE : Installation classée pour la protection de l'environnement

ODP : Ozone Depleting Potential ou pouvoir de destruction de l'ozone stratosphérique. L'ODP est un rapport du pouvoir ozonicide d'une molécule à celui du CFC-11 (car ses mesures dans l'atmosphère remontaient à 1950. Par définition, l'ODP du CFC-11 est 1. L'échelle est donc la capacité d'une molécule à détruire une quantité de molécules d'ozone supérieure ou inférieure à la capacité de destruction du CFC-11.

Retrofit ou reconversion : Conversion d'une installation en vue du changement du fluide frigorigène nécessitant au moins un rinçage et changement de l'huile (cas le plus simple) mais pouvant aussi nécessiter des réglages et changements de composants, rendant la conversion beaucoup plus onéreuse qu'un simple drop-in.

TFA : Acide Trifluoroacétique produit de décomposition des HFC insaturés (HFO). Cette molécule est aussi produite naturellement par l'océan ; ses concentrations maximales imaginables par rejet des futurs HFO utilisés n'ont pas d'impacts significatifs sur l'écosystème marin.

1. Contexte de l'étude

Cette étude vise à présenter une vue de l'utilisation actuelle des fluides frigorigènes en France dans le contexte européen et mondial. Le contexte européen est bien sûr celui de la mise à jour du règlement 842/2006 sur les fluides fluorés dit « F-Gas », mais aussi celui du contexte international où USA et Chine se sont mis d'accord sur un calendrier de réduction des HFC à fort GWP. USA et Chine proposent que le suivi de ce calendrier de réduction soit établi en parallèle avec le calendrier d'arrêt de production des HCFC, et que ces deux calendriers soient suivis par les parties signataires au protocole de Montréal. Cette proposition vigoureusement combattue par l'Inde (et le Brésil dans une moindre mesure), indique cependant un possible consensus international sur la nécessité d'établir un calendrier de réduction des HFC à **fort GWP**.

On notera que la définition de « **fort GWP** » se situe pour l'Europe au niveau de l'utilisation massive du HFC-134a (GWP = 1370) puisque la directive 40/2006 en interdit la charge en climatisation automobile pour les plateformes neuves dès 2011 et une interdiction complète pour les véhicules neufs au 1^{er} janvier 2017. On peut déduire que le seuil de GWP fixé à 150 par la même directive 40/2006 est considéré comme « bas ». De nombreux fluides présentent des GWP entre 1 et 20, et peuvent être qualifiés de très bas. **En fait « bas » et « haut » ne prennent sens pour les GWP qu'en les mettant en rapport avec les quantités totales émises.** C'est bien le produit de la masse émise par le GWP qui est le problème. D'ailleurs les réglementations en préparation visent un calendrier de réduction de la mise sur le marché de produits fluorés ayant un GWP exprimé en équivalent CO₂.

1.1 Objet du rapport

L'AFCE est une association loi 1901 qui promeut un usage responsable des fluides frigorigènes. A ce titre, elle suit les travaux réglementaires relatifs aux HFC et, d'une manière générale, concernant toutes les techniques de production de froid.

Compte tenu de la révision actuelle de la F-Gas en Europe, qui envisage une phase down rapide, voire des interdictions d'usage dans certaines applications, l'AFCE a commandé à EReiE, au Cemafrid et à Armines, une étude indépendante, basée sur une expertise technique des alternatives pour toutes les applications HVAC et de froid industriel utilisant des HFC à fort GWP.

Les freins réglementaires et normatifs, le degré de maturité des technologies alternatives, leur temps d'industrialisation et d'appropriation par les marchés sont mis en avant dans la présente étude.

Ainsi le contenu du présent rapport présente les informations relatives à la part de marché des HFC et de leurs alternatives, aussi bien en termes de fluides frigorigènes qu'en termes de technologies. Il a pour objectif de fournir un outil pour permettre aux acteurs de préparer les moyens et les calendriers pour gérer l'abandon progressifs des HFC.

1.2 Commanditaire

Coordonnées des demandeurs

Alliance Froid Climatisation Environnement - AFCE

55b, Rue Porte Rabel
61300 L'AIGLE

[ADEME](#)

20, avenue du Grésillé - BP 90406 - 49004 ANGERS Cedex 01

[Uniclimate](#)

11-17, rue de l'Amiral Hamelin - 75783 PARIS CEDEX 16

1.3 Présentation des organismes ayant réalisé l'étude

Le consortium à l'origine de cette étude est constitué :

- d'EREIE, société spécialisée dans le domaine des techniques de réfrigération, coordinateur
- du CEMAFROID, centre d'expertise de la chaîne du froid ayant un statut de société
- d'un organisme de recherche (ARMINES, centre CES)

Ces trois entités ont des compétences complémentaires et des personnels qui ont une grande connaissance des systèmes frigorifiques, une réputation mondiale sur les inventaires de fluides frigorigènes, un réseau relationnel avec l'ensemble des parties prenantes : ministères, commission européenne, entreprises de génie chimique spécialisées dans les fluides frigorigènes, grandes entreprises du génie climatique et frigorifiques, grandes entreprises utilisatrices, syndicats professionnels.

Par ailleurs, les activités de ces organismes sont indépendantes des activités de fabrication et de commercialisation des technologies visées par l'étude, ce qui garantit une évaluation impartiale et indépendante de l'état de l'art des techniques.

La présentation détaillée des activités des organismes est définie en annexe 1.

2. Approche méthodologique de l'étude

2.1 Segmentation par domaines et sous-domaines

L'ensemble des applications du froid et de la climatisation peuvent être décomposées en huit grands domaines d'application :

- le froid domestique,
- le froid commercial,
- les transports frigorifiques,
- le froid industriel que l'on peut scinder en deux parties
 - l'industrie agro-alimentaire (IAA) et
 - les procédés industriels,
- la climatisation à air,
- les chillers,
- les pompes à chaleur et
- la climatisation mobile.

Au sein de ces domaines, différents types d'installations ou d'équipements sont utilisés, se différenciant par des technologies différentes (ex : compresseur centrifuge, compresseur volumétrique), des structures de systèmes différentes (système à détente directe, système indirect incluant une, voire deux boucles caloportrices) ou des fluides frigorigènes différents.

L'objectif de cette étude étant d'étudier les alternatives disponibles à l'utilisation des HFC à fort GWP, pour chaque domaine d'application, les différents types d'installation ont été répertoriés et le HFC utilisé avec le plus fort GWP identifié. Une liste de systèmes de référence, correspondant au cas le plus "critique" du domaine, des systèmes utilisant des HFC avec le GWP le plus élevé, peut ainsi être établie (Tableau 2-1) ; pour ces systèmes, les alternatives disponibles et en cours de développement vont être étudiées. Les alternatives disponibles pourront faire partie des systèmes répertoriés dans l'analyse du domaine. Il convient de souligner, qu'en termes de fluides, le HFC-134a fera partie des fluides à fort GWP utilisés dans certains domaines (ex : froid domestique) ou des alternatives disponibles à plus faibles GWP quand le domaine utilise principalement des HFC à GWP très élevés, tels que le R-404A (ex : froid commercial).

Chaque système de référence est donc rattaché à un domaine d'application et les sous-domaines plus particulièrement concernés sont détaillés. Pour chaque système de référence, les alternatives disponibles et en cours de développement seront étudiées et récapitulées au sein de la **Fiche Application** (voir 2.4). Cette fiche mentionnera non seulement les alternatives

en termes de *fluide utilisé* mais aussi en termes de *technologie* et, le cas échéant, en termes de possibilité de drop-in¹ ou de retrofit².

Dans les 9 domaines choisis, **33 systèmes de références** ont été identifiés et sont listés dans le tableau 2.1, en précisant les sous-domaines concernés.

Tableau 2-1 - Segmentation adoptée et systèmes de référence identifiés

Domaine d'application	Système de référence	HFC à fort GWP concernés	Sous-domaine concernés
Froid domestique	Système hermétique de réfrigération chargé d'usine	HFC-134a	Réfrigérateurs simples et combinés
	Système hermétique de congélation chargé d'usine	HFC-134a	Congélateurs
Froid commercial	Système centralisé à détente directe ou indirecte en froid positif seul	R-404A	Supermarchés
	Système centralisé à détente directe ou indirecte en froid positif & négatif	R-404A	Hypermarchés et Supermarchés
	Groupe hermétique pour meuble frigorifique de vente	R-404A	Petits commerces
	Groupe autonome pour meuble frigorifique de vente <i>Basse température (1/3)</i> <i>Moyenne température (2/3)</i>	R-404A	Petits commerces
Engin de transport frigorifique	Système poulie courroie pour camions et VUL	R-404A	Transport routier
	Système autonome pour camions	R-404A	Transport routier
	Conteneur autonome	HFC-134a	Transport maritime
	Systèmes à détente directe pour reefers	R-404A	Transport maritime
Froid dans les IAA (Industries Agro Alimentaires)	Système à détente directe froid positif (<i>petite ou moyenne ou forte puissance</i>)	R-404A	Industrie laitière Chocolat Certains entrepôts Bière et vin Boissons gazeuses
	Système à détente directe utilisant R-404, froid négatif (dont tunnel de surgélation) ou positif & négatif (<i>petite ou moyenne ou forte puissance</i>)	R-404A	Industrie de la viande Abattoirs Surgelés Plats cuisinés Entrepôts
	Système à évaporateur noyé, froid positif	R-404A	Industrie de la viande Abattoirs Surgelés Plats cuisinés Entrepôts
	Système à évaporateur noyé, froid négatif	R-404A	Industrie de la viande Abattoirs Surgelés Plats cuisinés Entrepôts

¹ Drop-in : Conversion d'installation correspondant seulement au changement du fluide frigorigène, sans autre modification (ni composants, ni huile).

² Retrofit : Conversion d'une installation en vue du changement du fluide frigorigène nécessitant au moins un rinçage et changement de l'huile (cas le plus simple) mais pouvant aussi nécessiter des réglages et changements de pièces, rendant la conversion beaucoup plus onéreuse qu'un simple drop-in.

	Chillers de moyenne ou forte puissance	R-404A	Pris en compte dans le domaine dédié
Froid dans les procédés industriels	Système à détente directe (Moy . Temp. et Bas. Temp.)	HFC-134a, R-507A	Industrie chimique Industrie pharma Industrie caoutchouc
Climatisation à air	Système hermétique pour appareil de type "Window", "console" ou "Mobile"	R-410A	Climatisation domestique
	Splits de petite puissance (P < 17,5kW)	R-410A	Climatisation domestique
	Multi-splits de faible puissance (P < 17,5kW)	R-410A	Climatisation tertiaire
	Roof top	R-410A	Climatisation commerciale
	Armoires spéciales	R-410A	Climatisation commerciale
	Système DRV (Débit Réfrigérant Variable)	R-410A	Climatisation commerciale
	Multi splits de P > 17,5KW (Système Centralisé)	R-410A	Climatisation tertiaire
Climatisation à boucle d'eau glacée (Chillers) ou autre caloporteur	Chiller à compresseur volumétrique de faible puissance (P < 50 kW)	R-410A, HFC-134a	Climatisation tertiaire
	Chiller à compresseur volumétrique de moyenne puissance (50 < P < 350 kW)	R-410A	Climatisation tertiaire ou procédé industriel
	Chiller à compresseur volumétrique de forte puissance (P > 350 kW)	R-410A ou R-407C	Climatisation tertiaire ou procédé industriel
	Chiller à compresseur centrifuge	HFC-134a	Climatisation tertiaire ou procédé industriel
PAC (Pompe à Chaleur) résidentielles	PAC air/eau	R-410A	Climatisation et chauffage domestique
	PAC eau/eau ou eau glycolée/eau	R-410A	Climatisation et chauffage domestique
	PAC sol/sol	R-410A ou R-407C	Climatisation et chauffage domestique
	PAC sol/eau	R-410A ou R-407C	Climatisation et chauffage domestique
Climatisation mobile	Boucle de climatisation automobile	HFC-134a	VP, VUL, VI
	Boucle de climatisation pour train	R-407C ou R-410A	Locomotive, wagon
	Boucle de climatisation pour bus	HFC-134a	Cars et bus

Pour information, une comparaison avec la classification proposée par l'étude SKM est donnée en annexe 8.

2.2 Sources d'informations

L'étude des alternatives, disponibles et en cours de développement, aux systèmes utilisant des HFC à fort GWP dans l'ensemble des applications du froid et de la climatisation a été basée sur :

- l'analyse des rapports de synthèse sur les technologies existantes et les fluides utilisés dans ces systèmes en France et en Europe d'une part et, l'étude des premières publications disponibles concernant les tests des HFC nouvellement développés ou l'utilisation de fluides non halogénés dans certaines applications
- d'une série d'entretiens auprès des détenteurs d'installations, des opérateurs, des fabricants d'équipements, des producteurs de fluides et d'experts techniques

Les principales sources bibliographiques sont, d'une part les références nationales et internationales sur les technologies, parc d'équipements et fluides utilisés dans les applications du froid et de la climatisation telles que:

- le rapport du Technical Option Committee de l'UNEP [TOC11]
- les études d'inventaires (France [BAR12], Europe [CLO11])
- les rapports préparatoires à la révision de la réglementation Européenne établis par Oke-Recherche [SCH11], EReIE et ARMINES/CES [CLO11] ou SKM Enviro [SKM12]
- d'autre part, les analyses des premiers fluides à bas GWP développés, menées dans le cadre de programmes internationaux tels que le programme AREP (Low-GWP Alternative Refrigerants Evaluation Program) de l'AHRI (Air-Conditioning, Heating & Refrigeration Institute) [ARE13].

Enfin, d'autres publications ou communications, qu'il s'agisse de présentation de nouveaux fluides disponibles par les producteurs ou d'analyse ponctuelle sur un secteur (par exemple sur le froid commercial [PER13]) sont également utilisées. La liste exhaustive des références est donnée à l'annexe 4.

Les entretiens ont permis d'obtenir certaines informations qui ont été analysées et confrontées aux résultats de publications techniques ou scientifiques ainsi qu'aux données thermodynamiques caractérisant les fluides frigorigènes afin de faire une synthèse cohérente, par domaine d'application.

A la demande de certains participants, le contenu des entretiens est confidentiel et n'est utilisé que de façon générale dans la synthèse.

2.3 Format de présentation des résultats

Les résultats de cette étude sont présentés sous forme de fiches synthétiques de trois types :

- Les **FICHES FLUIDES** regroupant les informations essentielles sur les propriétés physiques, les coûts et les barrières ou restrictions d'usage éventuelles de ces fluides frigorigènes (section 4)
- Les **FICHES APPLICATION** qui présentent, pour chaque système de référence identifié, la description de l'existant, le ou les fluides frigorigènes halogénés à fort GWP utilisé, l'analyse des alternatives disponibles et celle des techniques en cours de développement ou à l'étude. Pour chaque alternative, l'analyse comparativement au système de référence est résumée à l'aide d'un indicateur multicritères de type radar.
- Les **FICHES TECHNOLOGIES** présentant les différents types de techniques de production de froid (section 6).

Compte tenu de leur format (A3), ces fiches sont présentées en annexe 10. Ces fiches sont complétées d'un texte détaillé (section 5) permettant de conforter les données et toute information requise pour leur interprétation ultérieure.

2.4 Utilisation du contenu des fiches et des indicateurs

L'un des principaux objectifs de l'étude est de fournir un outil de synthèse permettant d'agrégier toutes les informations normatives ou réglementaires nécessaires pour appréhender l'état de

disponibilité d'une part des fluides frigorigènes à faible GWP et d'autre part des techniques de production de froid alternatives à la compression de vapeur.

Le présent rapport constitue donc une base documentaire constituée de fiches synthétiques organisées selon les canevas suivants.

2.4.1 Les fiches de données fluides frigorigènes

Ces fiches sont établies pour tous les fluides frigorigènes utilisés dans les groupes à compression de vapeur. Elles permettent de transmettre au lecteur les principales propriétés physiques du point de vue frigorifique. Elles intègrent en outre :

- Une brève analyse des coûts qui intègrent le coût direct du fluide, fonction de son mode de synthèse ou de production, et les coûts indirects éventuels qu'impliquent ses conditions d'utilisation (impact de la pression, compatibilité avec les matériaux, caractère inflammable...).
- Une synthèse des barrières et restriction d'usage dont l'origine est généralement liée à des réglementations européennes ou nationales s'appliquant en fonction de la charge ou de l'application visée.

Modèle de fiche fluide frigorigène

Ammoniac	
Propriétés physiques et de sécurité	R-717 (ammoniac) est un fluide pur, sa classification de sécurité est B2 (toxique, peu inflammable ODP=0, GWP=0).
Commercialisation	R-717 est utilisé depuis le XIX ^{ème} siècle dès le début de la réfrigération, il est toujours utilisé fortement en froid industriel agro-alimentaire et depuis 1990 son utilisation s'est élargie modérément pour les groupes refroidisseurs d'eau de puissance moyenne et dans des systèmes de froid commercial centralisé via des frigoporteurs.
Efficacité énergétique	R-717 présente des propriétés thermodynamiques favorables pour les températures d'évaporation supérieures à -33°C et sinon requiert le passage à des systèmes bi-étages. Sa puissance volumétrique est similaire à celle du HCFC-22. Cependant du fait d'être une molécule de petite taille les températures de reflux sont relativement plus élevées.
Coûts	Le coût de l'ammoniac lui-même est faible (16/kg). Cependant l'impossibilité d'utiliser du cuivre entraîne un surcoût important de l'installation et des surfaces d'échange plus grandes (toutes choses égales par ailleurs). Ces surcoûts pénalisent surtout les systèmes de petites et moyennes jusqu'à 200 kW typiquement.
Barrières et restrictions d'usage	Les barrières portent sur la faible disponibilité des composants pour les faibles puissances. La nécessaire formation spécifique des techniciens pour maintenir, et effectuer les transferts de l'ammoniac dans et hors du système. La toxicité de l'ammoniac amène obligatoirement à l'usage de systèmes indirects en froid commercial avec une salle de machines spécifiquement conçue pour l'ammoniac. L'ammoniac en tant que substance est classée sous la rubrique Seveso en Europe (rubrique 1136 du code de l'environnement), ce qui entraîne l'obligation de déclaration (charges comprises entre 150 kg et 1,5 tonnes) et d'autorisation pour les charges > 1,5 t.

Rappel des propriétés physiques essentielles

Rubriques relatives à la commercialisation du fluide, l'efficacité énergétique, les coûts du fluide lui-même, et les barrières et restrictions d'usages.

2.4.2 Les fiches applications

Ces fiches sont établies pour chaque système de référence retenu dans la segmentation issue de l'analyse des secteurs utilisateurs de froid et de climatisation. Ces Fiches Applications sont présentées au chapitre 5 du rapport. Chaque fiche est constituée de 3 parties distinctes.

- La première partie intitulée « DESCRIPTION DU SYSTEME DE REFERENCE » est constituée pour chaque application concernée par :
 - une brève description de l'usage et des domaines de température requis
 - le fluide le plus couramment utilisé lorsque la technique, dite de référence, est basée sur l'emploi de HFC à fort GWP
 - les valeurs de GWP, la charge moyenne présente dans les équipements, un estimatif du parc des équipements en France et en Europe
 - la durée de vie moyenne, la liste des acteurs clés du secteur (principaux offreurs de technologies et détenteurs) directement impactés par des mesures de restriction éventuelles
 - un justificatif du choix du fluide utilisé au regard du secteur concerné et de ses exigences techniques normatives particulières
 - une synthèse de la réglementation applicable au secteur en France et en Europe.

- La seconde partie intitulée «ALTERNATIVES TECHNIQUES EXISTANTES» est constituée pour chaque application concernée par :
 - une présentation succincte du principe technique de substitution : cette partie peut indifféremment faire appel à des techniques de production de froid basées :
 - soit sur des groupes à compression utilisant d'autres fluides frigorigènes que celui de référence
 - soit sur d'autres techniques (cryogénie, emploi d'eutectiques...) : lorsque la solution consiste à substituer un groupe à compression par une source passive de froid, des informations complémentaires sont fournies sur les méthodes de conditionnement du stockage de froid
 - une estimation du parc des équipements en service, en France et en Europe, les acteurs clés et la réglementation spécifique applicable
 - les paramètres technico-économiques permettant de comparer cette solution alternative à la solution d'origine :
 - valeur du GWP en prenant aussi en compte la charge lorsque ce critère a une importance
 - efficacité énergétique estimée sur la base du consensus technique des acteurs interrogés pour classer les solutions. Le critère est ensuite ventilé entre 0 et 6 sur le radar (voir ci-dessous) entre la solution jugée la plus efficace et celle considérée comme la moins bonne
 - disponibilité de la technique en distinguant les solutions déjà commercialisées, les solutions en "Field test" et les solutions au stade des études ou de la recherche
 - freins à la généralisation de la solution : ces freins peuvent être d'ordre réglementaire ou technique
 - contexte favorisant l'implémentation de la solution
 - un indicateur multicritère type « radar » permettant d'évaluer l'alternative proposée et de comparer les différentes alternatives entre elles.
- La troisième partie intitulée «ALTERNATIVES TECHNIQUES EN COURS DE DEVELOPPEMENT» est constituée pour chaque application des données identiques à celles recueillies pour les alternatives existantes sur le marché, à l'exception des données de parc qui n'ont pas lieu d'être et qui sont remplacées par :
 - l'identification de prototypes opérationnels, d'équipements pilotes ou de « field test »
 - la date de disponibilité industrielle lorsque celle-ci peut être estimée : cette date est évaluée selon les communications des constructeurs ou producteurs de fluides interviewés

Fiche Application			
Partie 1			
Présentation de l'application par domaine et sous domaine, bref descriptif et domaine de température visé			
Caractéristique des HFC à fort GWP utilisé, donnée relative GWP, synthèse de la réglementation sectorielle applicable.			
Alternatives techniques ayant fait l'objet de démonstrateurs ou de prototypes ou directement disponibles			
Indicateurs de classification multicritères			
Partie 2			
Alternatives techniques en cours d'étude ou de développement en laboratoire ou en field test			
Indicateurs de classification multicritères			
Partie 3			

- Présentation de l'application par domaine et sous domaine, bref descriptif et domaine de température visé
- Caractéristique des HFC à fort GWP utilisé, donnée relative GWP, synthèse de la réglementation sectorielle applicable.
- Alternatives techniques ayant fait l'objet de démonstrateurs ou de prototypes ou directement disponibles
- Indicateurs de classification multicritères
- Alternatives techniques en cours d'étude ou de développement en laboratoire ou en field test
- Indicateurs de classification multicritères

Pour les Fiches Application, les différentes solutions alternatives sont notées au moyen d'un **indicateur multicritères type « radar »**.

L'indicateur est constitué d'une représentation graphique de 6 critères évalués sur une échelle allant de 0 à 6. Les valeurs de chaque critère augmentent à mesure que le critère s'écarte d'une situation favorable de l'alternative proposée comparativement aux caractéristiques de la solution d'origine (système de référence).

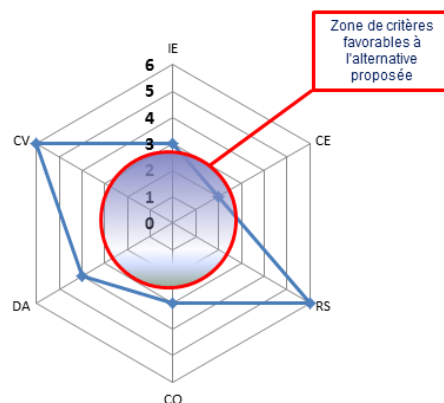


Figure 2.1 Système de notation « Radar »

D'une manière générale, les solutions offrant l'intégralité des critères avec des valeurs inférieures ou égales à 3 (graphique inclus dans un cercle de rayon 3 représenté figure 2.1) sont considérées comme des alternatives pertinentes. Lorsque le graphique illustrant la solution chevauche ce cercle, il appartient au lecteur d'estimer les bénéfices et les limites de l'alternative concernée au regard du contexte réglementaire et économique du secteur d'application considéré et éventuellement de la zone géographique.

Les critères retenus sont les suivants.

IE (Impact environnemental) – le GWP (Global Warming Potential) est utilisé pour comparer l'impact environnemental d'un fluide de substitution pour des systèmes de charges de fluide équivalentes. Dans le cas de l'introduction de systèmes indirects, la réduction de charge sera associée à la prise en compte du GWP dans la notation du critère IE. Les GWP sont classés selon la nomenclature conventionnelle suivante :

1 = très faible (< 10)

- 2 = Faible (< 150)
- 3 = Moyen (< 750)
- 4 = Fort (> 750)
- 5 = très fort (> 1500)
- 6 = Extrêmement fort (> 2500)

CE - Consommation énergétique : ce critère est évalué sur la base des retours d'expériences et les résultats disponibles dans la littérature. Cependant, dans de nombreux cas, les comparaisons des installations entre elles sont faussées par le fait que toutes les conditions ne sont pas équivalentes. C'est le cas par exemple dans les GMS où il est assez difficile d'obtenir des résultats comparatifs issus d'essais en laboratoire. Pour cette raison, le critère est évalué en classant les différentes alternatives disponibles et la technique de référence. Ce classement est ensuite ventilé sur l'échelle du critère entre 0 et 6, depuis la solution la moins consommatrice en énergie jusqu'à la pire.

RS - Risque sur la sécurité : ce critère s'appuie sur la classification de la norme ASHRAE 34 et EN 378 en y intégrant les nouvelles classes de risque qui sont actuellement discutées par les groupes de normalisation ad hoc. Le risque est estimé à partir de l'inflammabilité du fluide et de sa toxicité. Pour une application donnée, les normes EN 378 et ASHRAE 15 donnent des critères d'acceptabilité ou de rejet d'une alternative pour une application donnée en fonction de la charge. Si les normes d'applicabilité impliquent un rejet de la solution, ce fait est mentionné dans les freins liés à l'extension de l'alternative concernée. Cette classification est présentée par deux caractères alphanumériques (par exemple A2) ; la lettre majuscule correspond à la toxicité et le chiffre à l'inflammabilité.

Classement suivant la toxicité

- Le groupe A pour lequel il n'y a pas de preuve de la toxicité des fluides frigorigènes pour des concentrations inférieures ou égales à 400 ppm ;
- Le groupe B pour lequel il y a des preuves de toxicité pour des concentrations inférieures 400 ppm.

Classement suivant l'inflammabilité

- Groupe 1 : le fluide frigorigène ne permet pas une propagation de la flamme dans de l'air à 21 °C et 101 kPa ;
- Groupe 2 : le fluide frigorigène a une limite inférieure d'inflammabilité supérieure à 0,10 kg/m³ à 21 °C et 101 kPa et une chaleur de combustion inférieure à 19 kJ/kg ;
- Groupe 3 : le fluide frigorigène est hautement inflammable avec une limite inférieure d'inflammabilité inférieure ou égale à 0,10 kg/m³ à 21 °C et 101 kPa ou une chaleur de combustion supérieure ou égale à 19 kJ/kg.

Tableau 2.2 Equivalences entre les classes de sécurité et la notation RS

Classe de la norme	Valeur du critère
0 = Classe A1	0
A2L (classe en cours de création)	2
A2 et B2	4
A3 et B3	6

CO - Coût de la solution (hors maintenance) : le coût est apprécié au regard d'éléments objectifs tels que la nature des matériaux utilisés dans la conception des machines frigorifiques ou des systèmes de sécurité rendus nécessaires par l'usage d'un fluide inflammable par exemple. Les coûts de maintenance ou les coûts de possession globaux ne sont pas considérés par cet indicateur. Le critère est évalué en ordonnant les coûts des différentes alternatives disponibles et la technique de référence selon les retours d'experts. Cet ordonnancement est ensuite ventilé sur l'échelle du critère entre 0 et 6. Bien entendu, cet ordonnancement est susceptible d'évoluer lorsque par exemple une alternative en cours de développement se voit industrialisée à grande échelle.

DI - Disponibilité : la disponibilité est évaluée entre 0 (disponible au niveau industriel) jusqu'à 6 (étude au stade des laboratoires). Un classement intermédiaire permet d'évaluer l'existence de la mise en place de cette alternative pour des essais en grandeur réelle (dits field test). On entend par field test le fait de disposer d'un équipement opérationnel se substituant intégralement à une solution de référence dans le cadre d'un usage normal et sur une durée représentative de l'application visée.

CV - Capacité volumétrique : exprimé en (kJ/m³)

Capacité volumétrique : rapport de la puissance frigorifique en kJ/s (ou calorifique pour une pompe à chaleur) au déplacement d'un m³/s du volume de compression. Cette capacité volumétrique caractérise un fluide frigorigène pour une température de condensation et une température d'évaporation définies. Plus la capacité volumétrique est élevée, plus le compresseur est de taille réduite pour une même vitesse de rotation.

Les critères et les valeurs associées sont récapitulés tableau 2.3.

Tableau 2.3 Critères et valeurs associées

Critères	Code	Valeurs					
		1	2	3	4	5	6
GWP	IE	Très faible <10	Faible (<150)	Moyen (< 750)	Fort (>750)	Très fort (>1500)	Extrême- ment fort (> 2500)
Consommation énergétique	CE	Faible		Moyen		Fort	
Risque sur la sécurité (classe selon la norme 378)	RS	A1	A2L		A2/B2		A3/B3
Coût de la solution (hors maintenance)	CO	Faible		Moyen		Fort	
Disponibilité	DI	Industrielle		Prototype (field test)		Laboratoire	
Capacité volumétrique	CV	Suffisante		Moyenne		Insuffisante	

2.4.3 Les fiches techniques des alternatives à compression de vapeur

Machine frigorifique à absorption

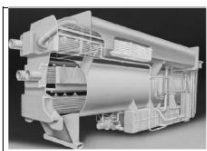
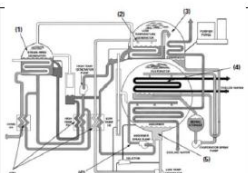



Figure 1 : Machine à absorption LiBr (Trane) Figure 2 : Schéma de principe d'une machine à double effet (Trane)

Les machines à absorption existent depuis l'invention des machines frigorifiques (autour de 1850), l'absorption a précédé les systèmes à compression. Les deux couples frigorifiques et absorbants qui ont dominé le marché des machines à absorption et qui dominent encore sont respectivement :

- l'eau comme frigorigène et la solution eau-bromure de lithium comme absorbant
- l'ammoniac comme frigorigène et la solution eau-ammoniac comme absorbant.

Eau – Bromure de Lithium

Les groupes refroidisseurs d'eau (GRE) à absorption eau-bromure de lithium sont en général des machines de puissances supérieures à 350 kW froid et jusqu'à plusieurs mégawatts (cf. figure 1). Les seules exceptions sont les machines produites par le groupe YASAKI dont les machines commencent autour de 50 kW froid. Les machines eau-bromure de lithium évaporent de l'eau à 2 °C et fonctionnent donc sous vide partiel (7 millibars), ce qui implique des volumes très importants car la masse volumique de la vapeur d'eau à 2 °C est de 5 g/m³.

Comme l'indique les documents de TRANE, qui fabrique aussi bien des GRE à absorption qu'à compression, l'absorption représente de l'ordre de 0,5 % du marché mondial des GRE de grande puissance.

Tableau 1 : Vente des machines à absorption eau – bromure de lithium en Chine (Chen 07)

Year	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Direct-fired type	1210	1341	1529	1152	2091	2385	3052	2785	4200	5600
Total	3240	3575	2780	2600	3289	3845	4320	3838	5500	6917

Comme le fait voir le tableau 1 des ventes annuelles de GRE eau-bromure de lithium, la Chine à l'instar du Japon et de la Corée produit et utilise un parc de plusieurs dizaines de milliers de ces GRE ; la moitié sont des machines utilisant un brûleur gaz (tableau 1 : direct-fired), les autres fonctionnent avec de la vapeur d'eau comme source de chaleur. A noter que l'efficacité énergétique de tels

Nom scientifique du principe de production de froid

Bref historique de la technique

Domaine d'application technique

3. Synthèse du corpus réglementaire et normatif en France et en Europe

3.1 Introduction

Cette section présente les principales réglementations applicables aux installations frigorifiques. Ces réglementations peuvent être :

- des règlements CE d'application directe au sein des états membres, ces derniers sont souvent complétés d'une réglementation nationale, auquel cas, la réglementation CE complétée des dispositions nationales s'appliquent et, en cas de contradiction entre les textes, le texte le plus exigeant s'applique
- des directives européennes qui formalisent des exigences aux Etats. Ces derniers doivent transcrire dans un délai donné ces directives dans le cas de textes nationaux (transposition en droit national des directives) avec, en général, un détail adapté aux structures de l'état concernés. Ces directives, dites de la nouvelle approche, facilitent le recours aux normes qui, sans être obligatoires, fournissent un outil pour la présomption de conformité d'un produit aux exigences essentielles d'un produit. Elles aboutissent à un marquage de conformité (marquage CE complété de mentions complémentaires nécessaires) permettant à un fabricant de mettre sur le marché le produit ayant fait l'objet d'une déclaration CE de conformité partout en Europe sans qu'un état puisse ajouter de barrière technique aux échanges. Les directives régissent les produits ou équipements neufs. Des règles nationales complètent ces dispositions pour les équipements en service. Pour les matériels frigorifiques de forte puissance, la notion même d'équipement pose problème car ils reposent souvent sur des systèmes faisant intervenir plusieurs fabricants de sous-ensembles et des professionnels en charge de l'assemblage.
- Des textes nationaux issus de la loi (décrets, arrêté d'application...). Ces textes s'appliquent en général à des contrôles d'équipements en service ou de réglementations transversales relatives à la sécurité.

3.2 Les réglementations applicables aux installations frigorifiques et de climatisation

Les directives européennes suivantes ne sont pas résumées dans les parties ci-après, mais sont à prendre en compte pour tous les équipements frigorifiques.

- Directive 2006/42/CE « Machines »
- Directive 2006/95/CE « Basse Tension »
- Directive 2004/108/CE « Compatibilité électromagnétique (CEM) »

Ces directives fixent des exigences essentielles de sécurité dont le but est :

- La sécurité des personnes, des biens et de l'environnement
- La libre circulation des produits en Europe.

Les normes européennes harmonisées (EN) sont établies pour satisfaire aux exigences essentielles des différentes directives.

3.2.1 Réglementation liée à l'impact sur l'effet de serre (règlement 842/2006)

Règlement (CE) 842/2006

La réglementation européenne en vigueur en matière de gaz fluorés visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, en conformité avec le Protocole de Kyoto, se compose de deux actes législatifs principaux :

- le règlement (CE) n° 842/2006 qui concerne les équipements fixes et est axé sur la prévention des fuites au cours de l'utilisation et lors de la fin de la vie des équipements; (un petit nombre d'interdictions concerne les gaz fluorés utilisés dans des applications spécialisées)

- la directive 2006/40/CE qui concerne les systèmes de climatisation des véhicules automobiles et instaure une restriction d'utilisation des gaz fluorés de GWP (Global Warming Potential) supérieur à 150.

Sa traduction en droit français se fait par les articles 543-75 à 543-125 du code de l'environnement.

Le règlement (CE) n° 842/2006 a pour objectif la réduction des émissions de gaz fluorés par :

- l'incitation au confinement des fluides frigorigènes dans les circuits où ils sont utilisés
- l'obligation au contrôle d'étanchéité régulier, au moins une fois par an
- l'obligation à l'installation de systèmes de détection des fuites pour les installations contenant plus de 300 kg de gaz fluorés
- l'obligation à la récupération lors de la maintenance et de la fin de vie des équipements;
- l'obligation à la mise en place (par les états membres) de programmes de formation et certification du personnel réalisant les contrôles d'étanchéité, la récupération, le recyclage, la régénération et la destruction des gaz fluorés.

Afin d'améliorer le suivi des mouvements des gaz fluorés et de leurs émissions, il est également stipulé les obligations suivantes :

- la tenue de registres indiquant les quantités et types de fluides utilisés
- l'étiquetage des équipements et produits contenant des gaz fluorés (type et quantité de gaz)
- la déclaration des quantités de gaz fluorés produites, importées et exportées, (ainsi que les applications dans lesquelles ils ont été utilisés et les émissions prévues) et des quantités recyclées, régénérées ou détruites.

Ce règlement est complété par dix règlements de la Commission établissant le format des rapports, le type d'étiquette et les exigences supplémentaires d'étiquetage, les exigences types applicables au contrôle d'étanchéité, les prescriptions en matière de programmes de formation et de certification, ainsi que le modèle de notification de ces programmes.

Règlement (CE) 1005/2009

Le règlement (CE) 1005/2009, relatif aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone, a remplacé le règlement (CE) 2037/2000 établi à la suite du Protocole de Montréal.

En résumé, concernant les HCFC, le règlement (CE) 1005/2009 établit principalement que :

- la production de HCFC est autorisée jusqu'au 31/12/2019 mais doit suivre un calendrier de réduction progressive basé sur le niveau de référence de production en 1997 (allant de 35 % sur la période 2010 à 2013 à 7 % sur la période 2017 à 2019)
- l'importation de HCFC est interdite sauf pour un reconditionnement préalable à une exportation (*interdiction également de HCFC recyclés ou régénérés*)
- la mise sur le marché de HCFC régénérés est autorisée jusqu'au 31/12/2014 pour la maintenance et l'entretien des équipements

Concernant l'usage des HCFC recyclés ou régénérés :

- l'utilisation de HCFC régénérés est autorisée si les bouteilles contenant les fluides sont étiquetées (numéro de lot, adresse de l'entreprise de régénération)
- l'utilisation des HCFC recyclés est autorisée jusqu'au 31/12/2014 mais uniquement par l'opérateur ou pour le détenteur pour lequel a été faite la récupération
- l'usage des HCFC recyclés ou régénérés doit être suivi, par entreprise, dans un registre mentionnant les entreprises ayant fourni le HCFC régénéré ou la source des HCFC recyclés, avec un suivi précis des quantités pour les équipements de charge de plus de 3 kg

Concernant la limitation des émissions des installations fonctionnant avec des HCFC :

- les entreprises doivent prendre toutes les mesures possibles pour prévenir et limiter les fuites de HCFC (contrôle d'étanchéité annuel minimum, dont la fréquence augmente avec la charge, réparation rapide des fuites, registre de suivi de l'installation)
- au cours des opérations de maintenance et avant de démantèlement des équipements, les HCFC doivent être récupérés afin d'être détruits, recyclés ou régénérés par du personnel qualifié (les états membres devant en définir le niveau minimal)

Révision du règlement (CE) 842/2006

Le 16 décembre 2013, le Trilogue entre le Parlement, la Commission et le Conseil a abouti à un texte de compromis dont le contenu est résumé ci-dessous.

Proposition de révision de la Commission

La proposition présentée par la Commission européenne le 7 novembre 2012, a été établie en vue de remplacer le règlement (CE) 842/2006 pour faciliter les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre en Europe d'ici 2030, de façon plus efficace et à un coût moindre. Elle s'appuie sur les derniers rapports publiés, à savoir :

- le quatrième rapport du GIEC, qui confirme la nécessité de limiter l'augmentation de la température mondiale à 2 °C, ce qui nécessite, selon le Conseil Européen, de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 80 à 95 % en 2050 par rapport au niveau 1990 dans tous les secteurs, en particulier celui des gaz fluorés
- l'étude de l'application du règlement F-Gas en vigueur par la Commission (Rapport sur l'application, les effets et l'adéquation du règlement relatif à certains gaz à effet de serre fluorés N°842/2006), qui a conclu que ce règlement nécessitait des améliorations et d'être pleinement appliqué par l'ensemble des états membres
- une étude préalable à la révision de la réglementation (rapport Okorecherche) qui a montré que l'utilisation de substituts aux gaz fluorés pourrait permettre de réduire les émissions équivalentes CO₂ annuelles de deux tiers d'ici à 2030 "pour un coût relativement faible".

La proposition de révision demande de réduire l'utilisation des gaz fluorés à fort GWP au profit d'autres fluides qu'elle désigne comme "énergétiquement efficaces et sans danger", tout en maintenant les objectifs d'amélioration du confinement des installations et de récupération en fin de vie des équipements initialement prévus par le règlement 842/2006.

La Commission considère que cette nouvelle réglementation devrait faciliter le développement de nouveaux fluides frigorigènes et technologies et, d'un point de vue politique, devrait devancer l'éventuelle obligation de réduction de la production et consommation mondiales de HFC pressenties dans les différentes propositions de plusieurs parties au Protocole de Montréal depuis 2009 (voire une évolution du Protocole de Montréal).

En résumé, la proposition telle que rédigée, à la date de rédaction de ce rapport :

- maintient les dispositions du règlement (CE) N° 842/2006, en particulier en matière de prévention des émissions, contrôles d'étanchéité, obligation à la mise en place de systèmes de détection des fuites, tenue des registres, étiquetage, récupération, tout en étant plus contraignante, notamment pour les installations utilisant des HFC à fort GWP puisque les seuils sont désormais définis selon des niveaux de charges en équivalent CO₂ (les installations au R-404A sont désormais concernées par le contrôle d'étanchéité trimestriel dès une charge de 128 kg par exemple)
- étend certaines mesures de confinement aux camions (> 3,5 t) et remorques frigorifiques
- oblige implicitement à la mise en place de programmes de formation et de certification par les états membres tout en incluant la nécessité à ce que les personnes manipulant les gaz fluorés à effet de serre soient également formées aux nouvelles technologies et à la manipulation des nouveaux fluides
- introduit des **limites quantitatives aux volumes de HFC mis sur le marché dans l'Union Européenne** selon une réduction progressive sur la période 2016 à 2030, après un gel en 2015. Ces volumes, exprimés en tonnes de CO₂ équivalent, sont calculés sur la base du volume de référence correspondant à la moyenne annuelle des quantités totales produites et importées dans l'union européenne sur la période 2008 à 2011. Ce volume de référence est basé sur les quantités déclarées³ de fluides en vrac, ne tenant pas compte des équipements pré-chargés. Les quantités totales pouvant être mises sur le marché en 2016 et 2017 ne devront pas dépasser 93 % de ce volume de référence pour atteindre 21 % en 2030, soit une réduction de 79 %. Chaque producteur ou importateur de HFC (dont la production est

³ <http://www.eea.europa.eu/publications/fluorinated-greenhouse-gases-2012>

supérieure à 1 000 t eq. CO₂ par an) se verra allouer par la Commission un **Quota** tenant compte principalement:

- de sa propre quantité de référence de 2008 à 2011;
- du pourcentage autorisé pour l'année en cours
- d'un facteur 0,95 afin de pouvoir allouer un quota aux entreprises ayant une production ou importation nulle sur la période de référence

Les quotas seront réévalués tous les 3 ans (notification sur le registre des quotas) en fonction des déclarations annuelles des producteurs et importateurs communiquées à la Commission.

Ces mesures sont renforcées

- **par des mesures d'interdiction de mises sur le marché (Annexe III) :**
 - ✓ des équipements de **froid domestique** contenant des **HFC de GWP supérieur à 150**, à partir du 1er Janvier 2015
 - ✓ des équipements **hermétiques de froid commercial** (réfrigérateurs et congélateurs) contenant des **HFC de GWP supérieur à 2500** à partir du 1er Janvier 2017 **et de GWP supérieur à 150** à partir de 2020
 - ✓ de **climatiseurs portables autonomes** (systèmes hermétiques) contenant des **HFC de GWP supérieur à 150** à partir du 1er Janvier 2020
 - ✓ de systèmes de protection contre l'incendie et les extincteurs contenant du **HFC-23** dans les à partir du 1er Janvier 2015.

Cette liste pourra être modifiée par la Commission pour y inclure d'autres équipements utilisant des HFC de GWP supérieurs à 150 (Article 9.3). Des exemptions sont possibles pour les équipements pour lesquels il a été prouvé que les émissions totales sur l'ensemble du cycle de vie étaient inférieures à celles d'un équipement équivalent ne contenant pas de HFC et répondant aux mêmes exigences d'écoconception.

- **et par des mesures de restriction d'utilisation:**
avec l'interdiction de recharge des équipements de réfrigération par un HFC de GWP supérieur à 2500 à partir du 1er Janvier 2020 si leur charge est supérieure à 40 t eq. CO₂ (i.e. supérieure à 10,8 kg de R-404A, ou supérieure à 29,2 kg de HFC-134a).

Les HFC concernés par ces mesures sont listés en annexe 1 (fluides primaires) et excluent les HFC insaturés (le R-1234yf et R-1234ze sont inclus à l'annexe II qui concerne les fluides faisant partie du reporting en plus de ceux de l'annexe I). Les mélanges HFC-HFO seront concernés par les mesures d'interdiction et de limitation puisqu'ils contiennent des HFC listés à l'annexe I.

Deux références sont données en annexe pour les GWP : le 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC pour les HFC et le rapport d'évaluation 2010 du groupe d'évaluation scientifique du Protocole de Montréal, pour les HFC insaturés. Alors que la mise à jour du règlement 842/2006 prenait en compte les GWP donnés par le 4^{ème} rapport d'évaluation (cf. Annexe 7 pour les différences).

3.2.2 Règlementation applicable aux ATmosphères EXplosibles (ATEX) / directive 94/9/CE et 99/92/CE

La directive 94/9/CE concerne les fabricants de matériels qui doivent déterminer si leurs matériels doivent être soumis aux exigences de la directive.

La directive 99/92/CE stipule qu'à partir de juin 2003 tout nouvel équipement acquis par un utilisateur doit être conforme à cette directive. Pour les autres équipements, les utilisateurs disposaient de 3 ans pour évaluer le niveau de sécurité EX. Cette directive a été transposée en droit français par les articles R. 4216-31 et R. 4227-42 à R. 4227-54 du code du travail.

Deux arrêtés du 8 juillet 2003 complètent ces articles en transposant les annexes de la directive et en précisant :

- la définition des emplacements où des atmosphères explosives peuvent se former

- les prescriptions visant à améliorer la sécurité des travailleurs exposés aux risques d'explosion
- les critères de sélection des systèmes de protection
- la signalisation

Un 3^{ème} arrêté du 28 juillet 2003 fixe les conditions d'installation des matériels électriques dans les emplacements où des atmosphères explosives peuvent se présenter.

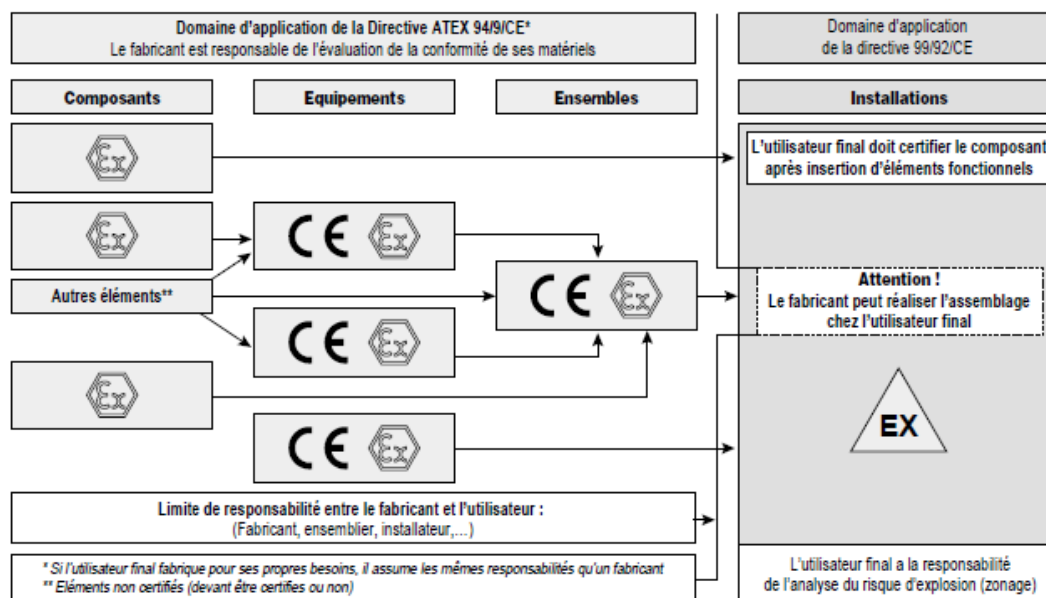


Figure 3.1 Domaines d'application respectifs des deux directives (LCIE guide de poche)

Le zonage ATEX est sous la responsabilité de l'utilisateur.

Le tableau 3.1 précise les zones d'atmosphère explosive. Pour être simple, les deux seules options pour les systèmes frigorifiques ou de climatisation (ou tout autre système) est d'être hors zone (sans numéro donc) ou en zone 2, où une atmosphère explosive peut se constituer à partir d'un dysfonctionnement, typiquement une rupture de tuyauterie frigorifique ou une fuite suffisante pour créer une telle atmosphère.

Tableau 3.1 Zones définies par la réglementation

Atmosphère explosive	Zone gaz/vapeur	Zone poussière
Permanente	0	20
Occasionnelle en fonctionnement normal	1	21
Accidentelle en cas de dysfonctionnement	2	22

On doit garder en tête que la directive ATEX vise d'abord les unités industrielles comme les raffineries, les plateformes pétrolières, les mines de charbon, les silos de grains, les unités de méthanisation, etc... qui sont des milieux comportant des risques élevés du fait de la présence massive de matériaux combustibles ou explosifs. La méthodologie suivie est bien sûr tout à fait adéquate pour les systèmes frigorifiques contenant des fluides inflammables. Ce qui est différentiant, c'est qu'en fait des équipements contenant des fluides inflammables le sont dans des établissements recevant du public et dans des logements résidentiels sans que les utilisateurs, ou le public plus généralement, soient avertis des risques et des mesures préventives.

La lecture attentive des 2 directives ATEX indique bien que dans TOUS LES CAS c'est l'utilisateur qui est le responsable ultime de la sécurité des équipements, ce qui est en contradiction avec l'historique même de l'introduction des fluides frigorigènes

inflammables qui l'ont été hors directive ATEX et selon les norme EN 378 et IEC EN 60335-2-40, EN 60335-2-24.

En fait, si on se reporte à l'expérience des 20 dernières années pour les réfrigérateurs domestiques, on peut résumer ainsi les mesures clés :

- restriction de la charge à 150 g pour limiter les conséquences d'un éventuel incendie (de fait la charge est bien inférieure pour la plupart des réfrigérateurs domestiques (de 20 à 70 g)
- reconception des évaporateurs intégrés dans les parois plastiques et donc non susceptibles d'être endommagés par des dégivrages « au couteau »
- confinement des éléments électriques susceptibles de produire des étincelles.

Ce qui est relativement nouveau, c'est l'extension en cours des meubles frigorifiques de vente « stand alone » qui fonctionnent avec des fluides inflammables dans des espaces recevant du public nommément les supermarchés et la disponibilité marché de groupes refroidisseurs d'eau fonctionnant au propane (R-290) jusqu'à des charges de plus de 50 kg.

On note que sur la frontière de l'équipement frigorifique, les composants ATEX vont être les composants électriques. La conception générale de l'équipement pour la partie mécanique peut faire l'objet d'une certification volontaire IECeX qui consiste à obtenir un certificat de conformité par rapport à la directive 94/9/CE et que ce mode de certification n'est utilisé que par des entreprises dont les matériels fonctionnent dans des zones ATEX industrielles.

Pour ce qui concerne les fabricants d'équipements frigorifiques utilisant des fluides

- très modérément inflammables 2L (R-1234yf ou R-1234ze ou HFC-32 ou R-717)
- ou modérément inflammables (R-152a)
- ou inflammables (R-290 ou R-600a)

la directive ATEX 94/9/CE n'apporte pas d'indication incluant ces différentes classes, qui sont à l'heure actuelle reconnues pour 2 et 3 par la norme EN 378 et 2L, 2 et 3 par la norme Ashrae 34. Plus généralement, il n'y a pas encore d'harmonisation entre la directive ATEX et la norme EN 378. Cependant, un équipement frigorifique contenant un fluide capable de créer une atmosphère explosive relève bien de la directive ATEX qui, de fait, n'est pas appliquée sauf par l'installation de composants électriques certifiés ATEX.

Les fabricants de matériels frigorifiques utilisant des fluides inflammables suivent et recommandent de « bonnes pratiques » qu'on peut trouver dans un document comme le « guide to Flammable Refrigerants – October 2012 » de la BRA (British Refrigeration Association). Ces bonnes pratiques examinent :

- les risques de fuite,
- la répartition de ces fuites dans l'environnement immédiat et la création dans un volume donné d'une atmosphère potentiellement explosive
- la présence ou non de sources d'inflammation et si de telles sources existent les éloigner (les mettre hors zone 2) ou les confiner
- la dilution par ventilation est une stratégie de mise en sécurité qui suppose une mesure de concentration dans le volume de contrôle

3.2.3 Règlements applicables aux Equipements Sous Pression (DESP et CTP)

Textes de références

- Directive 97/23/CE « Équipements sous pression »
- Arrêté du 15 mars 2000 relatif à l'exploitation des équipements sous pression (modifié par les arrêtés du 13 octobre 2000, du 30 mars 2005 et du 31 janvier 2011)
- CTP (cahiers techniques professionnels) N° 1 à 3

Description générale

Les équipements de production de froid sont des équipements fonctionnant sous pression, et sont soumis pour leur mise sur le marché à la directive européenne 97-23-CE- du 29 mai 1997, transposée en droit français par le décret 99-1046 du 13 décembre 1999. En effet, la directive

97/23/CE (DESP) concerne tous les équipements dont la pression maximale admissible est supérieure à 0,5 bar. Elle concerne tous les éléments d'une installation (récipient, tuyauterie, organes de sécurité).

En service, certains de ces équipements sont soumis à l'arrêté du 15 mars 2000. Cet arrêté prévoit des épreuves périodiques en pression, souvent impossibles à réaliser sur du matériel frigorifique en fonctionnement. En effet, une fois en service, ces épreuves nécessiteraient une vidange totale de l'installation et son arrêt.

Pour la réfrigération et le conditionnement d'air des cahiers techniques professionnels (CTP1, CTP2, CTP3) ont été rédigés compte tenu de cette situation pour exempter les détenteurs de ces épreuves : vérification intérieure, mise à nu de l'équipement et épreuve lors des requalifications.

Conformité des installations neuves

Au sens de la directive, l'équipement sous pression comprend aussi bien la partie sous pression proprement dite, c'est-à-dire les récipients, que les autres parties de l'installation (tuyauteries, accessoires de sécurité, et accessoires sous pression). Pour être conforme, lors de la mise sur le marché, les équipements neufs doivent disposer du marquage CE. La directive s'applique à la conception et à la fabrication des équipements et fixe des exigences essentielles à respecter en termes de sécurité. Elle définit aussi quatre classes d'équipements en fonction de la pression maximale admissible et du volume pour les récipients ou échangeurs (figure 3.2). D'autres critères s'appliquent aux tuyauteries en fonction de la pression de service et du diamètre nominal.

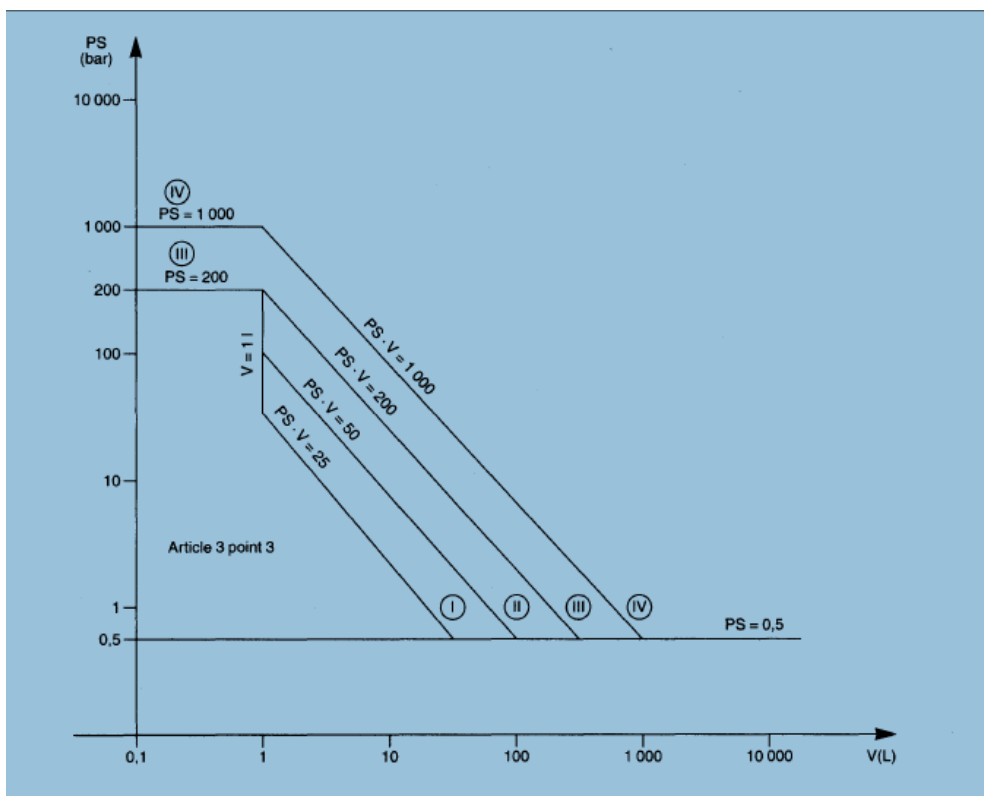


Figure 3.2 Classes d'équipements en fonction de la pression maximale admissible et du volume

En fonction de la classe de l'équipement et donc du risque encouru, la directive prévoit plusieurs méthodes d'évaluation de la conformité, allant de la simple déclaration de conformité par le fabricant, jusqu'à des évaluations de l'équipement ou du système qualité du fabricant par un organisme certificateur tierce partie. Ces évaluations tierce partie sont réalisées par des organismes compétents désignés par les Etats membre et notifiés à Bruxelles.

Contrôle des installations en service

L'arrêté du 15 mars 2000 impose un **contrôle** périodique et une requalification périodique, consistant en une visite et une épreuve des parties sous pression des récipients. Ces épreuves sont complétées d'une inspection des accessoires sous pression et de sécurité, des tuyauteries et des supports. Ces dispositions ne sont pas harmonisées en Europe et relèvent du droit national. Les dispositions de cet arrêté s'appliquent aussi bien aux équipements sous pression « ancien régime » que ceux conçus sous le « nouveau régime », conçus et fabriqués suivant les dispositions du décret 99-1046 du 13 décembre 1999 (DESP 97/23/CE).

L'exploitant doit constituer un dossier relatif aux équipements sous pression fonctionnant sur le site. Ce dossier comporte :

- une liste à jour des équipements soumis à l'arrêté du 15/03/2000,
- le dossier descriptif de chacun de ces équipements (en particulier la déclaration de conformité relative à l'équipement)
- un dossier d'exploitation, constitué pour chacun de ces équipements soumis à déclaration de mise en service, c'est-à-dire le plan de contrôle ainsi que les documents de contrôle périodique et requalification périodique.

L'exploitant doit adresser à sa préfecture une déclaration de mise en service pour ses équipements concernés, réaliser des inspections périodiques pour chacun de ses équipements et des requalifications périodiques pour certains de ses équipements.

L'inspection périodique

- a lieu tous les 40 mois maximum pour les équipements soumis au CTP1, et annuelle pour les équipements répondant aux CTP2 et 3
- est réalisée sous la responsabilité de l'exploitant, par une personne compétente désignée à cet effet, apte à reconnaître les défauts susceptibles d'être rencontrés et à en apprécier la gravité. Ce sera une personne compétente pour les installations soumises au CTP1 et une personne habilitée pour les installations soumises aux CTP 2 et 3
- a pour objet de vérifier que l'état de l'équipement sous pression lui permet d'être maintenu en service avec un niveau de sécurité compatible avec les conditions d'exploitation prévisibles
- consiste en l'analyse du dossier de l'installation et du dossier d'exploitation, la vérification visuelle extérieure, la vérification des échangeurs, la vérification des accessoires de sécurité, la vérification de l'étanchéité, le contrôle de l'absence d'incondensables, la consignation des résultats de l'inspection.

Les tuyauteries font l'objet d'inspections dont la nature et la périodicité sont précisées dans un plan de contrôle établi par l'exploitant dans l'année qui suit leur mise en service.

La requalification périodique se déroule tous les 5 ans pour les installations fonctionnant à l'ammoniac et tous les 10 ans pour les installations fonctionnant aux HFC. Les opérations de requalification périodiques sont effectuées par un expert d'un organisme habilité ou d'un service d'inspection reconnu, autorisé à cet effet.

Une opération de requalification périodique comporte la vérification documentaire (dossier descriptif + dossier d'exploitation) et le re-tarage ou remplacement des soupapes de sécurité. Elle se conclut par une attestation accompagnée d'un compte rendu et porte le poinçon de l'Etat apposé par l'organisme habilité.

3.2.4 Règlementation applicables aux Installations Classées pour l'Environnement ICPE

Les installations frigorifiques peuvent également être réglementées par les textes relatifs aux installations classées pour la protection de l'environnement ; il s'agit des articles du Livre V, Titre 1^{er}, du code de l'environnement.

Sont soumis aux dispositions de cette réglementation, les usines, ateliers, dépôts, chantiers et, d'une manière générale, les installations exploitées ou détenues par toute personne physique ou morale, publique ou privée, qui peuvent présenter des dangers ou des inconvénients soit pour la commodité du voisinage, soit pour la santé, la sécurité, la salubrité publique, soit pour l'agriculture, soit pour la protection de la nature, de l'environnement et des paysages, soit pour l'utilisation rationnelle de l'énergie, soit pour la conservation des sites et des monuments ainsi que des éléments du patrimoine archéologique. Les installations classées pour la protection de l'environnement sont gérées en rubriques.

Les critères concernant les installations frigorifiques de façon intrinsèque sont la nature et la quantité de fluide frigorigène contenu dans l'installation, le niveau de pression effective et de puissance absorbée, la présence de tours de refroidissement. On distingue ainsi les risques suivants :

- la nocivité intrinsèque des fluides frigorigènes pour la sécurité des personnes ou l'environnement
- les risques liés à la pression
- les risques de légionnelles pour la santé

Le niveau de dangerosité des installations les soumet à déclaration, enregistrement ou autorisation.

Sécurité des personnes : Rubrique 1136B : Emploi de l'ammoniac

Concernant l'emploi d'ammoniac, les installations sont soumises à déclaration avec contrôle périodique lorsqu'elles comportent plus de 150 kg d'ammoniac et moins de 1,5 t et à autorisation lorsque la quantité d'ammoniac est comprise entre 1,5 et 200 t et autorisation avec servitude d'utilité publique au-delà (rubrique 1136B).

Lorsqu'une installation entre dans le champ de la rubrique 1136, l'arrêté du 19 novembre 2009 est applicable ; les installations sont dès lors soumises à un contrôle périodique tous les 5 ans, décrit en annexe IV de l'arrêté. Ces contrôles portent sur la vérification de la mise en œuvre des obligations, d'un point de vue documentaire et effectif, concernant les critères d'installation, de sécurité, d'accessibilité, de propreté, de consignes d'exploitation, de signalisation et des risques inhérents à l'utilisation de l'ammoniac. En particulier, concernant la détection de fuite, l'exploitant dresse la liste de ses détecteurs avec leur fonctionnalité et détermine les opérations d'entretien destinées à maintenir leur efficacité dans le temps. Des détecteurs de gaz sont mis en place dans les zones susceptibles d'être impactées par la fuite d'ammoniac, notamment les salles des machines, ainsi que les locaux et galeries techniques.

Les parties de l'installation qui, en raison des caractéristiques qualitatives et quantitatives des matières mises en œuvre, stockées, utilisées ou produites, sont susceptibles d'être à l'origine d'un sinistre sont équipées de systèmes de détection dont les niveaux de sensibilité sont adaptés aux situations. L'exploitant fixe au minimum les deux seuils de sécurité suivants :

- le franchissement du premier seuil (soit 500 ppm dans les endroits où le personnel d'exploitation est toujours présent, soit 2 000 ppm dans le cas contraire) entraînant le déclenchement d'une alarme sonore ou lumineuse et la mise en service de la ventilation additionnelle, conformément aux normes en vigueur
- le franchissement du deuxième seuil (soit 1 000 ppm dans les endroits où le personnel d'exploitation est toujours présent, soit 4 000 ppm dans le cas contraire) entraîne, en plus des dispositions précédentes, la mise en sécurité des installations, une alarme audible en tous points de l'établissement et le cas échéant, une transmission à distance vers une personne techniquement compétente.

Ci-après, de manière synoptique et en utilisant des documents JCI, est présentée la synthèse du champ d'application de la réglementation ammoniac (figure 3.3) ainsi que la réglementation elle-même (tableau 3.2), puis un tableau indiquant qui est habilité à effectuer les contrôles (tableau 3.3).

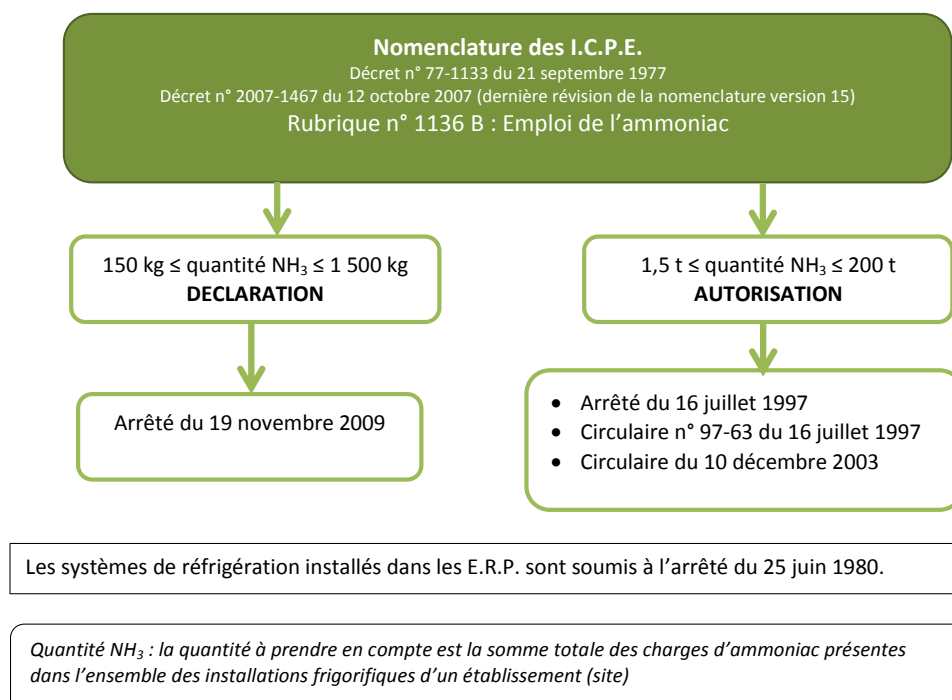


Figure 3.3 Champ d'application de la réglementation ammoniac (NH₃ ou R-717)

Tableau 3.2 Réglementation et contrôles réglementaires des installations NH₃

Non classée I.C.P.E. Quantité NH ₃ < 150 kg	DECLARATION 150 kg ≤ quantité NH ₃ ≤ 1 500 kg	AUTORISATION 1,5 t ≤ quantité NH ₃ ≤ 200 t
Aucune obligation de contrôle réglementaire. Pour les systèmes frigorifiques installés dans les E.R.P., une vérification technique annuelle est obligatoire (article CH 58 de l'arrêté du 25 juin 1980). Les vérifications techniques doivent être effectuées par des organismes agréés (article GE 7 à GE 9 de l'arrêté du 25 juin 1980 ;	Modification de l'arrêté du 23 février 1998, contrôle de la conformité de l'installation par un organisme agréé : • 6 mois après la première mise en service • Périodiquement tous les 5 ans maxi (10 ans maxi pour les sites certifiés ISO 14001 ou EMAS) • Pour les installations existant avant le 31/12/2008 : date prorogée au 30/06/2009.	Arrêté du 16 juillet 1997 Art. 9 : une vérification de l'installation doit être réalisée dans les cas suivants : Première mise en service Arrêt prolongé du système de réfrigération Modification notable de l'installation Travaux de maintenance ayant nécessité un arrêt de longue durée Vérification périodique annuelle. Vérification à réaliser par une personne ou une entreprise compétente désignée par l'exploitant avec l'approbation de l'inspection des installations classées. Circulaire du 10 décembre 2003 Rappel des obligations de l'exploitant concernant la vérification des installations avec un tableau de synthèse des contrôles à réaliser.

Tableau 3.3 Qui peut effectuer le contrôle ou la vérification des installations ?

DECLARATION 150 kg ≤ quantité NH ₃ ≤ 1 500 kg	AUTORISATION 1,5 t ≤ quantité NH ₃ ≤ 200 t
Liste des organismes agréés à ce jour pour effectuer les contrôles de conformité des installations - APAVE Alsacienne - APAVE Parisienne - CETE APAVE Sud Europe - CETE APAVE Nord Ouest - Bureau Veritas - AXE - QUALICONSLT - ECOPASS Le détail des points de conformité à contrôler figure dans l'annexe III de l'arrêté du 19 novembre 2009. Note : ce contrôle de conformité par un organisme agréé ne remet pas en cause nos prestations de vérification des installations	Arrêté du 19 juillet 1997 Art. 9 « cette vérification est à réaliser par une personne ou une entreprise compétente désignée par l'exploitant avec l'approbation de l'inspection des installations classées » Remarques importantes ✓ Il est du devoir de l'exploitant de l'installation de soumettre auprès des autorités locales (DRIRE, DREAL ou DSV) le choix de la personne ou de l'entreprise compétente pour réaliser ces vérifications. ✓ L'exploitant de l'installation est l'interlocuteur des autorités et non ses fournisseurs ou ses sous-traitants. ✓ Il n'existe pas d'agrément ou d'habilitation délivré par les autorités pour que les entreprises de froid puissent réaliser ces vérifications.

Risque pour l'environnement : Rubrique 1185 2a : emploi de gaz à effet de serre fluorés

Concernant l'emploi de fluides frigorigènes fluorés soumis au règlement 842/2006 ou de fluides appauvrissant la couche d'ozone selon le règlement 1005/2009, les installations comportant des équipements contenant plus de 2 kg et dont la charge cumulée de fluide est supérieure ou égale à 300 kg sont soumises à déclaration avec contrôle périodique (rubrique 1185 2a).

Rubrique 2920 : Installations de compression

Sont aussi soumises à autorisation les installations de compression fonctionnant sous des pressions effectives supérieures à 10⁵ Pa et comprimant ou utilisant des inflammables ou toxiques, la puissance absorbée étant supérieure à 10 MW (rubrique 2920).

Risque pour la santé : Rubrique 2921 (en cours de révision) : refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air

Concernant les tours de refroidissement, la rubrique 2921 précise qu'il y a déclaration lorsque les installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air sont de type fermées ou en cas inverse lorsque la puissance thermique évacuée est inférieure à 2 MW, et autorisation au-delà.

3.2.5 Règlementation applicables aux Etablissement Recevant du Public (ERP)

Les établissements recevant du public sont soumis à des règles complémentaires en matière de sécurité. Ainsi, l'Arrêté du 25 juin 1980 définit les dispositions générales du règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les ERP. Ce règlement de sécurité fixe des règles très générales applicables au bâtiment comme celles de la résistance au feu du bâtiment ou des équipements intérieurs. Son chapitre 5 est intitulé « Chauffage, ventilation, réfrigération climatisation, conditionnement d'air et installation d'eau chaude sanitaire » est le seul à aborder la question de la climatisation ou du traitement d'air. Il contient, dans son paragraphe numéroté CH 35 qui s'applique à la ventilation de confort et donc la climatisation, des exigences sur les fluides frigorigènes. A ce titre, l'usage de fluides A1 et A2 est autorisé avec certaines conditions et les fluides du groupe A3 sont interdits. Les groupes de fluides considérés dans ce paragraphe font référence à la norme 378-1 de 2011. Il est important de signaler que le chapitre 5 de cet arrêté et l'article CH35 utilisent improprement le terme réfrigération pour des applications relevant de la climatisation. Cela a d'ailleurs amené la commission de sécurité à étendre en 2008, les exigences applicables à la climatisation de

confort à des équipements de process (meubles de vente contenant du R-290 en l'occurrence) limitant ainsi la charge à 1,5 kg, limite définie par la norme 378-1 (2000). Face à cette interdiction française d'installer ces équipements dans un ERP, le constructeur de ces équipements a engagé un recours au SOLVIT. Le SOLVIT est un réseau de résolution de problèmes en ligne proposé par la Commission Européenne dans le cas où des réglementations nationales génèrent des barrières techniques ou administratives aux échanges au sein de l'union : les États membres de l'UE y coopèrent pour régler, de façon pragmatique, les problèmes résultant de la mauvaise application de la législation du marché intérieur par les autorités publiques. Le SOLVIT a donc saisi la commission de sécurité en avril 2008. Cette dernière a levé l'ambiguïté sus mentionnée sur le terme réfrigération. Les membres de la sous-commission « chauffage gaz grandes cuisines » ont rappelé que les articles CH du règlement de sécurité ne visent pas les installations de production de froid alimentaire (process). Par ailleurs, le type M n'impose pas de dispositions particulières sur ce sujet. En conséquence, rien ne s'oppose à l'utilisation d'appareils de réfrigération chargés avec des hydrocarbures dans un ERP. L'application de l'article CH35, pour justifier d'un avis défavorable, ne semble pas pertinente en la matière puisqu'il se trouve dans un chapitre relatif à la ventilation (il peut y avoir eu une confusion due à la présence du mot "cooling").

Il existe bien un article M42 qui limite les quantités d'hydrocarbures liquéfiés dans les surfaces commerciales mais cette limite se situe à un niveau tel que plusieurs centaines d'appareils tels que ceux concernés par le recours (meubles frigorifiques de vente) seraient nécessaires pour l'atteindre.

En conclusion, la sous-commission rappelle qu'elle serait fondée à exiger des distances de sécurité entre ces congélateurs pour éviter la propagation d'un incendie et qu'il est indispensable que le pictogramme de danger relatif au propane soit bien visible sur l'extérieur des congélateurs pour prévenir de la présence d'un risque particulier pour les sapeurs-pompiers amenés à intervenir en cas d'incendie sur ou à proximité de ces appareils.

Il subsiste chez bien des utilisateurs l'idée que le règlement ERP s'oppose à l'usage du R-290 comme fluide frigorigène alors qu'il n'en est rien. Les règles appliquées par les commissions de sécurité restent cependant suffisamment floues pour laisser des interprétations locales arbitrer les obligations relevant des exploitants.

Il subsiste cependant que le risque incendie est avéré et qu'il induit un seuil de charge psychologique à partir duquel un exploitant refusera cette solution technique.

3.3 Normes applicables aux installations frigorifiques et de climatisation

3.3.1 Les normes de la série EN 378 - Systèmes de réfrigération et pompes à chaleur - Exigences de sécurité et d'environnement

La norme EN-378 comporte 4 parties :

- Partie 1 - Exigences de base, définitions, classification et critères de choix
- Partie 2 - Conception, construction, essais, marquage et documentation
- Partie 3 - Installation in situ et protection des personnes
- Partie 4 - Fonctionnement, maintenance, réparation et récupération.

La norme structure :

- trois types d'occupations (A, B, C) (cf. tableau 3.4)
- différentes structures d'équipements (détente directe et divers systèmes indirects)
- un classement des fluides frigorigènes de sécurité ou toxiques ou inflammables (cf. tableau 3.5).

De ces trois structurations sont établies des recommandations concernant les limites en charge de fluide frigorigène reliées au volume des pièces où est installé le système.

Tableau 3.4 Catégories d'occupation

Catégorie	Caractéristiques
A : Occupation générale	Bâtiments où des personnes peuvent dormir, être à mobilité restreinte, personnes en nombre incontrôlé, sans connaissance possible des mesures de sécurité
B : occupation surveillée	Bâtiments ou pièces où un nombre limité de personnes peuvent se rassembler, certaines étant informées des mesures générales de sécurité
C : accès autorisé uniquement	Pièces ou bâtiments où seules des personnes informées des mesures de sécurité peuvent pénétrer.

Tableau 3.5 Classes de sécurité des fluides frigorigènes

	A : Non toxique Pas d'effet pour une exposition chronique (40h pour une concentration ≥ 400 ppm)	B : Toxique effet pour une exposition chronique (40h pour une concentration < 400 ppm : toxique)
1 : Non inflammable	A1 (HFC-134a)	B1 (R-123)
2 : Modérément inflammable	A2 (R-152a)	B2 (ammoniac)
3 : Inflammable	A3 (R-600a)	B3

Basée sur la classe de sécurité, une limite pratique (en anglais Refrigerant Concentration Limit) est calculée en prenant le plus restrictif des critères soit de toxicité, soit d'inflammabilité. Le tableau E2 de l'annexe E de la partie 1 donne les limites pratiques exprimées en kg/m^3 et les tableaux C donnent les règles de calcul de la charge de fluide frigorigène selon la catégorie des bâtiments. Pour un fluide A1, on obtient le tableau 3.6.

Tableau 3.6 Calcul de la charge pour un fluide A1

A : Occupation générale	Charge max = Limite pratique x volume de la pièce
B : Occupation surveillée	Sous-sol ou étages sans sortie de secours adéquate comme catégorie A Sinon pas de limite
C : Accès autorisé uniquement	Sous-sol ou étages sans sortie de secours adéquate comme catégorie A Sinon pas de limite

Pour un fluide A3 on obtient le tableau 3.7.

Tableau 3.7 Calcul de la charge pour un fluide A3

	Système direct	Système indirect
A : Occupation générale	Conditionnement d'air : $M_{\max} = 2,5 \times \text{LFL}^{5/4} \times h_0 \times A^{1/2}$ Avec LFL : limite inférieure d'inflammabilité H_0 : hauteur de l'appareil dans la pièce A : surface de la pièce Systèmes frigorifiques : Charge max = Limite pratique x volume de la pièce avec charge maximale 1,5 kg	Idem système direct
B : Occupation surveillée	Sous-sol ou étages sans sortie de secours adéquate comme catégorie A Sinon pas de limite	Conditionnement d'air idem 1kg en sous-sol Jusqu'à 25 kg en surface
C : accès autorisé uniquement	Sous-sol ou étages sans sortie de secours adéquate comme catégorie A Sinon pas de limite	Conditionnement d'air idem 1 kg en sous-sol Sans limite en surface

La norme précise dans sa partie 2, toutes les précautions de conception et d'essais et se raccorde à la norme EN 60079-15 :2005 « matériel électrique pour atmosphère explosive », sinon aucune relation à la directive ATEX 94/9/CE n'est faite explicitement. Si bien que la conception des matériels frigorifiques selon EN 378 « échappe » à une approche ATEX complète et en particulier vis-à-vis de l'utilisateur.

3.3.2 Norme ASHRAE 34 - Designation and safety classification of refrigerants

Le comité de la norme ASHRAE est le seul lieu au monde où sont déclarées les caractéristiques physiques, de toxicité et d'inflammabilité des fluides frigorigènes. L'examen est effectué en parallèle dans les sous-comités « nomenclature », « toxicité », « inflammabilité ». Ces sous-comités rapportent au comité qui valide ces travaux, ce qui permet d'introduire de nouveaux fluides ou de nouveaux mélanges avec le préfixe R- pour réfrigérant.

Les études préalables sont longues et coûteuses surtout pour la toxicité. Stratégiquement, le comité ISO 817 aurait dû se substituer au comité ASHRAE 34 mais il est incontestable que l'organisation ISO n'a pas encore fait preuve d'une capacité à aller plus vite que le comité ASHRAE 34.

F L A M M A B I L I T Y	SAFETY GROUP	
	Higher Flammability	A3 B3
	Lower Flammability	A2 B2 A2L* B2L*
	No Flame Propagation	A1 B1
	Lower Toxicity	Higher Toxicity
	INCREASING TOXICITY	

* A2L and B2L are lower flammability refrigerants with a maximum burning velocity of ≤ 10 cm/s (3.9 in./s).

Figure 3.4 Groupe de sécurité des fluides frigorigènes selon la norme ASHRAE 34 -2010

A tel point que l'introduction de la vitesse fondamentale de flamme (Burning Velocity), qui a été faite dans ISO 817 dès 2003, a été en fait introduite en 2010 dans l'ASHRAE 34 (cf. figure 3.4) avant que ne soit adopté l'ISO 817-5 qui est toujours en attente de validation.

La classification des fluides de l'EN 378 dépend de fait des travaux du comité ASHRAE, tant pour la classification de sécurité que pour la nomenclature, de là la mise à jour de EN-378 est toujours en retard de plusieurs années sur celle de l'ASHARE 34 qui procède par addendum.

L'équivalent ASHRAE de l'EN 378 est l'ASHRAE 15 qui est structurée de la même manière : catégorie d'occupations, types de systèmes (direct ou indirect) et classe de fluides frigorigènes. Par contre, les règles de calcul diffèrent mais les restrictions à l'usage des fluides 2 et 3 sont moindres que dans les versions antérieures à l'ASHRAE 15- 2010.

3.3.3 Les normes sectorielles applicables aux installations ou équipements

En complément des réglementations sus mentionnées, il existe des accords d'Etats ou des normes applicables par type d'application dont la conformité est requise soit par l'état de l'art, soit par une réglementation sectorielle.

Dans le domaine du transport frigorifique, l'Etat français a signé un accord international dans le cadre de l'ONU pour la reconnaissance des moyens techniques utilisés pour le transport

international des denrées périssables (Accord ATP). Pour mettre en œuvre cet accord, l'Etat français, comme c'est le cas pour 58 autres pays signataires, a mis en place une réglementation nationale imposant la conformité technique des engins de transport et l'a étendu au transport national. Cette réglementation a pour vocation de renforcer l'hygiène alimentaire et définit des caractéristiques minimales des engins frigorifiques pour permettre le respect de la chaîne du froid. Bien que cette réglementation ne fasse pas obstacle aux développements technologiques et à l'innovation, elle implique des spécifications obligatoires à respecter en termes de capacité frigorifique dans le contexte particulier du transport routier ou ferroviaire.

Un accord similaire, dans le cadre du transport des marchandises dangereuses, s'applique de la même manière et peut, pour certaines solutions techniques, procurer un frein réglementaire pour les solutions à accumulation de froid qui peuvent être assimilées à des marchandises dangereuses.

Les cuves de lait en vrac sont aussi soumises à des exigences additionnelles en termes de vitesse de refroidissement du lait afin de conserver ses caractéristiques organoleptiques et l'absence de risque sanitaire. Un dispositif de normalisation et de certification volontaire (marque NF, Key marque CEN) fournit un système de reconnaissance de la conformité des produits qui, bien que volontaire, sous-tend la réglementation applicable.

3.4 Directive éco-conception 2009/125/CE

Les systèmes de réfrigération et les pompes à chaleur sont des « *produits reliés à l'énergie* » au sens de la directive européenne 2009 / 125 / EC [DIR 09] donnant les recommandations pour l'éco-design de ce type de produit. Cette directive est complétée par le règlement européen 206/2012 [REG 12] de mars 2012 qui réglemente l'Eco-design de produits d'air conditionné.

Ce règlement et cette directive, associés aux documents méthodologiques (MeeRp 2011), permettent de définir les impacts environnementaux positifs et négatifs des systèmes de réfrigération et des pompes à chaleur.

Les indicateurs d'impact environnementaux pertinents sont :

- la masse de déchets ultimes
- l'énergie primaire totale consommée (incluant la fabrication des composants du système)
- les gaz acidifiants émis
- la diminution des ressources abiotiques
- les émissions de gaz à effet de serre
- les émissions de gaz destructeurs de la couche d'ozone stratosphérique
- les oxydants photochimiques émis.

Le règlement 206/2012 définit les exigences d'écoconception pour les systèmes d'air conditionné en application de la directive 2009 / 125 / EC et un règlement est en préparation pour les petits équipements de froid commercial.

L'exigence principale des règlements d'application 206/2012 (climatiseurs réversibles < 12 kW), 813/2013 (PAC air/eau et eau/eau pour le chauffage des locaux) et 814/2013 (PAC ECS) porte sur la performance énergétique.

La méthode pour évaluer les impacts est la méthode comparative où une technologie est comparée aux technologies concurrentes remplissant les mêmes fonctions et procurant les mêmes services. La méthode implique de décrire le cycle de vie du produit, de décomposer le produit en matériaux (bilan matière), d'analyser leur contenu énergétique (énergie grise), d'analyser leur recyclabilité et de définir pour les équipements de réfrigération, de climatisation et de pompe à chaleur, les impacts de la phase d'usage qui est la phase dominante avec la consommation d'énergie associée. Bien sûr, les émissions de fluides frigorigènes constituent usuellement le deuxième impact majeur compte tenu de leur ODP pour les HCFC restants et leur GWP pour les HFC en cours d'utilisation.

La méthode demande aussi l'analyse des impacts sociétaux sur la santé et la sécurité des utilisateurs aussi bien que des opérateurs de fabrication et de maintenance.

Bibliographie essentielle

DIR 09 Directive 2009/125/CE du Parlement européen et du conseil du 21 octobre 2009 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie.

MeeRp 2011. Methodology for Ecodesign of Energy-related Products. MEErP 2011. Final Report. Part 2: Environmental policies and data. Report for the European Commission, DG Enterprise and Industry. Contract SI2.581529.

REG 12 Commission Regulation (EU) No 206/2012 of 6 March 2012 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for air conditioners and comfort fans.

4. Les fluides frigorigènes des systèmes a compression de vapeur

4.1 Introduction

La banque de fluides frigorigènes (CFC, HCFC, HFC, ammoniac, HC, CO₂) est évaluée au niveau mondial à 3,5 millions de tonnes avec une émission moyenne annuelle de 17 %, soit de l'ordre de 600 000 tonnes ce qui donne une émission en équivalent CO₂ de 2,5 milliards de tonnes (données CEP ARMINES et EReIE).

Ceci correspond au fait que les équipements à compression de vapeur regroupe de l'ordre de 2,7 milliards d'équipements dont 1,5 milliards de réfrigérateurs domestiques.

Tableau 4-1 Estimation du parc mondial des équipements

Secteur	Durée de vie (ans)	Parc mondial estimé
Froid domestique	15	1 500 000 000
Froid commercial	12	35 000 000
Unités de condensation		
Froid commercial	7	55 000 000
Machines autonomes		
Froid commercial	10	300 000
Systèmes centralisés		
Systèmes industriels (IAA et autres) hors groupes refroidisseurs d'eau (GRE)	30	150 000
Transport réfrigérés routiers	10	2 000 000
Containers réfrigérés	10	1 200 000
Climatisation air / air	10	600 000 000
Pompe à chaleur (y compris chauffe-eau)	12	7 000 000
GRE centrifuges	30	170 000
GRE volumétriques	20	2 600 000
Climatisation automobile	10	500 000 000
Total		2 700 000 000

Selon les secteurs, les changements de fluides frigorigènes donnent lieu à des renouvellements d'équipements un peu accéléré du fait de l'arrêt de production d'une catégorie de molécules. Un équipement converti vers un nouveau fluide dont les propriétés thermodynamiques et d'usage (incluant la sécurité) sont très proches de l'ancien fluide permet de prolonger son fonctionnement sur sa durée de vie usuelle.

4.2 Origine du choix des CFC et des HCFC comme fluides frigorigènes

Le CFC-12 a été inventé vers 1930, par Midgley pour remplacer le propane et le SO₂ dans les réfrigérateurs domestiques pour disposer d'un fluide frigorigène ni inflammable, ni toxique. Ce fluide a progressivement remplacé : le propane, le SO₂ et le CO₂ dans différentes applications frigorifiques.

Le HCFC-22 a été inventé dans les années 50 pour disposer d'une molécule disposant d'une capacité volumétrique supérieure à celle du CFC-12 et, en fait, proche de celle de l'ammoniac. Enfin, différentes molécules, comme le CFC-11, ont été inventées pour d'autres usages que les applications frigorifiques comme solvants ou comme agents d'expansion des mousses d'isolation.

4.3 Des chlorofluorocarbones (CFC) aux hydrofluorocarbones (HFC)

Le trou d'ozone

Dès 1970, à la suite des études menées par la NOAA aux Etats-Unis pour analyser les éventuelles perturbations causées par l'avion supersonique Concorde dans la stratosphère, des teneurs en CFC-11 non négligeables ont été mises en évidence. A la fin des années 80, le trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique a été découvert, dont l'analyse sur une dizaine d'années a montré le rôle de destruction catalytique de l'ozone (O₃) par l'oxyde de chlore (ClO) qui provient de la destruction des CFC par les UV « durs » rencontrés à ces altitudes (entre 10 et 50 km). Le trou constaté à la fin de l'hiver austral est lié à l'absence de soleil pendant de longs mois, qui empêche la création d'ozone et engendre ainsi un manque très significatif et vérifiable d'ozone dans cette zone antarctique, qui est relativement isolée du reste de l'atmosphère terrestre, du fait du continent antarctique lui-même et ce, contrairement au pôle Nord où il n'y a pas de masse terrestre aussi significative.

Le Protocole de Montréal

Ces analyses menées progressivement ont donné lieu à quelques controverses, mais le consensus scientifique et politique s'est fait à la conférence de Vienne en 1985. Ensuite, le Protocole de Montréal (1987) a mis en place un calendrier mondial d'arrêt de production et de commercialisation des CFC pour le 1^{er} janvier 1995 pour les pays développés et 10 ans plus tard pour les pays en développement (dit de l'Article 5 du Protocole de Montréal). Un calendrier d'arrêt de production et de commercialisation des HCFC s'est ensuite mis en place avec une date d'arrêt de décembre 2010 pour les pays développés, l'Europe ayant pris des mesures d'interdiction d'usage dès 2000. Ce calendrier d'arrêt des HCFC est en cours de mise en œuvre pour les pays de l'article 5, avec un calendrier d'arrêt complet (sauf maintenance 2,5 %) en 2030.

La décision XIX/6, des parties au protocole de septembre 2007, fixe le tableau de réduction suivant pour les pays de l'Article 5 pour le niveau de consommation de 2013.

Tableau 4.2 Calendrier de réduction de la production et de la commercialisation des HCFC pour les pays de l'Article 5

Réduction	Date
-10 %	31/12/2015
-35 %	31/12/2020
-67,5 %	31/12/2025
Recharge en maintenance	2,5 % pour 2030 à 2040

Pour les principaux CFC (chloro-fluoro-carbures), le tableau 4.3 donne les domaines d'application historiques de ces fluides.

Tableau 4.3 Domaines d'application des CFC

CFC commercialisé	Domaine d'application
CFC-12	Froid domestique, petit froid commercial, transports frigorifiques, climatisation automobile, chillers centrifuges
CFC-11	Chillers centrifuges
CFC-114	Pompes à chaleur industrielles, sous-marins
R-502 (HCFC-22/115 48,8/51,2)	Froid commercial

Le tableau 4.4 donne les domaines d'application pour les principaux HCFC (Hydro-chloro-fluoro-carbures). Pour les deux types de molécules, les applications de niche ne sont pas précisées.

Tableau 4.4 Domaines d'application des HCFC

HCFC commercialisé	Domaine d'application
HCFC-22	Climatisation à air, chillers volumétriques, froid commercial, froid industriel, transports frigorifiques
HCFC-142b	Pompes à chaleur industrielles

A partir de l'application du Protocole de Montréal, les HFC ont remplacé aussi bien les CFC que les HCFC tout en étant en concurrence avec les hydrocarbures, l'ammoniac et le CO₂. Comme on le sait, les HFC sont devenus dominants de 1992 à maintenant et leur GWP est la cause des limitations, puis des interdictions d'usage à venir.

Le tableau 4.5 précise quels HFC se substituent aux molécules interdites de production. Là aussi, nous ne rentrons pas dans les détails des mélanges intermédiaires qui ont remplacé les CFC et qui contenaient des HCFC.

Tableau 4.5 Principaux HFC ayant remplacés les CFC et les HCFC

Molécules interdites par le Protocole de Montréal	HFC de remplacement
CFC-12	HFC-134a
R-502 (HCFC-22/115 48,8/51,2)	R-404A (R-125/143a/134a - 44/52/4) R-507A (R-125/143a - 50/50)
HCFC-22	R-404A (R-125/143a/134a - 44/52/4) R-410A (HFC-32/125 - 50/50) R-407C (HFC-32/125/134a - 23/25/52)

Nous sommes volontairement restés sur les fluides les plus utilisés qui représentent 90 % du marché, ce qui indique que la multiplicité des options proposées à un moment donné se simplifiera pour des raisons de standardisation associées à la production de masse de la plupart des équipements frigorifiques et de climatisation. Note : dans la suite de ce chapitre, les fluides frigorigènes sont présentés sous forme de fiches synthétiques inspirées des fiches du rapport TEAP 2013.

HCFC-22	
Caractéristiques principales	ODP : 0,05 GWP : 1790 $T_{\text{critique}} = 96\text{ °C}$ Point normal d'ébullition : $-40,8\text{ °C}$
Etendue de commercialisation	Le fluide le plus utilisé dans le monde aussi bien dans le froid commercial, les procédés industriels que surtout dans les systèmes de climatisation air/air. La banque de ce fluide peut être estimée à 1,6 millions de tonnes pour le monde.
Efficacité énergétique (avec prise en compte des conditions ambiantes)	L'efficacité énergétique de ce fluide a servi de référence pour la validation de ses remplaçants : le R-404A en froid commercial et industriel et les R-407C et R-410A en climatisation. La puissance frigorifique volumétrique du R-407C est identique à celle du HCFC-22, celle du R-404A est 10 % supérieure, celle du R-410A, 20 %. Les COP de ses successeurs sont du même ordre de grandeur que celui du HCFC-22.
Coûts, rentabilité (par rapport à une référence)	Le prix de ce fluide varie selon le pays. En raison de son arrêt de production dans les pays développés, son prix en tant que fluide de maintenance peut être localement élevé (de 30 à 50 €/kg) dans les années qui viennent. En Europe, le HCFC-22 sera interdit en maintenance au 1 ^{er} janvier 2015.
Obstacles et restrictions	L'obstacle est tout simplement l'arrêt de production programmé.

HFC-134a	
Caractéristiques principales	GWP : 1370 $T_{\text{critique}} = 101\text{ °C}$ Point normal d'ébullition : -26 °C
Etendue de commercialisation	Ce fluide est le HFC le plus utilisé du fait de son utilisation massive en climatisation automobile. Sa banque en 2012 est évaluée à 1,2 millions de tonnes dans le monde.
Efficacité énergétique (avec prise en compte des conditions ambiantes)	Le HFC-134a sert de référence pour ses remplaçants pour les différentes applications où il a été utilisé ou où il est encore utilisé essentiellement le froid domestique, les groupes refroidisseurs d'eau centrifuge et à vis, le petit froid commercial et la climatisation automobile.
Coûts, rentabilité (par rapport à une référence)	Le prix de ce fluide est de l'ordre de 12 à 15 €/kg. On peut d'ailleurs dire que dès sa production initiale, en 1994, il a déjà été en « surproduction » donc un prix de type commodité assez rapidement.
Obstacles et restrictions (sécurité, efficacité énergétique etc.)	Le premier obstacle est bien sûr le fait qu'il est interdit d'utilisation en climatisation automobile pour les plateformes neuves depuis le 1 ^{er} janvier 2011, même si l'application effective commence juste depuis le 2 ^{ème} semestre 2013. C'est un fluide encore largement utilisé dans le monde dans les applications présentées ci-dessus. Son avenir est compté sans que la date de fin de production soit énoncée.

R-407C (HFC-32/125/134a - 23/25/52)	
Caractéristiques principales	GWP : 1700 $T_{\text{critique}} = 86^{\circ}\text{C}$ Point normal d'ébullition : $-43,6^{\circ}\text{C}$ Le R-407C a été conçu pour remplacer strictement le HCFC-22 avec la même puissance volumétrique. En changeant le détendeur et en passant d'une huile Alkylbenzène utilisée pour le HCFC-22 à une huile POE adaptée aux HFC, le retrofit du HCFC-22 vers le R-407C est possible. Son problème principal est son glissement de température lors de la condensation et l'évaporation (5°C) et son changement de formulation en cas de fuite.
Etendue de commercialisation	Le R-407C est utilisé en froid commercial de petite et moyenne puissances et dans les systèmes de climatisation de type roof-top ; ceci surtout dans la période intermédiaire où les compresseurs conçus pour le HCFC-22 étaient plus disponibles que ceux conçus pour le R-410A ou le R-404A. La banque, au niveau mondial, est estimée à 90 000 tonnes.
Efficacité énergétique (avec prise en compte des conditions ambiantes)	L'efficacité énergétique est similaire à celle du HCFC-22, même si des adaptations sont à effectuer. Par contre, en froid négatif, le givre se forme plus vite du fait d'une température d'évaporation commençante inférieure.
Coûts, rentabilité (par rapport à une référence)	Le prix de ce fluide est de l'ordre de 18 à 20 €/kg. C'est un fluide de sécurité A1.
Obstacles et restrictions (sécurité, efficacité énergétique, etc.)	Ce fluide a un GWP qui ne l'élimine pas immédiatement, mais il n'est pas voué à un long usage et il est supplanté par le R-404A d'un côté et par le R-410A de l'autre.

R-404A (R-125/143a/134a - 44/52/4) R-507A (R-125/143a- 50/50)	
R-404A GWP : 3700, $T_{\text{critique}} = 72^{\circ}\text{C}$ Point normal d'ébullition : $-46,2^{\circ}\text{C}$ R-507A GWP : 3800, $T_{\text{critique}} = 70,6^{\circ}\text{C}$ Point normal d'ébullition : $-46,7^{\circ}\text{C}$	
Caractéristiques principales	Ces deux fluides sont très proches et en fait le R-404A est la réponse de deux fabricants de fluides au brevet d'un troisième portant sur le R-507A. En fait, le R-507A est un mélange azéotrope et se comporte donc comme un corps pur ; il avait a priori un très gros avantage dans la compétition, mais c'est la force commerciale qui l'a emporté et le marché a été dominé par le R-404A. Ces deux fluides ont été conçus pour remplacer le R-502 et le HCFC-22 en froid commercial et industriel.
Etendue de commercialisation	La banque de R-404A est évaluée, pour 2012 dans le monde, à 250 000 tonnes et à 33 000 t pour le R-507A.
Efficacité énergétique (avec prise en compte des conditions ambiantes)	Ces deux fluides ont des efficacités énergétiques comparables au HCFC-22 mais inférieures à celle du R-502, auquel d'ailleurs plus personne ne se réfère.
Coûts, rentabilité (par rapport à une référence)	Le prix de ces fluides (de 15 à 20 €/kg) a baissé ces dernières années, et ce, associé à leur interdiction prévisible par la future réglementation européenne.
Obstacles et restrictions (sécurité, efficacité énergétique, etc.)	Les principaux obstacles sont à venir ; ils seront interdits de commercialisation dans la future réglementation européenne.

R-410A (HFC-32 / 125 - 50/50)	
Caractéristiques principales	GWP : 2100, Tcritique : 71,4 °C Point normal d'ébullition : -51,4 °C Ce fluide massivement utilisé en climatisation à air pour les unités split et aussi pour les unités centralisées, typiques des USA, présente le grand avantage d'avoir une puissance volumétrique élevée, et de là peut être utilisé avec des compresseurs scroll compacts. On doit noter que sa température critique est seulement de 71 °C, ce qui n'est pas des plus favorables pour les climats chauds.
Etendue de commercialisation	Le R-410A a vu son marché grandir rapidement mais les USA ont maintenu l'usage du HCFC-22 jusqu'à la « dernière minute » (fin 2010) en climatisation à air. Il en résulte une banque de l'ordre de 80 000 tonnes dans le monde en 2012.
Efficacité énergétique (avec prise en compte des conditions ambiantes)	L'efficacité énergétique en conditions climatiques, jusqu'à des températures de condensation de 40 °C, est légèrement supérieure à celles obtenues avec le HCFC-22. Au-delà, et surtout à partir de 55 °C de température de condensation, les performances énergétiques se dégradent.
Coûts, rentabilité (par rapport à une référence)	Le prix de ce fluide se situe entre 18 et 20 €/kg.
Obstacles et restrictions (sécurité, efficacité énergétique etc.)	Le R-410A n'a pas encore de remplaçant clairement identifié et son GWP sert de seuil pour les molécules interdites de commercialisation dans la nouvelle réglementation européenne.

4.4 Le renouveau des fluides frigorigènes Hydrocarbures, Ammoniac et CO₂

Cette section présente rapidement les éléments marquants pour chaque fluide et les fiches synthétiques sont introduites pour chaque fluide ou famille de fluides quand c'est plus pertinent.

Les hydrocarbures (HC)

Dès l'introduction du HFC-134a est né, en Europe surtout, un mouvement de défiance envers les fluides HFC visant à remplacer les CFC et HCFC. L'organisation Green Peace, en particulier, a mis en avant le remplacement du R-12 par des hydrocarbures. Ce mouvement a amené, en très peu d'années, les leaders européens du froid domestique (Bosch Siemens, AEG, Electrolux) à passer progressivement leur production à l'isobutane (R-600a). La charge d'isobutane étant faible (entre 20 et 70 g) et le design de l'évaporateur ayant été repris, les conditions de sécurité ont été considérées (et le sont toujours) comme acceptables. Les seuls incidents notables qui ont été rapportés concernent des incidents à la charge en usine.

En petit froid commercial, le propane est essentiellement utilisé pour des puissances variables de 300 W frigorifique à 5 kW. On trouvera des systèmes dont la charge varie de 50 g à 1,5 kg. Plus la charge est faible, plus la commercialisation de ces systèmes est significative.

On trouve aussi des pompes à chaleur air/eau utilisant du propane et de petits systèmes de climatisation dits « portables ». A noter que les pompes à chaleur air/eau peuvent avoir leur système thermodynamique contenant le R-290 entièrement à l'extérieur de la maison individuelle et la chaleur est transférée à l'intérieur de la maison par un circuit à eau glycolée.

Hydrocarbures (HCs) HC 600a isobutane HC-290 Propane HC-1270 Propylène	HC-600a GWP 4, $T_{\text{critique}} = 134,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Point normal d'ébullition : $-11,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ HC-290 GWP 5, $T_{\text{critique}} = 96,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Point normal d'ébullition : $-42,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ HC-1270 GWP 2, $T_{\text{critique}} = 91,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Point normal d'ébullition : $-47,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Caractéristiques principales	Les hydrocarbures (HCs) incluent trois principaux fluides frigorigènes purs, HC-290 (le propane), HC-1270 (le propylène) et HC-600a (l'isobutane) et quelques mélanges de fluides comme les R-433A, R-433B, R-433C, R-441A et R-443A, où certains peuvent contenir du HC-170 (l'éthane). Les fluides purs et les mélanges présentent une classification de sécurité A3 (toxicité basse, inflammabilité élevée), leur ODP est nul et leur GWP varie de 1,8 à 5,5 (WMO, 2010). Les HC ont des propriétés thermophysiques et de transport excellentes.
Etendue de commercialisation	Les fluides purs (R-600a et R-290 principalement) ont été utilisés commercialement dès 1992 ; les mélanges, comme le R-436A et le R-436B, ont un développement commercial faible. La commercialisation à grande échelle des hydrocarbures est limitée du fait des restrictions d'usages définies par les normes de sécurité (EN378 ou ASHRAE 15) dans les espaces occupés.
Efficacité énergétique (avec prise en compte des conditions ambiantes)	Généralement, l'efficacité est avérée bonne dans la plupart des conditions. En principe, ils présentent des propriétés thermophysiques qui conduisent à une efficacité énergétique au moins égale à celle des HFC et des températures de refoulement basses.
Coûts, rentabilité (par rapport à une référence)	Le prix de ces fluides est faible, de 8 à 10 €/kg. En raison de la classification de sécurité, des coûts supplémentaires existent pour traiter les caractéristiques d'inflammabilité dans la conception de l'équipement. L'impact de l'inflammabilité sur le coût global peut varier considérablement selon le type d'équipement. Les valeurs de coût-efficacité sont incluses dans les rapports du TEAP (UNEP, 2011; UNEP, 2012)
Obstacles et restrictions (sécurité, efficacité énergétique etc.)	Les principaux obstacles de l'utilisation des HC résultent de leur inflammabilité. Concrètement, cela signifie que les systèmes utilisés à l'intérieur de locaux occupés auront une charge en fluide frigorigène limitée. De plus, quand il n'existe pas d'effet de série, des composants comme les compresseurs peuvent ne pas être disponibles commercialement avec garantie. Les techniciens doivent être bien formés et compétents dans la gestion des HC. Les codes de sécurité de certains bâtiments interdisent l'utilisation de fluides frigorigènes inflammables. Une évaluation complète des obstacles à l'utilisation des hydrocarbures et les autres fluides frigorigènes à faible GWP est accessible dans un rapport de l'UNEP (Colbourne, 2010).

L'ammoniac

L'ammoniac est le premier fluide frigorigène utilisé commercialement en 1858 sur un bateau frigorifique. La machine à absorption eau –ammoniac a été conçue par Ferdinand Carré. En 1872, la première machine à compression de vapeur développée par Boyle utilise l'ammoniac. Ce fluide a accompagné tous les développements de la réfrigération. L'ammoniac est produit en masse comme composant de base pour les engrais, c'est une molécule qui est donc à coût acceptable. Il est modérément inflammable mais il est surtout toxique dès 50 ppm, ce qui limite de fait son usage à un environnement industriel. L'ammoniac est très utilisé dans les procédés agro-alimentaires, y compris aux Etats-Unis.

Ammoniac NH ₃	R-717
Caractéristiques principales	GWP : 0, T _{critique} : 132,3 °C Point normal d'ébullition : -33 °C Le R-717 (ammoniac) est un fluide pur, sa classification de sécurité est B2 (toxique, peu inflammable) ODP = 0.
Commercialisation	Le R-717 est utilisé depuis le XIXème siècle dès le début de la réfrigération, il est toujours utilisé fortement en froid industriel agro-alimentaire et depuis 1990 son utilisation s'est élargie pour les groupes refroidisseurs d'eau de puissance moyenne (1 centaine en Europe) et dans de rares systèmes de froid commercial centralisé via des frigoporteurs (4 à 5)
Efficacité énergétique	Le R-717 présente des propriétés thermodynamiques favorables pour les températures d'évaporation supérieures à -33 °C et sinon requiert le passage à des systèmes bi-étagés. Sa puissance volumétrique est similaire à celle du HCFC-22. Cependant, ses températures de refoulement sont relativement plus élevées.
Coûts	Le coût de l'ammoniac lui-même est faible (5 €/kg). Cependant, l'impossibilité d'utiliser du cuivre entraîne un surcoût important et des surfaces d'échange plus grandes (toutes choses égales par ailleurs). Ces surcoûts pénalisent surtout les systèmes de petites et moyennes puissances, jusqu'à 200 kW frigorifique, typiquement
Barrières et restrictions d'usage	Les barrières portent sur la faible disponibilité des composants pour les faibles puissances. La nécessaire formation spécifique des techniciens pour maintenir, charger et récupérer ce fluide. La toxicité de l'ammoniac amène obligatoirement à l'usage de systèmes indirects en froid commercial avec une salle des machines spécifiquement conçue pour l'ammoniac. L'ammoniac en tant que substance est classé sous la rubrique Seveso en Europe (rubrique 1136 du code de l'environnement), ce qui entraîne l'obligation de déclaration (charges comprises entre 150 kg et 1,5 tonnes) et d'autorisation pour les charges > 1,5 t.

Le CO₂

Le CO₂ est utilisé lui aussi depuis le début du 20^{ème} siècle dans les systèmes frigorifiques. Contrairement à l'ammoniac, son usage avait disparu dès les années 50 compte tenu du niveau de pression très élevé. Sa réutilisation s'est effectuée à partir des années 95 sous l'impulsion de Lorentzen, qui a proposé et breveté un échangeur de type « liquide vapeur » entre l'aspiration du compresseur et la sortie du refroidisseur de gaz, mais qui, du fait de l'état supercritique du CO₂ au-dessus de 31 °C, est en fait un échangeur vapeur / gaz dense. L'évènement majeur a été le développement, au Japon, du programme EcoCute où les caractéristiques du CO₂ permettent de réaliser une pompe à chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) avec des COP moyens annuels de l'ordre de 3,5 à 4.

Son usage en froid commercial se répand en Europe, en particulier dans les supermarchés en mode transcritique et en hypermarchés en cascade CO₂ à la basse température et autre fluide (HFC-134a par exemple) à la moyenne température.

CO ₂	R-744 (dioxyde de carbone)
Caractéristiques principales	Classification de sécurité : A1 ODP : 0 ; GWP : 1. T _{critique} : 31 °C ; P _{critique} : 73,7 bar ; T _{pt triple} : -56 °C
Commercialisation	Le R-744 a été utilisé dans les machines frigorifiques entre les années 1900 et 1930 avant d'être remplacé par les CFC. Son utilisation a été revisitée dès 1995 et il est maintenant utilisé en froid commercial, réfrigération agro-alimentaire, pompes à chaleur pour ECS et les transports frigorifiques.
Efficacité énergétique (avec prise en compte des conditions ambiantes)	Le R-744 présente des propriétés thermophysiques conduisant à des COP raisonnables pour des températures de condensation < 25 °C. La pression de fonctionnement est considérablement supérieure à celles des réfrigérants usuels et la capacité volumétrique est aussi élevée. Son usage en cascade, où il est utilisée à la basse température (évaporation entre -30 et -40 °C) et condensation à -10 °C par un autre fluide frigorigène, donne d'excellentes performances énergétiques ; c'est une solution adoptée en froid commercial centralisé et en froid industriel. En cycle transcritique (T condensation > 31 °C) il y a réduction de l'efficacité énergétique et ce d'autant que la température ambiante est élevée (T _{extérieure} > 25 °C). Pour une température ambiante de 35 °C, l'efficacité d'un cycle de base est inférieure de 40 à 50 % à celle du R-404A. Une amélioration de 10 à 20 % par rapport à un cycle de base est possible en substituant le détenteur par un éjecteur (Hafner et al. 2012). D'autres dispositifs peuvent améliorer l'efficacité pour les conditions ambiantes élevées : système bi-étagé, sous-refroidissement additionnel. Les températures de refoulement élevées doivent être prises en compte à la conception.
Coûts, rentabilité (par rapport aux HFC)	Le coût du fluide de travail est bas, typiquement de 3 à 5 €/kg. Cependant, et vue la pression de fonctionnement élevée, le choix des matériaux et les épaisseurs impliquent des coûts supplémentaires surtout pour les compresseurs. Cependant, les dimensions des tubes sont plus petites comparées aux technologies actuelles, ce qui donne l'avantage de compacité de tubes et de matériaux d'isolation. Les dispositifs nécessaires pour améliorer l'efficacité à des températures ambiantes élevées entraînent une augmentation du coût de l'ordre de 15 à 20 %.
Obstacles et restrictions	Deux obstacles technologiques majeurs sont identifiés, la conception des composants et du système pour des conditions de pression élevées et la dégradation des performances pour de hautes températures ambiantes conduisent à des augmentations des coûts. En outre et en raison de ses caractéristiques inhabituelles, les techniciens auront besoin de formations et d'outillages dédiés.

4.5 Les hydrofluorocarbures insaturés (dits HFO)

Les HFO (hydro-fluoro-oléfines) sont des HFC insaturés car ils comportent tous une double liaison éthylénique, comme indiqué figure 4.1. La dénomination HFO est souvent utilisée pour disposer d'une dénomination différenciante vis-à-vis des HFC saturés dont le GWP est élevé. Scientifiquement il est plus approprié de les appeler HFC insaturés.

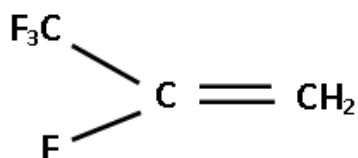


Figure 4.1 Structure du R-1234yf

Cette double liaison s'ouvre facilement en présence du radical oxhydryle très abondant dans l'atmosphère d'où la destruction extrêmement rapide de ce type de molécule dans l'atmosphère, avec des durées de vie de l'ordre de 10 à 15 jours et donc des GWP très faibles.

HFO-1234yf	
Caractéristiques principales	GWP : 4 T_{critique} : 94,7 °C Point normal d'ébullition : -29,5 °C Le HFO-1234yf est un fluide pur qui peut remplacer le HFC-134a dans les mêmes systèmes car les caractéristiques pression-température sont quasi identiques. Il est classé A2L non toxique et très faiblement inflammable selon Ashrae 34,
Commercialisation	La production du R-1234yf a été limitée jusqu'en mi-2013 où sa production à l'échelle industrielle a commencé,
Efficacité énergétique (avec prise en compte des conditions ambiantes)	Ce fluide frigorigène présente des efficacités comparables au HFC-134a, même si le COP théorique est de quelques pourcents inférieurs à celui du HFC-134a.
Coûts, rentabilité (par rapport à une référence)	Etant une nouvelle molécule qui nécessite un procédé de production complexe, ce fluide frigorigène présente actuellement des prix nettement plus élevés que ceux du HFC-134a (de l'ordre de 30 à 50 €/kg).
Obstacles et restrictions (sécurité, efficacité énergétique etc.)	Les principaux obstacles sont liés à l'utilisation sûre d'un fluide frigorigène à faible inflammabilité (A2L selon ASHRAE 34). Les normes comme EN-378 et IEC-60335-2-40 sont mises jour pour tenir compte d'une faible inflammabilité. Concrètement, ceci signifie que les systèmes installés à l'intérieur des bâtiments avec des charges élevées avec ce fluide frigorigène sont souvent interdits. Les techniciens devront être bien formés et compétents dans la gestion des fluides frigorigènes, même faiblement inflammables. Des préoccupations ont été énoncées sur le produit associé à la décomposition de ce produit dans l'atmosphère, le TFA (Trifluoroacetic acid). Une étude japonaise (Kajira 2010) montre que les quantités maximales imaginables de TFA n'auront pas d'impacts sur l'environnement aquatique.

HFO-1234ze(E)	
Caractéristiques principales	GWP : 6 T_{critique} : 109,4 °C Point normal d'ébullition : -19 °C Le HFC-1234ze(E) est un fluide frigorigène pur qui peut remplacer le HFC-134a dans les nouveaux équipements où sa capacité volumétrique faible pourrait être considérée dans leur conception. Il est classé en A2L selon FDIS ISO 817 (faible toxicité, faible inflammabilité).
Commercialisation	Ce fluide frigorigène est déjà produit à une échelle commerciale, en tant qu'agent d'expansion des mousses d'isolation.
Efficacité énergétique (avec prise en compte des conditions ambiantes)	Quand ce fluide frigorigène est utilisé dans les compresseurs scroll ou à pistons, il présente des rendements comparables au HFC-134a. La même huile POE peut être utilisée.
Coûts, rentabilité (par rapport à une référence)	Etant une nouvelle molécule, ce fluide frigorigène présente des coûts élevés comparé au HFC-134a. Ceci est principalement dû à son procédé de fabrication différent. De l'ordre de 30 à 40 €/kg
Obstacles et restrictions (sécurité, efficacité énergétique etc.)	Les principaux obstacles sont liés à l'utilisation sûre d'un fluide frigorigène à faible inflammabilité (A2L selon FDIS ISO 817). Les normes comme ISO-5149 et IEC-60335-2-40 sont mises à jour pour tenir compte des exigences moins strictes pour cette nouvelle classe. Concrètement, ceci signifie que les systèmes installés à l'intérieur des bâtiments avec des charges élevées en fluide frigorigène sont souvent interdits. De même, en raison de l'incertitude sur la future adoption de ce fluide frigorigène, il y aura des lacunes dans les différents composants, y compris le compresseur. En outre, les techniciens devront être bien formés et compétents dans la gestion des fluides frigorigènes inflammables où l'inflammabilité est un élément clé de la sécurité. Certaines normes de bâtiments pourront interdire l'utilisation de fluides frigorigènes inflammables. Les mêmes préoccupations sur la quantité de TFA produites lors de la décomposition de ce fluide frigorigène dans l'atmosphère ont été émises, la réponse donnée pour le R-1234yf vaut bien sûr pour ce fluide, à savoir que le niveau de TFA maximal imaginable est bien inférieur aux seuils entraînant des problèmes pour les écosystèmes marins.

A noter que du fait de cette courte durée de vie associée à la double liaison éthylénique, un HCFO contenant donc un atome chlore, le R-1233zd, est maintenant commercialisé comme agent d'expansion des mousses d'isolation et constitue un très bon fluide frigorigène de remplacement du HCFC-123 pour les groupes refroidisseurs d'eau centrifuges.

HCFO-1233zd(E)	
Caractéristiques principales	GWP : 6 $T_{\text{critique}} = 165,6^{\circ}\text{C}$ Point normal d'ébullition : $+ 18,3^{\circ}\text{C}$ Le HCFC-1233zd(E) est un fluide frigorigène pur qui réduit considérablement l'impact environnemental direct. Ce fluide frigorigène est soumis à la classification ASHRAE 34 et est classé en A1 (faible toxicité, non inflammable) selon ISO 817.
Etendue de commercialisation	Ce fluide frigorigène est déjà produit à une échelle commerciale comme solvant et agent d'expansion. Il est prévu que ce fluide frigorigène sera disponible à la demande du marché.
Efficacité énergétique (avec prise en compte des conditions ambiantes)	En l'utilisant dans les compresseurs centrifuges, ce fluide frigorigène présente des rendements légèrement supérieurs à ceux obtenus avec le HCFC-123, ce qui permet la conception de systèmes plus efficace énergétiquement.
Coûts, rentabilité (par rapport à un étalon)	Etant une nouvelle molécule, ce fluide frigorigène présente des coûts supérieurs à ceux du HCFC-123. Ce coût sera modéré et aura un temps de retour raisonnable en raison de l'efficacité énergétique élevée qui diminuera les dépenses de l'utilisateur final. De l'ordre de 30 à 40 €/kg
Obstacles et restrictions (sécurité, efficacité énergétique etc.)	Etant un fluide non inflammable, ce fluide frigorigène est sur voie rapide d'adoption. Son appellation de type R-nombre est attendue en 2013. Les mêmes préoccupations sur la quantité de TFA produites lors de la décomposition de ce fluide frigorigène dans l'atmosphère ont été émises, la réponse donnée pour le R-1234yf vaut bien sûr pour ce fluide, à savoir que le niveau de TFA maximal imaginable est bien inférieur aux seuils entraînant des problèmes pour les écosystèmes marins.

4.6 Les HFC à GWP < 750

HFC-152a	
Caractéristiques principales	GWP : 133 T_{critique} : 113,3 °C Point normal d'ébullition : -24 °C Le HFC-152a est un fluide frigorigène pur qui a été utilisé depuis très longtemps dans un mélange azéotrope le R-500 (R-12/152a 73,8/26,2) qui permettait de faire fonctionner des systèmes conçus pour des moto-compresseurs 60 Hz en 50 Hz car le R-500 dispose d'une puissance volumétrique supérieure de 20 % à celle du R-12. Ce mélange a bien sûr été abandonné dans les années 90 avec la mise en place du Protocole de Montréal. Le HFC-152a a été évalué comme fluide pur dans les années 90 pour remplacer le R-12 en froid domestique mais n'a pas été utilisé. Il a surtout été évalué dans les années 2000 comme remplaçant du HFC-134a en climatisation automobile et son GWP < 150 a servi en fait de référence à la Directive 40/2006. Il est classé 2 pour l'inflammabilité car sa vitesse fondamentale de flamme de 23 cm/s le situe au-dessus du seuil de 10 cm/s qui définit la classe 2L. Il est un des composants des mélanges à faible GWP.
Etendue de commercialisation	Le HFC-152a est très utilisé, comme dans les boîtiers aérosols, car il a de très bonnes propriétés de solvation et qu'il est moins inflammable que les hydrocarbures.
Efficacité énergétique (avec prise en compte des conditions ambiantes)	L'efficacité énergétique du HFC-152a est proche de celle du HFC-134a en climatisation automobile et en froid domestique mais des adaptations doivent être effectuées pour tenir compte d'une pression d'évaporation inférieure à celle du HFC-134a. Les résultats d'essais ne concernent que des systèmes prototypes du fait de l'absence de références commercialisées.
Coûts, rentabilité (par rapport à une référence)	Le coût direct de ce fluide frigorigène est du même ordre de grandeur que celui du HFC-134a. C'est une molécule produite en Chine qui ne pose pas de difficulté de fabrication particulière.
Obstacles et restrictions (sécurité, efficacité énergétique etc.)	Les contraintes principales sont liées à l'utilisation sûre d'un fluide frigorigène inflammable (classe 2). A priori ses utilisations futures plausibles sont dans des mélanges à faible GWP.

HFC-32	
Caractéristiques principales	GWP : 716 $T_{\text{critique}} = 78,1\text{ °C}$ Point normal d'ébullition : $-51,7\text{ °C}$ Le HFC-32 est un fluide frigorigène utilisé comme composant du R-410A (50 % HFC-32 et 50 % HFC-125) mais aussi du R-407C (HFC-32/ 125/134a 23/25/52) et de tous les différents R-407. Son GWP présente une réduction significative par rapport au R-410A, au HCFC-22 ou au R-407C. La pression et la puissance volumétrique sont 1,5 fois supérieures à celles développées par le HCFC-22 et 10 % supérieure à celle du R-410A. Il est classé 2L par l'Ashrae 34. Il fait aussi partie des composants des nouveaux mélanges à faible GWP. Sera-t-il utilisé comme fluide pur en remplacement du R-410A ? La réponse semble être oui en Asie du Sud-Est. La réglementation européenne le laissera-t-elle comme candidat de long terme ? C'est une question ouverte.
Commercialisation	Le HFC-32 étant composant du R-410A et du R-407C, il est produit en grande quantité ; sa disponibilité comme fluide pur n'est pas encore très répandue.
Efficacité énergétique (avec prise en compte des conditions ambiantes)	L'efficacité des systèmes au HFC-32 est similaire à celles des systèmes au R-410A et le COP des systèmes développés spécifiquement pour le HFC-32 est supérieur d'au moins 5 % comparativement au R-410A, spécialement pour les hautes températures de condensation. La charge en HFC-32 est inférieure à celle du R-410A du fait d'une masse volumique liquide plus faible. La viscosité du lubrifiant (POE ou PVE) doit être adaptée aux conditions de fonctionnement. Le HFC-32 présente des propriétés de transfert de chaleur et de transport supérieures à celle du R-410A. La température de refoulement est élevée comparée au R-410A, ce qui peut amener à mettre en œuvre des dispositifs de refroidissement spécifiques.
Coûts, rentabilité (par rapport à une référence)	Le coût direct de ce fluide frigorigène est inférieur à celui du R-410A. Les dispositifs de contrôle pourront ajouter un coût supplémentaire.
Obstacles et restrictions (sécurité, efficacité énergétique etc.)	Les contraintes principales sont liées à l'utilisation sûre d'un fluide frigorigène à faible inflammabilité (2L selon Ashrae 34).

4.7 Les mélanges de HFO et de HFC

Les changements de fluides frigorigènes, passage des CFC aux HFC ou HCFC, puis passage des HCFC (principalement le HCFC-22), aux HFC ont amené à une offre de mélanges de transition qui, par définition, ne vivent qu'un temps limité, celui de la prolongation de la vie d'installations dont l'amortissement justifiait l'opération de retrofit.

Le passage de fluides à fort GWP vers des fluides à bas GWP se fait dans un contexte réglementaire incertain, personne ne définissant ce qui sera fort et ce qui sera faible sur le long terme, les très nombreux fluides candidats au remplacement du R-410A, du R-404A et du HCFC-22, sont présentés successivement par rapport aux fluides qu'ils remplacent.

Note : Il existe des fluides de remplacement intermédiaire pour le HFC-134a que nous ne présentons pas étant donné que le R-1234yf d'une part et le R-1234ze d'autre part sont des candidats bien établis au remplacement du HFC-134a et que leur GWP respectifs de 4 et de 6 font que les autres candidats apparaissent comme de court terme.

Candidats au remplacement du R-410A

Les données de puissances volumétriques et de COP sont basées sur AHRI Test report n°1, mesurées sur un groupe refroidisseur d'eau volumétrique air/eau ; les calculs de TC et TNe sont effectués à partir de Refprop 9.0, les calculs de GWP à partir des données OMN 2010.

Tableau 4.6 Caractéristiques de fluides candidats au remplacement du R-410A

Dénomination commerciale	Composants et compositions	GWP	T critique et T normale d'ébullition (glissement)	Puissance volumétrique relative au R-410A	COP relatif au COP R-410A
R-410A	(R32/125) 50 /50	2100	TC = 71,4 °C TNe = -51,4 °C	1	1
ARM-32	HFC-32/125/134a/1234yf 25/30/25/20	1579	Tc = 83,3 °C TNe= -42 °C (-39/-45 °C)	1.08	0,98
ARM-70	HFC-32/134a/1234yf 50/10/40	497	TC = 86,9 °C TNe= -43,5 °C (-41/-46 °C)	0,89	1,07
DR-5	HFC-32/1234yf 72,5/27,5	524	TC = 83,2 °C TNe = -47,5 °C (-45,6/-49,4 °C)	1,02	1,04
L-41a	HFC-32/1234yf/1234ze 73/15/12	524	TC = 81,8 °C TNe = -48°C (-46,2/-49,8 °C)	0,98	1,03
L-41b	HFC-32/1234ze 73/27	524	TC = 80,5 °C TNe= -48,2°C (-46,5/-50 °C)	0.96	1,04
HFC-32		716	TC = 86,9 °C TNe = -51,7 °C	1,12	0,98

En analysant le tableau 4.6, on constate que de nombreux candidats au remplacement du R-410A sont proposés et que :

- l'objectif est de remplacer le R-125 dont le GWP est de 3420
- tous les candidats contiennent du HFC-32, qui est indispensable à l'obtention d'une puissance volumétrique identique ou proche
- le mélange ARM-32 est un mélange de transition dont le GWP est supérieur à celui du HFC-134a
- le GWP des mélanges de remplacement se situe autour de 500,
- l'obtention d'une puissance volumétrique presque identique implique que la composition en HFC-32 soit d'au moins 70 %
- le HFC-32 amène une puissance volumétrique supérieure de 12 % comparativement au R-410A
- tous les mélanges présentent un glissement de température au changement de phase qui varie de 4 à 6 °C.

Note sur les mélanges à glissement de température : les fluides purs ou les mélanges azéotropes (série 500) se condensent ou s'évaporent à pression ET température constantes, les mélanges de la série 400 se condensent ou s'évaporent à pression constante ET température glissante, c'est-à-dire que la température de saturation liquide est inférieure à la température de saturation vapeur pour la même pression. Le R-410A est un proche azéotrope dont le glissement de température est de l'ordre de 0,1 °C alors que les mélanges candidats à son remplacement présentent des glissements de températures de plusieurs degrés Celsius. Le glissement de température peut avoir des avantages et des inconvénients. Dans les avantages : minimisation de l'écart de températures avec un fluide extérieur qui varie fortement de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur. Inconvénients : givrage plus précoce, difficulté de réglage de la surchauffe surtout lors d'un remplacement de fluide « drop-in ». Le glissement de température indique aussi, qu'en cas de fuite, le composant le plus volatil du mélange va s'échapper de manière préférentielle et que la formulation du mélange va changer.

Certaines des caractéristiques sont génériques. Pour tout ce qui concerne le COP, des travaux d'optimisation amènent à des améliorations de performances énergétiques. D'autre part, d'autres mesures sur d'autres équipements sont nécessaires pour établir un tableau comparatif plus complet. Mais les premiers ordres de grandeur sont là et le génie chimique propose des candidats dont les performances sont proches de celles du R-410A avec des GWP autour de 500.

Candidats au remplacement du R-404A

Les données de COP et de puissance volumétrique sont basées sur le rapport « AHRI Test report n°9 » sur groupe frigorifique d'un groupe frigorifique autonome de camion. Les calculs de TC et TNe sont effectués à partir de Refprop 9.0, les calculs de GWP à partir des données OMN 2010.

Tableau 4.7 Candidats au remplacement du R-404A

Dénomination commerciale	Composants et compositions	GWP	T critique et T normale d'ébullition (glissement)	Puissance frigorifique relative au R-404A à -29 °C	COP relatif au COP R-404A
R-404A	(R-125/143a/1340) 44 /52/4	3700	TC = 72 °C TNe = -46,2 °C	1	1
ARM-30a	HFC-32/1234yf 29/71	210	Tc = 90,2 °C TNe = -39 °C (-36,7/-41,4 °C)	0,81	0,89
DR-7	HFC-32/1234yf 36/64	259	TC = 89,2 °C TNe = -40,7 °C (-38,2/-43,2 °C)	1,02	1,07
L-40	HFC-32/152a/1234yf/1234ze 40/10/20/30	302	TC = 89,9 °C TNe = -40,8 °C (-37/-44,6 °C)	0,83	0,86

En analysant le tableau 4.7, on constate que les candidats au remplacement du R-404A présentent les caractéristiques suivantes :

- tous les candidats contiennent du HFC-32 et du R-1234yf
- le GWP des mélanges de remplacement du R-404A se situe entre 200 et 300,
- les températures critiques sont plus élevées et permettent aussi de remplacer le HCFC-22 en froid commercial
- tous les mélanges présentent un glissement de température au changement de phase qui varie de 4 à 7 °C, ce qui empêche ces fluides d'être utilisés dans les systèmes à recirculation par pompe et plus généralement dans les évaporateurs noyés, car ces mélanges vont alors distiller et les compositions changer en fonction de la durée de fonctionnement
- le DR-7 est formulé pour les plus basses températures d'évaporation et son COP est supérieur à celui du R-404A
- le L-40 et l'ARM-30a manquent de puissance frigorifique volumétrique à (-20 %) à basse température d'évaporation et haute température de condensation

- les écarts très sensibles de performances (COP et puissance frigorifique) entre l'ARM-30a et le DR7 paraissent surprenants en constatant que les composants sont identiques et les compositions très proches.

Candidats au remplacement du HCFC-22

Les données de COP et de puissance volumétrique sont basées sur le rapport « AHRI Test report n°6 » sur un chiller volumétrique air/eau. Les calculs de TC et TNe sont effectués à partir de Refprop 9.0, les calculs de GWP à partir des données OMN 2010.

Tableau 4.8 Candidats au remplacement du HCFC-22

Dénomination commerciale	Composants et compositions	GWP	T critique et T normale d'ébullition (glissement)	Puissance volumétrique relative au HCFC-22 à T sortie eau 7 °C	COP relatif au COP HCFC-22
HCFC-22		1790	TC = 96,1 °C TNe = -40,8 °C	1	1
ARM-32a	HFC-32/125/134a/1234yf 25/30/25/20	1548	Tc = 83,3 °C TNe = -42,3 °C (-39,3/-45,3 °C)	1,06	0,93
DR-7	HFC-32/1234yf 36/64	259	TC=89,2 °C TNe = -40,7 °C (-38,2/-43,2 °C)	1,1	0,93
L-20	R32/152a/1234yf/1234ze 40/10/20/30	302	TC = 89,9 °C TNe = -40,8 °C (-37/-44,6 °C)	1	0,98
LTR4X	HFC-32/125/134a/1234ze 28/25/16/31	1276	Tc = 83,2 °C TNe= -42,2 °C (-38,4/-46,1 °C)	1	0,95
LTR6A	HFC-32/744/1234ze 30/7/63	219	Tc = 87,9 °C TNe = -45,6 °C (-35/-56,2 °C)	1,01	0,98
D52Y	HFC-32/125/1234yf 15/25/60	965	Tc = 85,7 °C TNe = -39,6 °C (-37,2/-42 °C)	0,95	0,93

L'analyse du tableau 4-8 montre que les candidats au remplacement du HCFC-22 présentent les caractéristiques suivantes :

- tous les candidats contiennent du HFC-32 et du R-1234yf ou du R-1234ze
- le GWP des mélanges ARM-32a, LTR-4X et D52Y ont des valeurs trop élevées pour être des candidats de long terme
- le DR-7 est proposé aussi bien pour remplacer le HCFC-22 que le R-404A
- les COP de performances demandent à être améliorés
- tous les mélanges présentent un glissement de température au changement de phase qui varie de 5 à 7 °C et même 21 °C pour LTR-6A compte tenu de la présence de 7 % de CO₂
- le DR-7 est formulé pour les plus basses températures d'évaporation et son COP est nettement supérieur à celui du R-404A

5. Etude des alternatives par secteur clé de la réfrigération et de la climatisation

La section 5 donne dans sa première section l'analyse quantitative de la répartition des fluides frigorigènes par application selon la décomposition choisie par le rapport des options techniques de l'UNEP. Une fois cette analyse quantitative établie, chaque secteur d'application est rapidement décrit pour faciliter la compréhension des fiches synthétiques par application dont le format a été explicité dans la section 2-4 et qui, pour des raisons de lisibilité, sont reportées en une annexe séparée car elles sont de format A3. Ces fiches sont de préférence lues en parallèle à chaque section.

5.1 Banques de fluides frigorigènes dans les différents secteurs d'application

Les études d'inventaires de fluides frigorigènes permettent de connaître les quantités de fluides frigorigènes qui constituent les banques⁴ par application. Ici sont extraites les banques des seuls HFC en France en mettant en évidence les applications fortement utilisatrices de HFC à fort GWP.

Les résultats présentés dans cette section sont basés sur le dernier rapport d'inventaires [BAR 12] publié, correspondant à l'année 2011 publié en 2012. Ils ne tiennent pas compte des corrections ou mises à jour réalisées dans le cadre des inventaires 2012 à paraître fin décembre 2013.

La banque de HFC est évaluée à 43 400 tonnes à fin 2011 en France [BAR12] dominée par le secteur de la climatisation automobile. Les secteurs de la climatisation à air (SAC), des chillers, de l'industrie et du froid commercial sont ensuite les secteurs les plus représentatifs de la banque de HFC (12 à 14 %).

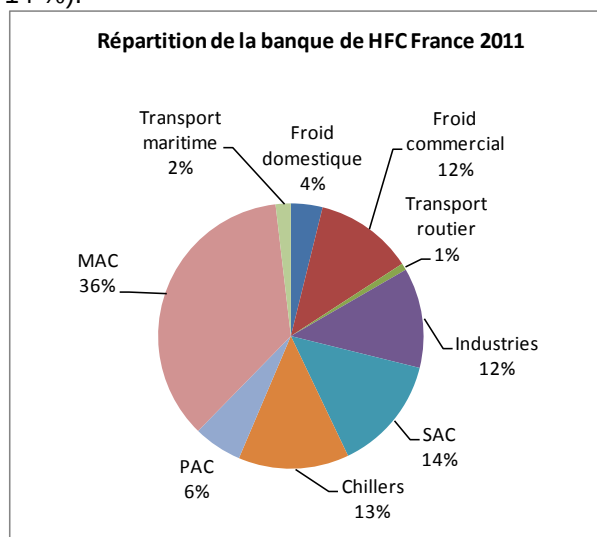


Figure 5.1 Répartition sectorielle de la banque de HFC France 2011

Tableau 5.1 Banques de HFC par secteur et par fluide - France 2011 (en tonnes de fluides)

Banque 2011	R-134a	R-404A	R-407C	R-410A	R-507	R-417A	R-422A	R-422D	R-427A
TOTALE	22 805	7 171	5 213	6 769	422	172	70	604	204
Froid domestique	1 675	-	-	-	-	-	-	-	-
Froid commercial	701	3 925	6	22	406	7	24	87	22
Transport routier	38	324	-	1	-	-	-	-	-
Industries	1 768	2 913	236	107	16	48	46	134	30
SAC	188	-	1 844	4 048	-	14	-	5	-
Chillers	2 018	-	2 493	816	-	-	-	378	153
PAC	141	-	554	1 776	-	101	-	-	-
MAC	15 483	-	80	-	-	0	-	-	-
Transport maritime	793	9	-	-	-	-	-	-	-

Hormis le HFC-134a, fortement utilisé en climatisation automobile, les secteurs concernés par de fortes banques de HFC sont :

- les domaines du froid commercial et de l'industrie pour le R-404A
- le froid commercial également pour le R-507
- les domaines des chillers et de la climatisation fixe pour le R-407C et le R-410A

⁴ La banque correspond aux quantités totales de fluides frigorigènes contenues dans l'ensemble des équipements installés sur le sol français (parc). On peut également parler de "stock" de fluides contenus dans les équipements.

- les domaines du froid commercial, de l'industrie et des chillers pour les fluides dits "de remplacement" (R-422D, R-422A, R-427A, R-417A).

Par ailleurs, l'estimation des taux d'émissions par secteur et la connaissance du parc permettent d'évaluer, par fluide, les quantités de HFC nécessaires à la maintenance des équipements. La demande de HFC nécessaire pour la maintenance des équipements formant le parc français est estimée à 3 900 tonnes en 2011. Le froid commercial est le secteur dominant à près de 30 %, suivi du froid industriel (23 %).

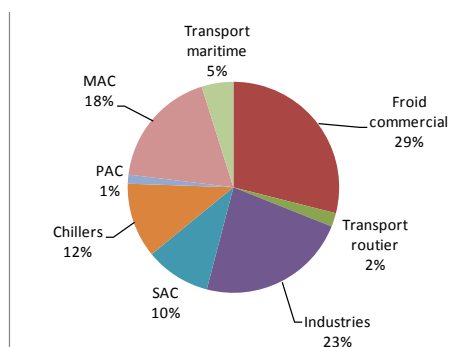


Figure 5.2 Répartition sectorielle de la demande de HFC nécessaire à la maintenance des équipements formant le parc français en 2011

Tableau 5.2 Demandes de HFC pour la maintenance des équipements par secteur et par fluide - France 2011 (en tonnes de fluides)

Maintenance 2011	R-134a	R-404A	R-407C	R-410A	R-507	R-417A	R-422A	R-422D	R-427A
TOTALE	1 474	1 467	461	332	108	11	9	31	7
Froid domestique	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Froid commercial	65	933	2	6	107	2	3	10	3
Transport routier	12	70	-	0	-	-	-	-	-
Industries	336	462	40	18	1	7	6	21	5
SAC	14	-	161	216	-	-	-	-	-
Chillers	149	-	228	70	-	-	-	0	0
PAC	4	-	26	22	-	2	-	-	-
MAC	707	-	3	-	-	-	-	-	-
Transport maritime	187	2	-	-	-	-	-	-	-

Le tableau 5.2 fait clairement apparaître le niveau élevé de la demande en R-404A pour la maintenance (équivalent à 20 % de la banque de R-404A) comparativement au niveau des banques du précédent tableau.

- **Le froid commercial et le froid industriel sont donc les deux secteurs en situation la plus critique vis-à-vis des HFC à fort GWP : leurs banques de R-404A sont importantes mais surtout, les quantités annuelles nécessaires à la maintenance du parc des installations sont élevées.**

Il convient de souligner que, dans le cadre de la mise à jour des études d'inventaires pour l'année 2012, une correction a été faite sur les niveaux historiques des installations centralisées de froid commercial et de froid agroalimentaire. Les résultats d'estimation de la demande pour la maintenance des installations au R-404A, présentés ci-dessus, sont sous-estimés d'environ 20 %.

L'annexe 9 détaille l'analyse de la répartition des banques et du besoin pour la maintenance des installations par fluide et par sous-secteur dans le cas du R-404A, du R-410A, du R-407C et du HFC-134a. Elle montre notamment que les hypermarchés, supermarchés, entrepôts et équipements de type "groupe de condensation" pour les petits commerces sont les applications dont les banques de R-404A sont les plus importantes. Le besoin en R-404A pour la maintenance des installations est cependant fortement dominé par les installations centralisées à détente directe des hypermarchés et supermarchés.

Dans le cadre de cette étude, il a été établi l'évolution du besoin en HFC **pour la maintenance du parc d'équipements présents sur le sol français fin 2012**. Le calcul a été établi sur la connaissance du parc et de l'âge des équipements en France à fin 2012, en supposant les taux d'émissions annuels constants. La demande, présentée figure 5.3, correspond aux quantités de HFC nécessaires à l'entretien des équipements déjà installés sur le parc français en 2012, en tenant compte de leur fin de vie "naturelle", en fonction des durées de vie moyennes par application. Elle correspond donc à un besoin minimum, puisqu'elle ne prend pas en compte la demande engendrée par les nouveaux équipements utilisant des HFC qui seront mis sur le marché après 2012. Cette estimation tient compte d'un facteur correctif pour prendre en compte la mise à jour liée aux inventaires 2012 (écart sur le marché de R-404A notamment).

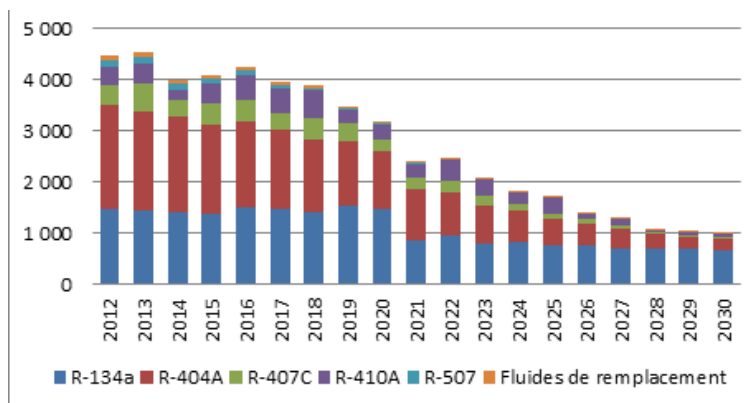


Figure 5.3 Quantités de HFC (t) nécessaires à la maintenance des équipements présents sur le sol français en 2012

On observe qu'étant donnés les durées de vie de certaines installations et le renouvellement récent des secteurs anciennement utilisateurs de HCFC-22, la demande en HFC pour la maintenance des installations du parc français 2012 persiste jusqu'en 2030, de l'ordre de 1 000 t par an.

La figure 5.4 présente cette même demande traduite en équivalent CO₂. Les GWP donnés par le 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC ont été pris en compte pour ce calcul car ils sont la référence utilisée dans les propositions de révision du règlement CE 842/2006. Ce besoin, de l'ordre de 12 millions de tonnes équivalentes CO₂, se réduit progressivement, du fait des fins de vie des installations, mais reste de l'ordre de 2 millions de tonnes équivalentes CO₂ en 2030. Excepté si des conversions d'installations aux HFC sont mises en œuvre, les quantités nécessaires à la maintenance des installations actuelles resteront élevées et à prendre en compte dans les quantités autorisées à être mises sur le marché dans le cadre du "phase down".

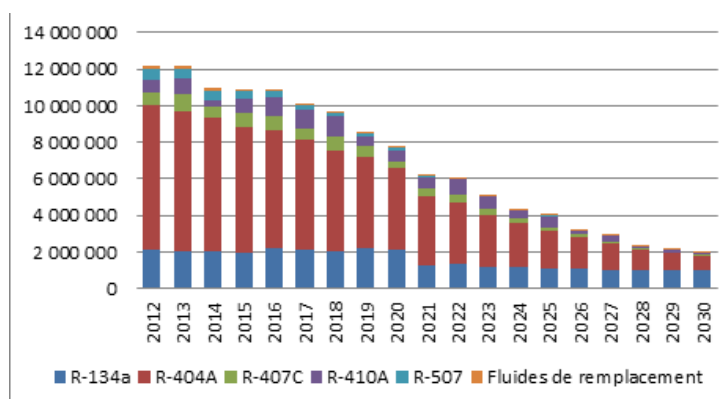


Figure 5.4 Quantités de HFC (t de CO₂ équivalentes) nécessaires à la maintenance des équipements présents sur le sol français en 2012

Le dernier rapport de l'OFF (Observatoire des Fluides Frigorigènes) de l'ADEME mentionne les quantités de HFC déclarées mises sur le marché de 2009 à 2012 en tonnes équivalentes CO₂. Le niveau moyen de 2009 à 2012 est de 25,7 millions de tonnes de CO₂, hors équipements pré-chargés (ce qui correspond bien au volume de référence donné dans la révision du règlement). Les seuils des quantités autorisées à être mises sur le marché concerneront l'Europe et le phase down n'est pas applicable par pays. Cependant, si l'on appliquait les niveaux proposés pour l'Europe au niveau français, l'ordre de grandeur serait de 25,7 millions de tonnes de CO₂ autorisées à être mises sur le marché français en 2015 pour atteindre 16,2 millions en 2018 et 4,1 millions en 2030 (niveau le plus bas donné par le Parlement). Ces niveaux tendent à montrer qu'une part importante des quantités autorisées à être mises sur le marché devrait être consacrée à l'entretien du parc actuel, si une conversion des installations utilisant des HFC à fort GWP n'est pas programmée d'ici 2020.

5.2 Réfrigérateurs et congélateurs domestiques

C'est un marché mûr (tableau 5.3) avec une production nulle en France et une montée régulière de la pénétration du R-600a depuis 1995, qui s'est progressivement substitué au HFC-134a.

Tableau 5.3 Ventes des réfrigérateurs et congélateurs [GIF11]

Marchés équipements neufs	2009	2010	2011	2012
Réfrigérateurs	2 300 000	2 550 000	2 572 000	2 535 000
Congélateurs	720 000	735 000	724 000	690 000

Depuis 2010, 95 % des réfrigérateurs et congélateurs sont chargés avec du R-600a. Les 5 % restants sont chargés avec du HFC-134a.

Dans ce domaine, le seul HFC utilisé est le HFC-134a. Qu'il s'agisse des réfrigérateurs, combinés (fiche FD1) ou congélateurs (fiche FD2), l'alternative est disponible depuis plusieurs années : c'est le R-600a. Son principal inconvénient est sa classe d'inflammabilité (Classe 3, hydrocarbure), mais compensée par une charge très faible et un système hermétique.

5.3 Froid commercial - Meubles frigorifiques de vente et chambres froides pour GMS (grande et moyenne surfaces)

5.3.1 Présentation du secteur

Le secteur du froid commercial est composé de quatre sous-secteurs dotés d'équipements de taille et de structure d'installations différentes :

- les hypermarchés,
- les supermarchés,
- les groupes de condensation équipant les petits commerces,
- les groupes hermétiques équipant les petits commerces et les distributeurs automatiques.

Les hypermarchés et les supermarchés disposent d'installations centralisées, avec une salle de machines où deux séries de centrales frigorifiques fonctionnent, l'une entre -10 et -15 °C pour la conservation des produits frais et l'autre aux environs de -35 à -38 °C pour les produits surgelés. Il est à noter que 80 % de la puissance frigorifique et 75 % des charges de fluides se trouvent dans les centrales dites de froid positif (-10 à -15 °C).

Les « petits commerces » sont **équipés de groupes de condensation** ou de **groupes intégrés (dits stand-alone)**. Ces équipements sont utilisés dans les commerces alimentaires de détail, du spécialiste alimentaire à la supérette, les bars, hôtels et restaurants, les stations-services ainsi que les stations d'autoroute. Les distributeurs automatiques de boissons réfrigérées sont uniquement équipés de petits groupes hermétiques.

Les études effectuées par ARMINES sur le terrain, pour les inventaires, ont montré qu'il était possible d'établir des ratios de charge en fluide frigorigène par m² pour les supermarchés et

hypermarchés et que les surfaces de vente sont des données accessibles statistiquement en France et dans la plupart des pays européens.

Tableau 5.4 Nouvelles surfaces de ventes en hypermarchés en France de 2009 à 2012

PARC HYPERMARCHES	2009	2010	2011	2012
Nombre de magasins	1 526	1 748	1 827	1 968
Surface moyenne par magasin (m ²)	5 561	5 527	5 416	5 400
Nouvelles surfaces de vente (m ²)	355 079	1 158 066	220 935	369 000

Comme le fait voir le tableau 5.5, le R-404A est le fluide largement dominant du fait de sa polyvalence pour le froid « positif » et le froid à basse température où on va trouver des centrales dites positives (-12 °C) et négatives (-38 °C) fonctionnant avec ce fluide. Le système de référence, dominant le marché neuf depuis plusieurs années, est, dans ce secteur, le **système centralisé à détente directe utilisant le R-404A froid négatif et froid positif**. En 2011, la banque de R-404A du froid commercial représentait environ 5 800 t, dont 1 700 t dans les hypermarchés.

Tableau 5.5 Fluides sur le marché neuf en hypermarchés

Nouvelles installations hypermarchés	R-404A/ R-507	HFC- 134a	R-410A	R-407C	CO ₂
2011	82 %	10 %	2 %	0 %	5 %

Il faut insister sur le fait que le concept d'hypermarchés ne se déploie que dans les pays où les heures d'ouverture quotidiennes sont de 12 heures, de 9h à 21h, et que ces magasins sont donc absents de toute l'Europe du nord à l'exception de la Grande-Bretagne. Les puissances frigorifiques sont 4 fois supérieures en moyenne aux puissances frigorifiques des centrales de supermarchés. De là des options techniques différentes. Le parc des supermarchés est lui aussi bien répertorié (tableau 5.6).

Tableau 5.6 Evolution du nombre de supermarchés en France de 2009 à 2012 (source INSEE)

PARC SUPERMARCHES	2009	2010	2011	2012
Nombre de magasins	5 437	5 381	5 507	5 702
Surface moyenne par magasin (m ²)	1 284	1 288	1 304	1 320
Estimation des nouvelles surfaces de vente (m ²)	18 570	0	250 400	122 357

La répartition des fluides en supermarché est un peu plus orientée vers le HFC-134a du fait de la taille plus petite des installations, mais le R-404A est toujours le fluide dominant (tableau 5.7).

Tableau 5.7 Fluides sur le marché neuf en supermarchés

Nouvelles installations supermarchés	R-404A	HFC-134a	R-410A	CO ₂
2010	87 %	12 %	1 %	0 %
2011	78 %	20 %	1 %	1 %

La banque de R-404A en supermarchés est évaluée à 1 250 t en 2011 [BAR12] et estimée à 1 350 t en 2012.

Le parc des installations des petits commerces est moins précisément connu. Une estimation peut être faite à partir du nombre de petits commerces. Les fluides utilisés sont le HFC-134a, majoritaire dans les groupes hermétiques, et le R-404A, majoritaire dans les groupes de condensation. La banque de fluides frigorigènes dans les installations des petits commerces est ainsi estimée à :

- 500 t de fluides frigorigènes dans les meubles utilisant des groupes hermétiques en 2011, dont 4/5 de HFC-134a et 1/5 de R-404A
- 1 300 t de fluides frigorigènes dans les meubles avec groupes de condensation dont 850 t de R-404A et près de 200 t de HFC-134a

5.3.2 Alternatives aux systèmes à détente directe utilisant le R-404A en froid positif seul ou froid négatif et positif (fiche FC1)

Plusieurs alternatives à l'utilisation du R-404A en systèmes à détente directe sont disponibles sur le marché européen et mises en œuvre depuis plusieurs années (Fiche FC1).

Pour les hypermarchés où la puissance frigorifique à -12 °C est de l'ordre de 800 kW et de 125 à 200 kW pour la basse température (-38 °C) avec plusieurs centrales frigorifiques implantées dans une salle des machines, le concept le plus avancé est de fonctionner en détente directe, en CO₂ à la basse température avec une condensation autour de -10 °C sur un circuit d'eau glycolée, qui constitue le système indirect à la moyenne température, avec des centrales fonctionnant au HFC-134a. Les installations de ce type sont déjà dénombrées à plus de 400 en France en hyper et supermarchés [PER13]. Pour le futur, le R-1234yf pourra aisément remplacer le HFC-134a.

Une autre alternative est la solution CO₂ transcritique mais, même si elle utilise un fluide de GWP = 1, elle présente plusieurs inconvénients : pression de fonctionnement élevée pouvant causer des problèmes de sécurité et de fiabilité ; elle n'est pas adaptée au climat chaud, le coût d'investissement est élevé, une formation est nécessaire pour la maintenance [BIT09].

Pour les supermarchés, Il faut noter plusieurs tendances clés qui se sont mises en place au niveau des pays Nord européens et dans une bien moindre mesure en France, à savoir l'implantation de centrales frigorifiques entièrement au CO₂ aussi bien pour la basse que la moyenne température. On retrouvera une architecture en « cascade ». Le CO₂ pour la production frigorifique à -12 °C va fonctionner avec un cycle à changement de phase classique jusqu'à des températures d'air extérieur de 18 à 20 °C et des pressions de condensation supérieures à 50 bar. Au-delà, le cycle sera transcritique avec une haute pression de 90 à 100 bar, ce qui requiert bien sûr des échangeurs spécialement conçus à cet effet. Sur l'ensemble de l'Europe, on dénombre plus de 1 300 magasins équipés de ces systèmes (y compris les systèmes en cascade CO₂/HFC-134a) sur un nombre total de supermarchés européens de 20 000 et de mini-markets de 4 millions.

Il n'existe actuellement pas de fluide disponible pour leetrofit du R-404A en froid commercial centralisé permettant une conversion d'une installation de froid positif et négatif. En revanche, le R-407F et le R-407A sont proposés comme fluides de remplacement « drop-in » du R-404A pour les installations en moyenne température et, testé en supermarché, ils montrent une efficacité énergétique proche de celle du R-404A [DAN13].

Alternatives en cours de développement

Les principaux fluides de remplacement du R-404A en cours de développement ont été présentés section 4 (Tableau 4.7) et ont des GWP entre 200 et 300 car la concentration en HFC-32 reste égale ou inférieure à 40 % et sont indiqués dans les fiches applications présentées en annexe 9. Ces premiers fluides, proposés et testés dans le cadre du programme AHRI, mais pour d'autres applications, sont de bons candidats au remplacement du R-404A en froid commercial ; toutefois, ils présentent l'inconvénient d'être légèrement inflammables.

5.3.3 Alternatives aux groupes hermétiques utilisant du HFC-134a

Dans les équipements des petits commerces, la tendance observée ces dernières années est l'introduction de meubles frigorifiques « stand-alone » qui fonctionnent au propane (R-290) avec des charges d'au moins 500 g ; l'isobutane se retrouve aussi dans les congélateurs pour crèmes glacées. Ces alternatives disponibles présentent donc un inconvénient majeur : le niveau d'inflammabilité (classe 3) qui est certes associé à une charge réduite, mais le nombre d'équipements peut être élevé dans un même magasin et le propriétaire n'est pas toujours conscient de ses obligations ATEX (charge totale élevée rapportée à la surface de vente). A noter que pour ces derniers équipements, comme pour les distributeurs automatiques de boissons, les équipements appartiennent aux marques des produits qui les louent aux enseignes de commerce.

Les distributeurs de boissons (vending machines) fonctionnent pour certains d'entre eux au CO₂ et non pas au propane, compte tenu de la charge qui peut dépasser 1 kg. Cette alternative non inflammable est intéressante mais le niveau de technicité est tellement élevé qu'une seule entreprise commercialise actuellement ce type d'équipement (problème de coût et de concurrence).

Alternatives en cours de développement

Parmi les mélanges HFC/HFO en cours de développement, des fluides de GWP autour de 600 sont actuellement testés : le XP-10 ou le N-13 (fiche FC1). Le R-1234yf et le R-1234ze sont également en cours de test et devraient pouvoir facilement remplacer le HFC-134a.

5.3.4 Alternatives aux groupes autonomes utilisant du R-404A

Pour les équipements neufs, une alternative existant sur le marché depuis plusieurs années est le groupe autonome au HFC-134a utilisant des compresseurs plus gros et un peu plus cher. Il n'existe actuellement pas d'autre alternative et aucun fluide de retrofit n'est adapté (étant donné le coût de ce type d'équipement, le retrofit est de toutes façons une opération peu courante).

Alternatives en cours de développement

Plusieurs fluides en développement adaptés aux groupes de condensation devraient être mis sur le marché rapidement, d'ici 2 ou 3 ans, notamment les mélanges de GWP entre 200 et 300 légèrement inflammables (fiche FC2).

5.3.5 Conclusions

En résumé, pour les installations de fortes puissances des hypermarchés, le concept futur limitera drastiquement la charge à la température de réfrigération « positive » (-12 °C) par recours à un circuit frigoporteur indirect et en utilisant soit du HFC-134a à court terme ou du CO₂ ou du R-1234yf à moyen terme, la basse température fonctionnant au CO₂ en détente directe. Ce même concept peut se décliner à l'identique en supermarchés où, selon la latitude et le nombre d'heures à température d'air extérieur supérieure à 20 °C, le système peut être entièrement au CO₂.

Pour les groupes de condensation qui sont des produits génériques il est vraisemblable que les mélanges à GWP autour de 300 se substitueront au R-404A, car les précautions ATEX pour des mélanges très faiblement inflammables sont fortement différentes de celles qui sont nécessaires pour les hydrocarbures. Enfin, les groupes stand-alone auront le choix entre les mêmes mélanges, le propane, le CO₂ et le R-1234yf.

5.4 Engins de transport frigorifique

En Europe, on peut estimer que le tonnage transporté sous température dirigée sur les routes représente quelques 400 millions de tonnes de denrées alimentaires par an et la consommation des aliments surgelés continue d'augmenter. Afin de respecter la chaîne du froid et les températures réglementaires imposées par le paquet hygiène, le parc des engins de transport est constitué de camionnettes et de petits véhicules (charge utile < 3,5 tonnes), de camions et porteurs (>3,5 tonnes), de remorques et de semi-remorques (20 à 24 tonnes).

Tableau 5.8 Nombre d'engins frigorifiques en 2012

Type d'engins	Nombre d'engins en service en 2012
Camions	27 087
Camionnettes	62 881
Conteneurs	1 537
Remorques	470
Semi-remorques	28 908
Total général	120 883

Les domaines de température à respecter sont de -18 °C pour les denrées congelées et de températures allant de 2 °C à 8 °C pour les produits réfrigérés. Les données les plus récentes sur la flotte d'engins sous transport dirigés sont établies par le Cemafruid.

Actuellement, pour les puissances inférieures à 3 500 W, le HFC-134a est le fluide utilisé. Pour les camions, remorques et semi-remorques, le R404A est le fluide choisi. A noter enfin, le R-404A est aussi utilisé dans les petits systèmes de type poulie-moteur pour des raisons de simplicité de maintenance.

Les données techniques typiques des différents types de groupes frigorifiques sont présentées tableau 5.9.

Tableau 5.9 Caractéristiques des groupes frigorifiques

Technologie	Puissance frigorifique (W)	Charges moyennes (kg)
Poulie-moteur	500 à 3 000	1,6
Splits	2 500 à 5 500	4
Groupe autonome	6 000 à 10 000	7

Les groupes frigorifiques de type « poulie-moteur » sont de petits équipements montés sur des camionnettes et autres petits véhicules. Leur compresseur est entraîné par le moteur principal du véhicule. Les groupes de type « split » sont des systèmes autonomes, directement montés sous châssis ou sur la caisse isotherme. Les « groupes frigorifiques » sont des systèmes autonomes, presque intégrés en face avant d'une remorque. Ils sont en général de forte puissance et sont plutôt destinés au transport à longue distance.

Les conditions d'usage assez difficiles de ces équipements impliquent un taux de fuite de fluide frigorigène assez élevé.

Tableau 5.10 Evaluation de la quantité de frigorigènes utilisée en transport frigorifique en France

Fluide frigorigène	Nombre d'engins	Quantité de fluide (kg)
HFC-134a	17 169	16 022
R-404A	99 793	336 687
Autres	3 471	14 847
Total général	120 883	367 557

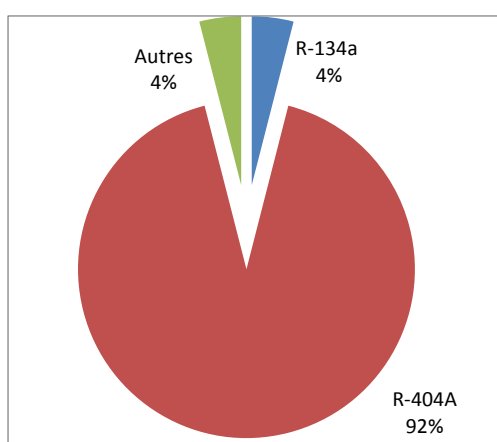


Figure 5.5 Répartitions des fluides frigorigènes dans les systèmes des transports frigorifiques routiers en 2012 - Technologies alternatives

Il existe différentes technologies de production de froid ne faisant pas appel aux groupes à compression de HFC à fort GWP. Elles sont brièvement présentées ci-après.

- L'usage d'engins réfrigérant disposant d'un stockage de froid : ces engins sont usuellement affectés au transport de produits congelés comme les glaces et sont en

général munis de portillon. Ils sont souvent peu adaptés au transport longue distance et leur usage est dédié au milieu urbain. Les principales difficultés propres à cette technologie sont la charge utile affectée par le poids du stockage de froid (eutectique) ainsi que les moyens complémentaires nécessaires pour congeler les eutectiques (souvent un dispositif disposant lui-même d'un groupe à compression).

- L'usage de la cryogénie en détente directe ou indirecte : apparus il y a quelques années, ces dispositifs offrent l'avantage de véhicule silencieux bien adaptés aux livraisons urbaines. Leur usage pour le transport longue distance est moins adapté en raison de l'absence d'un réseau d'approvisionnement en azote. Les systèmes à détente directe où l'azote est rejeté dans la caisse posent des problèmes de sécurité, gérés pas des automatismes intégrés aux véhicules. Ces systèmes ne peuvent pas être utilisés pour transporter certains produits : crustacés vivants par exemple.
- Les engins dotés de groupe à compression de CO₂ : cette technologie n'est pas encore disponible mais a fait ses preuves pour les conteneurs maritimes. C'est sans doute l'alternative la plus crédible pour les engins frigorifiques car les restrictions d'usage sont faibles, voire inexistantes. La technologie doit être cependant adaptée pour des climats européens très variables.

5.5 Froid dans les industries agro-alimentaires (IAA)

En agroalimentaire, il existe quatre grandes catégories de besoin en froid :

- le froid d'entreposage (froid positif ou négatif)
- le refroidissement des procédés (froid positif)
- la surgélation dans les procédés (froid négatif)
- le conditionnement d'ambiance (froid positif ou négatif).

Pour satisfaire ces besoins, les installations peuvent présenter plusieurs structures :

- des systèmes à détente directe adaptés aux différentes gammes de puissance, allant des installations centralisées avec une salle des machines indépendante et une circulation à détente directe du fluide frigorigène.
- des systèmes indirects utilisant de l'eau glycolée ou du CO₂ comme frigoporteurs, et le système thermodynamique contenant le fluide frigorigène refroidit ce frigoporteur,
- des systèmes en cascade qui comportent deux fluides distincts, l'un adapté à la haute température par exemple le HFC-134a, l'autre à la basse température par exemple le CO₂, le fluide « haute température » condense le fluide basse température en s'évaporant dans un évapo-condenseur
- des systèmes bi-étagés (booster) qui utilisent le même fluide aux deux étages de température
- des systèmes à recirculation par pompe alimentant des évaporateurs de grande puissance et fonctionnant essentiellement à basse température ; ces systèmes requièrent des fluides purs ou des quasi-azéotropes
- des systèmes à évaporateurs noyés comme les tanks à lait
- des groupes refroidisseurs d'eau (chillers)

Le choix de l'installation dépend:

- du niveau de température de fonctionnement,
- de la puissance frigorifique nécessaire (elle-même fonction de la production),
- du moyen de refroidissement du condenseur (à l'air, à l'eau, avec tour de refroidissement, etc.)
- de l'efficacité énergétique recherchée,
- du budget.

En France, en termes d'installations, l'industrie agroalimentaire représente:

- environ 720 entrepôts frigorifiques, soit 15 millions de m² [DEV12]
- 13 500 entreprises agroalimentaires dont 2 500 dans l'industrie de la viande, 1 250 dans celle du lait, 300 dans celle du poisson, 1 350 dans celle de la fabrication de produits de boulangerie et pâtisserie et 2 600 dans la production de boissons [PAN12]
- il y a 170 000 tanks à lait installés dans les fermes laitières.

FLUIDES ET BANQUES

La production actuelle de froid industriel en agroalimentaire utilise principalement le HCFC-22, le R-404A, le HFC-134a et l'ammoniac (R-717) comme fluide frigorigène. Le CO₂ (R-744) commence également à être utilisé en froid négatif, en cascade avec de l'ammoniac ou du HFC-134a. Les systèmes indirects avec frigoporteurs ont toujours existé et sont associés à différents frigorigènes.

Selon les résultats d'inventaires 2011 [BAR11], la banque de fluides frigorigènes du secteur agroalimentaire est estimée à 8 100 t dont 30 % de R-404A, 19 % de HCFC-22 et 45 % de R-717.

Tableau 5.11 Banques de fluides frigorigènes dans l'industrie agro-alimentaire en France

Banque IAA (t)	R-404A	R-717 (NH ₃)	HCFC-22	HFC-134a	R-744 (CO ₂)	Fluides de remplacement
2011	2 420	3 680	1 550	210	15	250
Estimation 2012	2 600	3 730	1 320	250	35	270

Dans ce domaine, les systèmes de référence identifiés comme utilisant des HFC à fort GWP, soit ici le R-404A, sont:

- les systèmes centralisés à détente directe ou fonctionnant aussi en système indirect pour les installations de froid positif (fiche IIA1),
- les systèmes centralisés à détente directe ou en système indirect pour les installations de froid positif et négatif ou négatif seul (fiche IIA2),
- les systèmes à évaporateur noyé pour les installations de froid positif (fiche IIA3),
- les systèmes à évaporateur noyé pour les installations de froid négatif (fiche IIA4),

Les systèmes à détente directe utilisés dans les tanks à lait sont inclus dans les systèmes à évaporateur noyé (fiche IIA3). Ils ne peuvent donc pas fonctionner avec des mélanges à fort glissement de température.

Les chillers utilisés dans les procédés agroalimentaires seront traités dans la section consacrée aux chillers.

ALTERNATIVES AUX SYSTEMES UTILISANT DES HFC A FORT GWP

Alternatives aux systèmes à détente directe ou indirecte de froid positif utilisant du R-404A

Installations neuves

- Parmi les installations récemment mises sur le marché, du fait de l'assouplissement de la réglementation ammoniac, les systèmes utilisant le R-717 sont de plus en plus présents sur le marché neuf. Ils constituent la première alternative existante aux systèmes à détente directe ou aux systèmes indirects utilisant le R-404A (fiches IAA1 et IAA2).
 - Le principal inconvénient de ce type d'installation est le coût : l'investissement est nettement supérieur à celui d'une installation au R-404A et les contraintes particulières liées à la gestion de la toxicité et de l'inflammabilité du R-717 sont également coûteuses (installations d'équipements de contrôle des concentrations, salles des machines ventilées avec alarme, etc.).
 - Les retours d'enquêtes montrent que le choix de l'ammoniac est fortement lié à la stratégie et à l'expérience d'entreprise : lorsque l'entreprise est expérimentée dans la gestion de la sécurité, elle peut faire le choix de l'investissement en contrepartie d'une assurance vis-à-vis des éventuelles évolutions réglementaires concernant l'utilisation des HFC.
- Le HFC-134a fait également partie des alternatives disponibles au R-404A. Il peut être utilisé en système direct mais peut être configuré en installation indirecte afin de limiter la charge installée et l'impact environnemental de l'installation.

- Les inconvénients de ce type d'installation sont liés à l'utilisation du HFC-134a qui a une moins bonne capacité volumétrique que le R-404A.
- Le principal intérêt est la forte réduction de l'impact environnemental de l'installation, d'autant plus qu'il est possible de dimensionner les nouvelles installations afin d'envisager une conversion ultérieure du HFC-134a vers le R-1234yf.

Rétrofit

Le R-407A (GWP = 2100) et le R-407F (GWP= 2060) sont aujourd'hui disponibles comme première solution de remplacement du R-404A dans les systèmes à détente directe. Dans les retours d'enquêtes, la conversion des installations du R-404A vers le R-407A (ou R-407F) n'a pas nécessité de remplacement des composants des groupes frigorifiques. Les fluides développés pour le remplacement du HCFC-22 peuvent être aussi utilisés pour le remplacement du R-404A (GWP = 3700), le R-407A (GWP = 2100) et le R-407F (GWP = 2060) disposant de GWP inférieurs.

Alternatives aux systèmes à de froid négatif (ou positif & négatif) utilisant du R-404A

- Les alternatives existantes pour les systèmes à détente directe de froid positif au R-404A citées ci-dessus peuvent être utilisées dans le cas des systèmes de froid négatif ou positif et négatif. Cependant des solutions plus performantes d'un point de vue énergétique et environnemental existent.
- Les systèmes de type "cascade" utilisent du CO₂ en basse température avec du HFC-134a ou du R-717 à la moyenne température en détente directe ou en système indirect. Ces systèmes sont des alternatives aux systèmes utilisant le R-404A. Une variante est constitué par un système bi-étagé à l'ammoniac aux deux étages par exemple de type "Booster"
 - Les systèmes de type "cascade" sont très performants d'un point de vue énergétique, d'autant plus s'ils sont associés à l'ammoniac, ce qui permet de compenser en grande partie le coût d'investissement
 - Quand il s'agit d'un système HFC-134a/CO₂, le HFC-134a peut être utilisé en système indirect sur la boucle de froid positif afin de limiter la charge installée
 - L'impact environnemental des fluides utilisés est faible : CO₂, ammoniac. Les retours d'enquête ont montré qu'en 2013, certains opérateurs proposaient un dimensionnement des installations de façon à anticiper une conversion du HFC-134a vers le R-1234yf sur les installations neuves de type cascade HFC-134a/CO₂.

Rétrofit

En termes de retrofit, le R-407F (GWP = 2060) est disponible comme solution de remplacement du R-404A dans les systèmes à détente directe de froid négatif, il a de meilleures performances que le R-407A à basse température. Ce retrofit s'accompagne cependant le plus souvent d'une baisse de performances [ZOU13].

Alternatives aux systèmes à évaporateurs noyés de froid positif

Installations neuves

Seuls des fluides purs peuvent être utilisés dans les évaporateurs noyés. Si l'ammoniac ne peut pas être utilisé, le CO₂ ou des solutions de MPG ou de formiate de potassium peuvent être utilisés comme frigopORTEURS.

Rétrofit

Comme pour le remplacement du HCFC-22, les retrofits du R-404A ne sont pas possibles actuellement pour ce type d'installations. Leur configuration nécessite l'utilisation d'un fluide quasi azéotrope et rend impossible l'usage d'un fluide possédant un glissement de température supérieur à 1 °C.

Alternatives aux systèmes à évaporateur noyé de froid négatif

Installations neuves

En froid négatif, la situation est identique mais les systèmes de type cascade CO₂/ammoniac sont également envisageables. Ces systèmes ont également l'inconvénient d'un coût élevé mais présentent une excellente efficacité énergétique.

Alternatives en cours de développement : mélanges HFC/HFO à GWP autour de 250

De nouveaux mélanges de fluide à base de HFC/HFO sont également en cours d'évaluation. Ces mélanges sont conçus pour un remplacement direct du R-404A. Parmi ces mélanges, trois sont étudiés par Thermo King dans le cadre de l'initiative AREP/AHRI [MAR13] :

- ARM-30a : composition massique HFC-32/R-1234yf (29/71)
- DR-7 : composition massique HFC-32/R-1234yf (36/64)
- L-40 : composition massique HFC-32/R-152a/R-1234yf/R-1234ze(E) (40/10/20/30)

CONCLUSIONS INDUSTRIES AGRO-ALIMENTAIRES (IAA)

Il existe des alternatives disponibles et intéressantes aux systèmes centralisés directs de froid positif ou positif/négatif utilisant le R-404A, notamment :

- 1) les systèmes "cascade" CO₂/ammoniac, quand l'ammoniac peut être utilisé d'un point de vue réglementaire, qui ont une excellente efficacité énergétique et un impact environnemental quasi nul, mais présentent les inconvénients liés à la toxicité et l'inflammabilité de l'ammoniac
- 2) les systèmes cascade CO₂/HFC-134a utilisant du HFC-134a en système indirect, qui peuvent être dimensionnés pour être convertibles au R-1234yf ; en cas de besoin en froid positif, seuls les systèmes indirects au HFC-134a, convertibles au R-1234yf, sont également intéressants d'un point de vue impact environnemental. Les systèmes cascade sont particulièrement intéressants car ils compensent l'efficacité énergétique moindre du HFC-134a et le CO₂ compense la moins bonne capacité volumétrique du HFC-134a comparée au R-404A. Si les conditions de sécurité le permettent, l'ammoniac peut également être utilisé à la place du HFC-134a
- 3) des possibilités de rétrofit existent avec des fluides ayant des performances assez proches de celles du R-404A (en froid positif) qui peuvent être intéressantes en période transitoire pour amener l'installation à sa fin de vie, à un coût raisonnable (cas fréquent de drop-in)
- 4) La plupart des fluides de remplacement, disponibles ou en cours de développement, sont adaptables au HCFC-22 qui concerne encore environ 15 % de la banque du domaine agroalimentaire en France.

5.6 Climatisation à air

Les équipements de climatisation à air peuvent se classer en deux sous-secteurs, distincts par leurs niveaux de puissance : celui de la climatisation individuelle (< 17,5 kW) et celui de la climatisation autonome. Dans les fiches on retrouvera cette classification et celles des fluides utilisés (R-410A et R-407C) et leurs fluides de remplacement. Le tableau 5.12 présente les données des marchés 2010 et 2011.

Tableau 5.12 Marchés des équipements de climatisation à air

Marchés	Climatisation individuelle				Climatisation autonome			
	Mobile*	Clim. fenêtre	Split system	Multi split system	Armoires verticales	DRV	Split et multi split	Roof top
2010	70 000	3 722	278 589	100 130	521	13 923	4 020	1320
2011	70 000	3 648	267 215	93 614	565	15 500	4 185	2500

* données marchés ayant une incertitude élevée. Valeurs 2009-2010 corrigées.

Le tableau 5.13 montre la domination du R-410A dans tous les sous-secteurs de la climatisation à air, comme explicité dans la section 4 (tableau 4-6) et dans les fiches Application. Les candidats au remplacement du R-410A sont donc le HFC-32 avec une puissance volumétrique supérieure de 12 % et un GWP de 716 ; de là les fabricants de fluides proposent des mélanges qui contiennent tous du HFC-32aux alentours de 70 % et donc avec un GWP autour de 500, les autres constituants étant essentiellement du R-1234yf ou du R-1234ze.

Tableau 5.13 Fluides sur le marché neuf de la climatisation à air en 2011

Fluides	2010	2011
Climatiseurs mobiles	100 % R-410A	100 % R-410A
Climatisation de fenêtre	100 % R-410A	100 % R-410A
Mono split	2 % R-407C, 98 % R-410A	1 % R-407C, 99 % R-410A
Multi split	14 % R-407C, 86 % R-410A	2 % R-407C, 98 % R-410A
Armoires verticales	26 % R-407C, 55 % R-410A, 19 % HFC-134a	20 % R-407C, 62 % R-410A , 18 % HFC-134a
DRV	25 % R-407C, 57 % R-410A, 18 % HFC-134a	20 % R-407C, 62 % R-410A , 18 % HFC-134a
Split et Multi split	3 % R-407C, 97 % R-410A	0,5 % R-407C, 0,5 % HFC-134a 99 % R-410A
Roof top	27 % R-407C, 73 % R-410A	20 % R-407C, 80 % R-410A

5.7 Pompes à Chaleur (PAC) résidentielles

Les pompes à chaleur (PAC) peuvent être regroupées en trois familles :

- les **PAC géothermales** qui puisent la chaleur dans le sol ou l'eau d'une nappe par l'intermédiaire d'un réseau de capteurs ou de forages
- les **PAC aérothermiques** qui la puisent directement dans l'air ambiant
- Les chauffe-eau thermodynamiques (PAC ECS dans tableau 5.4) dont le développement récent est dû à la mise en place de la réglementation thermique 2012 (RT 2012) et qui représentent déjà plusieurs dizaines de milliers d'unités

Les PAC air/air et air/eau forment les modèles aérothermiques. Les PAC sol/sol, sol/eau, eau/eau et eau glycolée/eau constituent les PAC géothermales (dans les appellations, le premier terme désigne l'origine du prélèvement, le second le mode de distribution de la chaleur). Dans le cas de la **PAC** eau glycolée / eau, la chaleur est puisée dans le sol au moyen de capteurs enterrés où circule de l'eau glycolée.

Du point de vue technologique, il faut distinguer les PAC air/air qui sont très semblables aux splits-systèmes de climatisation et les PAC délivrant la chaleur sur circuit d'eau ; dans un cas, le fluide frigorigène est obligatoirement contenu dans la pièce et les règles de sécurité (EN-378) vont définir des quantités maximales qui vont limiter les charges des fluides inflammables ou modérément inflammables alors que les PAC délivrant la chaleur sur circuit d'eau peuvent disposer le système thermodynamique à l'extérieur et seul un circuit d'eau glycolée transfère la chaleur à l'intérieur de l'habitat.

Tableau 5.14 Marché des PAC résidentielles

PAC	2010	2011
Air/ eau	53 854	55 299
Eau/eau	6 658	5 926
Sol/sol	1 548	1 312
Sol/eau	751	553
ECS	-	25 000

Le marché s'est stabilisé autour de 60 000 unités par an après avoir connu jusqu'à 150 000 unités par an lorsque les pompe à chaleur étaient éligibles au crédit d'impôt.

Tableau 5.15 Fluides utilisés sur le marché neuf des PAC résidentielles en 2010 et 2011

Fluides utilisés	R-410A	R-407C	HFC-134a	R-417A
2010	85 %	8 %	5 %	2 %
2011	90 %	5 %	5 %	-

Là aussi comme pour la climatisation à air la domination du R-410A est évidente et les options techniques pour les fluides sont identiques : HFC-32 et mélanges HFC/HFO à base de HFC-32 cf. tableau 4-6. Ceci s'applique aussi aux chauffe-eau thermodynamiques.

Pour les pompes à chaleur industrielles, suivant le niveau de températures, les fluides candidats pour le futur sont le R-1234ze et le R-1233zd. Les températures critiques de ces deux fluides sont respectivement de 109,4 °C et 165,6 °C, ce qui permet aux industriels spécialisés de proposer des pompes à chaleur à plus haut niveau de température, à condition que les problèmes de lubrification soient correctement traités.

5.8 Groupe refroidisseurs d'eau (chillers)

Le Tableau 5.16 présente la consolidation des marchés de chillers pour les trois gammes de puissances considérées dans les inventaires [BAR12]

Tableau 5.16 Evolution des marchés GRE de 2000 à 2010 et données 2011

Marchés (nombre unités)	2000	2005	2010	2011
GRE P < 50 kW	3 440	9 710	3 220	2 890
GRE 50 < P < 350 kW	4 910	2 950	3 350	3 390
GRE P > 350 kW	1 480	850	820	1 000
Dont Groupes centrifuges	49	53	56	56

Comme le fait voir le tableau 5-17, le choix des fluides est plus diversifié pour les groupes refroidisseurs d'eau volumétriques qui couvrent toutes les puissances.

Tableau 5.17 Fluides utilisés sur le marché neuf des GRE 2010-2011

Fluides utilisés	2010	2011
GRE P < 50 kW	R-407C (31 %) R-410A (69%)	R-407C (27 %) R-410A (73 %)
GRE 50 < P < 350 kW	R-407C (45 %) R-410A (53 %) R-717 (2 %)	R-407C (53 %) R-410A (45 %) R-717 (2 %)
GRE P > 350 kW	R-407C (22,5 %) R-410A (25,5 %) HFC-134a (50 %) R-717 (2 %)	R-407C (22 %) R-410A (26 %) HFC-134a (50 %) R-717 (2 %)
Compresseurs centrifuges	HFC-134a (100 %)	HFC-134a (100 %)

On trouve une part non négligeable de ces **groupes de petite et moyenne puissances fonctionnant au R-407C** (HFC-32/125/134a 23/25/52). Les fluides de remplacement sont les mêmes que ceux qui sont indiqués pour le HCFC-22 (cf. tableau 4.8) à savoir des fluides à base de HFC-32 avec des concentrations inférieures où, en fait, le R-125 et le HFC-134a sont remplacés par le R-1234yf et/ou le R-1234ze avec **des GWP de l'ordre de 300** car la concentration de HFC-32 reste égale ou inférieure à 40 %.

Pour les groupes fonctionnant au **R-410A**, on trouvera les mêmes mélanges candidats avec des teneurs en HFC-32 autour de 70 % et donc des GWP autour de 500.

A noter que comme les groupes refroidisseurs d'eau peuvent être compacts et placés en dehors des espaces occupés, il est possible **d'utiliser de l'ammoniac** à partir d'une puissance typiquement supérieure à 250 kW froid pour compenser les surcoûts dus aux échangeurs. Il est aussi possible **d'utiliser du propane R-290**, ce qui est proposé par certaines firmes européennes.

Pour les puissances > 350 kW, **les groupes centrifuges** et certains groupes à vis fonctionnent au HFC-134a. Pour les groupes centrifuges, les essais sont assez avancés et le R-1234ze semble bien être le fluide de référence pour le futur.

5.9 Climatisation embarquée

Le secteur de la climatisation embarquée se divise en trois sous-secteurs, déterminés par les technologies utilisées.

- La climatisation automobile comprend les circuits de climatisation des véhicules particuliers et utilitaires légers (VUL), jusqu'à 5 t.
- Les véhicules industriels (VI) regroupent les camions et tracteurs agricoles. Ce sous-secteur est proche de celui de la climatisation automobile. Seule la cabine du conducteur est rafraîchie, par des systèmes de technologie identique. Les cars et bus présentent des systèmes de climatisation différents, plus puissants, où tout le véhicule est rafraîchi.
- Dans le cas des trains, des tramways, des métros et des RER, les technologies sont reprises des technologies de climatisation fixe et les fluides sont soit du HFC-134a, soit du R-407C.

Tableau 5.18 Nouvelles immatriculations de véhicules

MARCHES	Véhicules particuliers et VUL jusqu'à 5 t	Véhicules Industriels	Cars et bus
2010	2 669 281	41 773	5 382
2011	2 633 483	47 63	6 206

- En climatisation automobile et pour les bus ainsi que les cabines de camions ou de tracteurs, seul le HFC-134a est utilisé.
- Les équipements de climatisation des trains utilisent le HFC-134a ou le R-407C, selon qu'ils équipent les TGV ou les TER et postes de conduite [PAS12].

Tableau 5.19 Charges moyennes

Charges (kg)	Climatisation automobile	Véhicules Industriels	Cars et bus	Trains
2010	0,54	0,77	12,1	10,9
2011	0,52	0,76	11,5	10,6

Le R-1234yf a été choisi comme fluide de remplacement du HFC-134a, après de très longues études comparatives menées sur banc d'essais et des essais sur flottes de véhicules, pour tous les composants. Des groupes de travail internationaux se sont réunis sous l'égide de SAE et ont étudié de manière approfondie les risques associés à l'inflammabilité très modérée de ce fluide. La compétition entre le R-1234yf et le CO₂ s'est déroulée de manière âpre de 2006 à 2010. Le CO₂ n'est pas apparu comme une option mondiale avec de plus un coût du système supérieur d'au moins un facteur 2 à 2,5 comparativement aux systèmes fonctionnant au R-1234yf, et ce du fait de la haute pression du CO₂. La controverse de 2013 en Europe, sur l'inflammabilité du R-1234yf vise à prolonger l'usage du HFC-134a.

Pour le R-407C, comme dit précédemment (tableau 4-8), les remplaçants sont des mélanges contenant du HFC-32 jusqu'à 40 % et dont le GWP se situe autour de 300.

6. Données relatives aux technologies alternatives aux systèmes à compression contenant des HFC à fort GWP

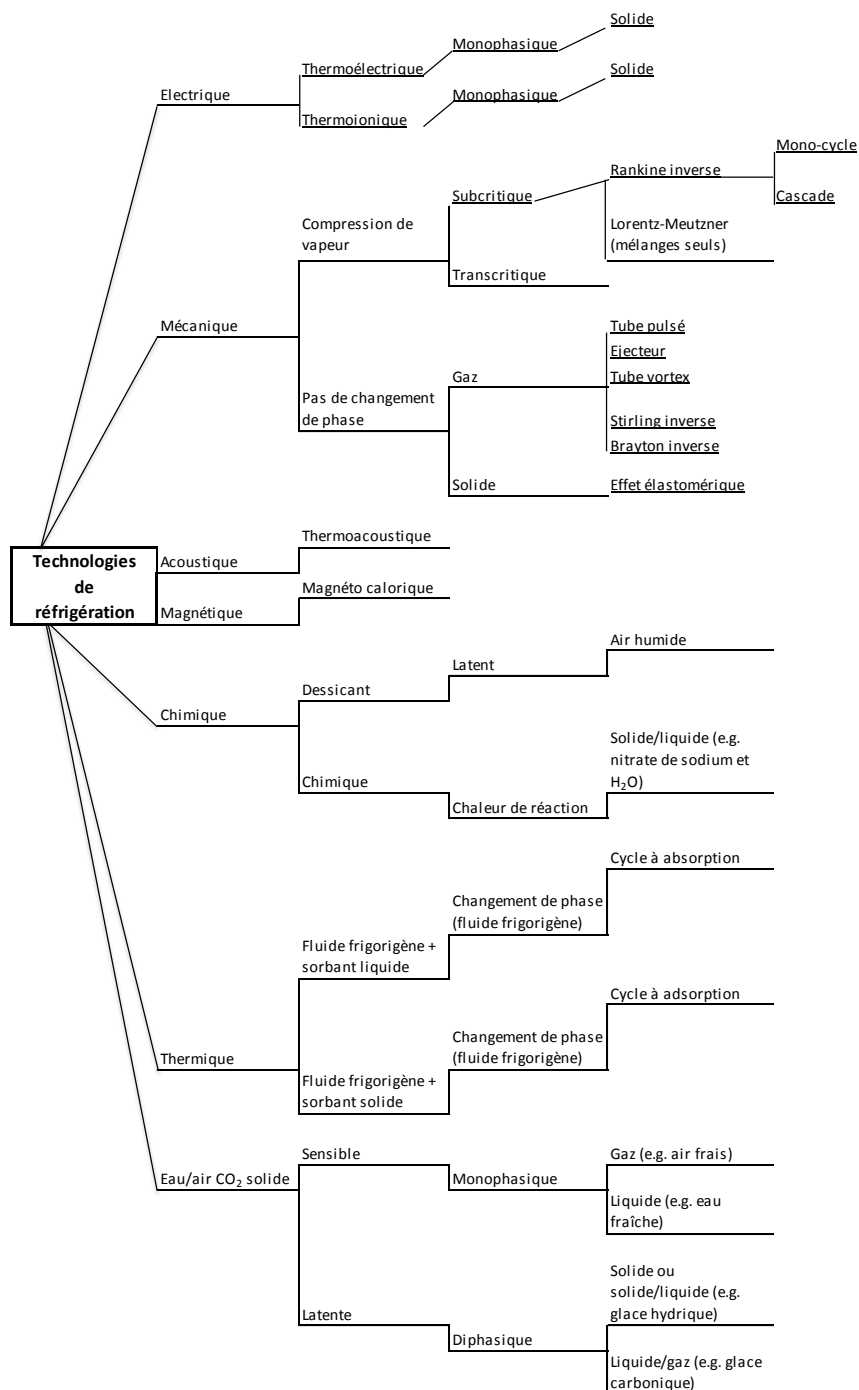


Figure 6.1 Structuration par principe physique des systèmes de réfrigération (Brown 2011)

Comme le fait voir la figure 6.1, la production de froid peut se faire par des procédés de conversion électriques, mécaniques, acoustiques, magnétiques, chimiques et thermiques. Cette variété a amené à des développements de niche pour certaines technologies, mais une technologie couvre massivement presque toutes applications : la compression de vapeur de fluides à changement de phase. On retrouvera aussi le changement de phase dans les procédés à absorption adsorption et par stockage et déstockage solide-liquide ou solide-vapeur.

Les technologies qui ont déjà des applications ou qui font l'objet de recherche significatives sont décrites dans les sections suivantes.

Ref. J.S. Brown, P.A. Domanski. *Alternative cooling technology options. ICR 2011, August 21-26, Prague, Czech Republic.*

6.1.1 Machine frigorifique à absorption

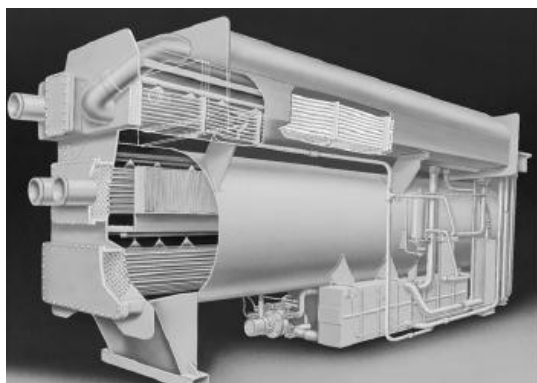


Figure 6.2 Machine à Absorption LiBr (Trane)

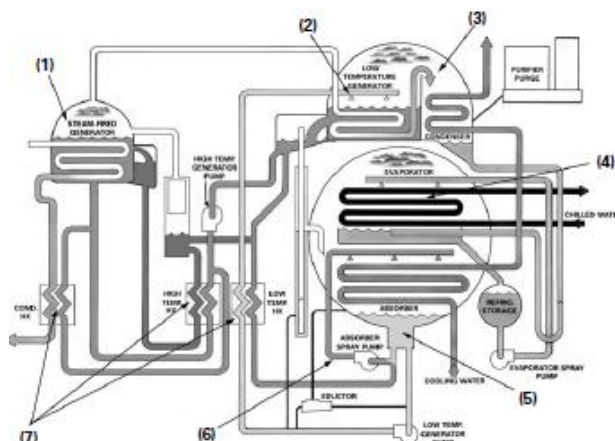


Figure 6.3 Schéma de principe d'une machine à double effet (Trane)

Les machines à absorption existent depuis l'invention des machines frigorifiques (autour de 1850)., L'absorption a précédé les systèmes à compression. Les deux couples, frigorigène et absorbant, qui ont dominé le marché des machines à absorption et qui dominent encore sont :

- l'eau comme frigorigène et la solution eau-bromure de lithium comme absorbant
- l'ammoniac comme frigorigène et la solution eau-ammoniac comme absorbant.

Eau –Bromure de Lithium

Les groupes refroidisseurs d'eau (GRE) à absorption eau-bromure de lithium sont en général des machines de puissances supérieure à 350 kW froid et jusqu'à plusieurs mégawatts (cf. figure 6.2). Les seules exceptions sont les machines produites par le groupe YASAKI dont les machines commencent autour de 50 kW froid. Les machines eau-bromure de lithium évaporent de l'eau à 2 °C et fonctionnent donc sous vide partiel (7 millibar), ce qui implique des volumes très importants car la masse volumique de la vapeur d'eau à 2 °C est de 5 g/m³.

Comme l'indique les documents de TRANE qui fabrique aussi bien des GRE à absorption qu'à compression, l'absorption représente de l'ordre de 0,5 % du marché mondial des GRE de grande puissance.

Tableau 6.1 Vente des machines à Absorption eau – Bromure de lithium en Chine (Chen 07)

Year	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Direct-fired type	1230	1341	1529	1352	2091	2385	3052	2785	4200	5600
Total	3249	3575	2780	2600	3289	3845	4320	3838	5500	6917

Comme le fait voir le tableau 6.1 des ventes annuelles de GRE eau-bromure de lithium, la Chine à l'instar du Japon et de la Corée produit et utilise un parc de plusieurs dizaines de milliers de ces GRE ; la moitié sont des machines utilisant un brûleur gaz (tableau 6.1 – « direct-fired »), les autres fonctionnent avec de la vapeur d'eau comme source de chaleur. A noter que l'efficacité énergétique de tels groupes pour une température d'évaporation de 2 °C et une condensation à 35 °C varie entre 1 et 1,2. Pour ces trois pays, les machines à absorption permettent de climatiser en utilisant directement le réseau gaz ou les utilités industrielles et non pas le réseau électrique aux heures de pointe. Le Japon dans les années 80 a fait un énorme travail d'amélioration de l'efficacité de ces machines avec les systèmes double effet faisant

passer l'efficacité énergétique de COP 0,7 à 1,1. Il faut pour cela 11 échangeurs et le bouilleur fonctionne aux alentours de 170 °C. Avec ces performances énergétiques l'asymptote est quasiment atteinte avec l'eau-bromure de lithium car les machines triple effet requièrent 17 échangeurs et la température maximale est de l'ordre de 225 °C et le COP autour de 1.4.

Ammoniac - Eau

On doit noter que pour l'eau-ammoniac, une mise en œuvre particulière existe dite à absorption-diffusion – eau + ammoniac + une pressurisation à l'hydrogène pour les réfrigérateurs domestiques utilisés en hôtellerie (pour limiter le bruit), en camping (fonctionnement 12 ou 24 V) et fonctionnement éventuel sur brûleur gaz. Le marché reste à peu près constant, autour de 1 million d'unités par an, et Electrolux reste une marque de référence sur cette niche qu'il faut comparer aux 110 millions de réfrigérateurs à compression vendus dans le monde en 2012. Ces réfrigérateurs ne peuvent pas rentrer en compétition sur le marché généraliste du froid domestique compte tenu de leur très faible efficacité énergétique.



Figure 6.4 Réfrigérateur à absorption diffusion eau-ammoniac de 31 l

A partir de la technologie SERVEL des années 70, Robur a développé des machines de climatisation à absorption ammoniac-eau qui peuvent aussi fonctionner en pompe à chaleur, le marché est de l'ordre de cinquante à cent machines/an. A noter que le coefficient de performance frigorifique est de l'ordre de 0,7. A noter aussi que l'engineering allemand Borsig, qui était spécialisé dans les machines ammoniac-eau de grandes puissances (plusieurs MW froid) pour faire du froid, y compris à -40 °C, ne met plus ces machines au catalogue.

Il faut souligner que du point de vue énergétique deux créneaux existent :

- la récupération / transformation de chaleur fatale
- le froid solaire.

Ce dernier créneau se relance lentement et voit la création de start-ups en Europe qui visent à ces développements. On trouvera majoritairement des machines à absorption (70 %) ; le marché mondial est estimé à 700 machines / an (BOU13).

Les fabricants de machines Eau –Bromure de lithium : Une vingtaine d'entreprises chinoises, TRANE, CARRIER, YORK, EBARA, HITACHI, KAWASAKI, HUNDAI...

Les fabricants de machines Eau –Ammoniac : Electrolux et quelques compétiteurs pour les petits réfrigérateurs mini-bar et camping. Robur pour la climatisation / pompe à chaleur

Les coûts des machines sont plus élevés d'où le positionnement sur des niches

Références

Guangming Chen, Yijian HE. 2007. The latest progress of absorption refrigeration in China. International Congress of Refrigeration, Beijing, China. Paper ICR07-b2-174.

Trane Horizon Absorption Series. 2001. Two-stage steam-fired or hot water absorption water chillers. Documentation commerciale ABS-PRC004-EN.

B. Thonon. European project EIE/06/072 / S12.444283. Promotion of efficient heat pumps for heatings (ProHeatPump). Report on renewables and heat pumps. WP 5, Deliverable n° 19.

6.1.2 Machine frigorifique à adsorption

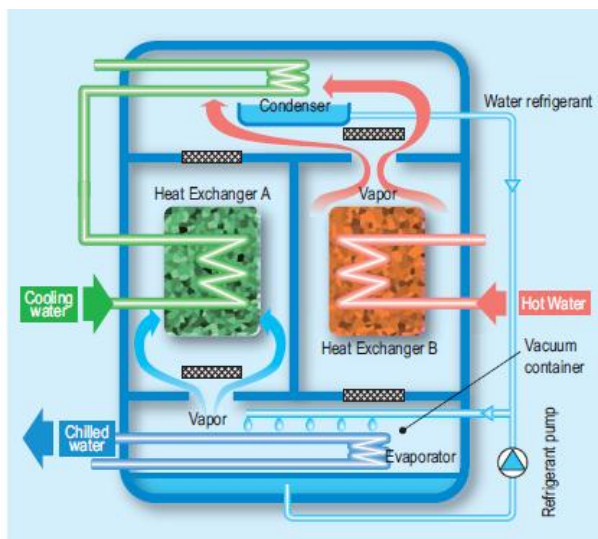


Figure 6.5 Principe d'un système à adsorption



Figure 6.6 Machine à adsorption MYCOM

Les machines à adsorption ont partie liée avec le solaire ou la récupération d'énergie thermique fatale car l'efficacité énergétique (rapport de la puissance frigorifique à la puissance thermique fournie) est faible, de l'ordre de 0,6, mais l'intérêt est qu'elle valorise de la chaleur à faible niveau de température de 70 à 80 °C. Comme le fait voir la figure 6.5, le système comporte une matrice solide qui peut être soit de l'aérogel de silice, soit une zéolithe. Cette matrice solide adsorbe de la vapeur d'eau quand elle est refroidie et désorbe la vapeur d'eau piégée dans la matrice solide lorsqu'elle est chauffée. On comprend par cette simple description qu'il y a une perte énergétique majeure lorsqu'il faut refroidir la matrice qui vient juste d'être chauffée. D'où un des perfectionnements possibles en faisant fonctionner le système à adsorption avec au moins 4 échangeurs et non pas 2 pour récupérer une partie des énergies de chauffage et refroidissement. La figure 6.6 montre le côté massif de ces installations qui fonctionnent bien sûr sous vide puisqu'elles évaporent de l'eau.

La marque Mayekawau (Mycom) présente à la fois la variation des performances (cf. figure 6.7) mais aussi les caractéristiques des machines : une machine produisant 100 kW de froid à 15 °C soit à 17 millibar, utilise de la chaleur à 68 °C mais a besoin de 50m³/h d'eau au condenseur pour évacuer la chaleur à 27 °C et pèse 6,6 tonnes !

A 200 kW : 10 tonnes et à 430 kW : 25 tonnes.

Il faut donc disposer de beaucoup de chaleur perdue à 70 °C pour valoriser un tel investissement.

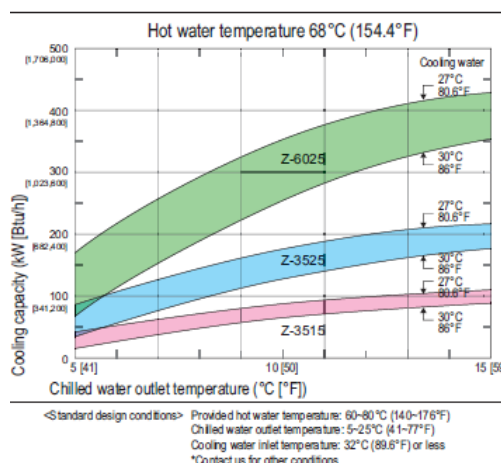


Figure 6.7 Variation de la puissance frigorifique en fonction de la température

Les fabricants de telles machines sont : MAYEKAWA, Weatherite, et des start-up comme SORTECH

Les usages sont :

- le froid solaire
- la récupération de chaleur perdue à basse température

Les coûts des composants sont élevés car :

- le fonctionnement en dépression implique des épaisseurs significatives car il faut de grands volumes
- la masse significative d'aérogel de silice ou de zéolithe car l'ordre de grandeur pour les fonctionnements mono-étagés est de 1 kg de zéolithe pour adsorber 50 g de vapeur d'eau ; ce chiffre peut passer à 100 g de vapeur d'eau /kg d'adsorbant pour des systèmes bi-étagés.

Marché mondial actuel de l'ordre de 60 à 80 machines /an

Références

F. Boudéhen. 2014. Etat des lieux de la climatisation solaire. Rassemblement CQP – Juin 2014.

S. Jribi, I.I. El-Sharkawy, S. Koyama, B.B. Saha. 2010. Study on activated carbon-CO₂ pair : adsorption characteristics and cycle performance. International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Tehchnology, 17-19 February 2010, Tokyo, Japan.

MAS Uyun, T. Miyazaki, Y. Ueda and A. Akisawa. 2010. Numerical Analysis of Double Effect Adsorption Refrigeration Cycle Using Silica-Gel/Water Working Pair. International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Tehchnology, 17-19 February 2010, Tokyo, Japan.

E.E. Vasilescu, R. Boussehain, M. Feidt, A. Dobrovicescu. 2008. Analyse exergétique comparative des systèmes frigorifiques à adsorption à un ou deux étages à simple ou double effet. Termotehnica 2/2008.

AdRef-Noa. Adsorption chiller with zeolite. Commercial documentation Mycom.

6.1.3 Machine frigorifique à cycle de Brayton

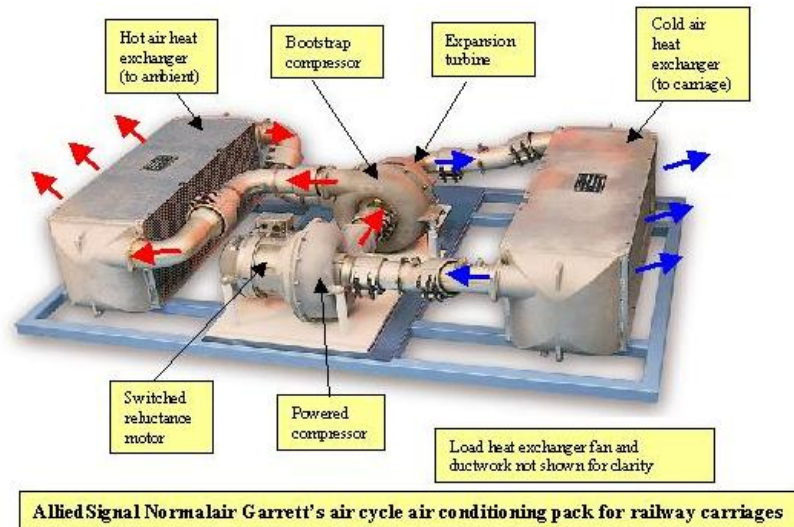


Figure 6.8 Système Brayton pour la climatisation ferroviaire (Garrett)

Les systèmes de climatisation basés sur le cycle de Brayton-Joule à air ont des systèmes développés pour toute l'aviation civile depuis les années 50. Ces systèmes sont intégrés dans le système de gestion de la pressurisation, de la température et de l'hygrométrie de la cabine. Les points essentiels étant la légèreté du système de turbo-compression et non pas la performance énergétique. A noter qu'il existe des systèmes Brayton pour les cycles cryogéniques à la fois pour la liquéfaction du méthane pour de faibles débits ($< 2000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ de méthane) et pour des applications spatiales à -200°C .

Des constructeurs de ces machines pour l'aviation, comme Garrett ou Liebherr, ont développé dès la fin des années 90 de tels systèmes pour la climatisation des trains ICE avec des commandes de l'ordre de 100 unités.

Le cycle Brayton à air est très facilement calculable et ses performances dépendent des températures de source et de puits comme tout système thermodynamique et des efficacités des compresseurs et des turbines.

Comme on le voit figure 6.9, qui indique la performance énergétique pour des rendements de turbine et de compresseur de 0,9, pour un écart de température, de seulement 12°C , soit un taux de compression de 2, le COP est de 1,5 et surtout ce COP baisse significativement avec l'augmentation du taux de compression, ce qui est directement lié à l'accroissement de l'écart de températures source / puits.

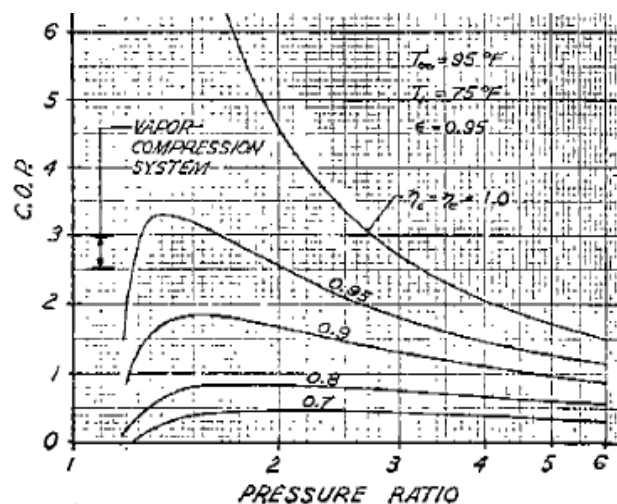


Figure 6.9 Variation de la puissance frigorifique en fonction de la température (Scott 76)

Les fabricants de telles machines sont : Garrett, Liebherr pour l'aviation et les trains ICE et pour les basses températures Air Liquide et ses compétiteurs.

Les usages habituels sont :

- Climatisation des avions
- Applications cryogéniques de quelques dizaines de W

Les coûts des composants sont a priori du même ordre de grandeur pour les systèmes de climatisation ferroviaire.

Marchés potentiels : la généralisation de la technologie pour la climatisation des trains n'est pas vérifiée.

Références

Liebherr-Aerospace & Transportation SAS. 2011. Air Cycle Air Conditioning Technology On Board the ICE 3. Documentation.

S. Engelking, H. Kruse. 1996. Development of Air Cycle Technology for Transport refrigeration. International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue. Paper 348.

A. Gigiel, T. Brown, D. Holder, and P. Fitt. 1995. Cycles à air pour les systèmes frigorifiques et les pompes à chaleur. IIF/IIR Bulletin 95-4.

T.C. Scott, G.L. Davis. 1976. Thermodynamics of Air/Water-Cycle Air-Conditioning Systems. International Compressor Engineering Conference at Purdue University. Paper 229.

6.1.4 Machine frigorifique Stirling



Figure 6.10 Glacière à système Stirling
Coleman



Figure 6.11 Module Stirling de Twinbird

Une des premières machines frigorifiques développée l'a été par Philips en 1950. Par la suite, les applications se sont dirigées vers les basses températures, les systèmes Stirling étant particulièrement bien adaptés pour les grands écarts de températures entre la source et le puits. La société Stirling Cryogenics a commercialisé plus de 3 000 de ces systèmes basse température (de -80 à -200 °C) pour des puissances allant de quelques dizaines de kW à quelques milliers.

Pour les applications en réfrigération, la machine à piston libre développée par Sunpower dans les années 70, avec des puissances variant de 35 W à 7,5 kW. Depuis 2002 l'entreprise japonaise Twinbird commercialise différents modules (cf. figure 6.11). Ces modules peuvent être intégrés par exemple dans des glacières portables (cf. figure 6.10). Les modules Stirling ont été développés préférentiellement pour des puissances de quelques centaines de watts, une des limitations étant les surfaces réduites des « bouts » chaud et froid des machines Stirling. Ces tailles réduites sont intrinsèques au procédé.

Les puissances frigorifiques obtenues varient de quelques **dizaines de W à presque 10 kW** pour les applications frigorifiques « classiques ». Pour les refroidisseurs cryogéniques de -80 à -200 °C, les puissances vont jusqu'à plusieurs mégawatts froid. Pour un écart de températures entre la source froide et le puits chaud de 100 °C avec une production frigorifique de -80 °C, **le COP est de l'ordre de 0,3**, et pour **une température de -20 °C, le COP est de l'ordre de 0,6**, ce qui est de fait inférieur aux cycles à compression de vapeur.

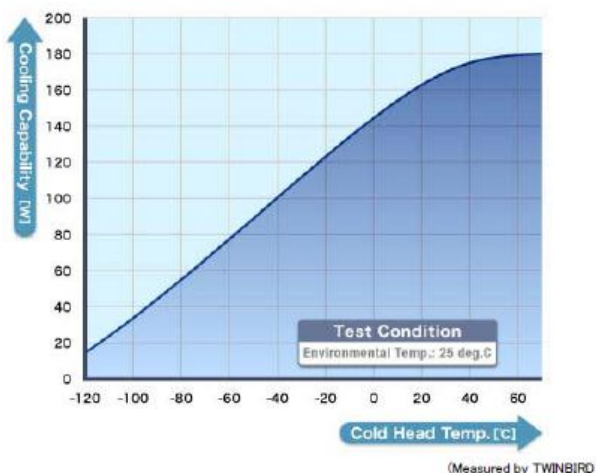


Figure 6.12 Variation de la puissance frigorifique en fonction de la température

Les fabricants de telles machines sont : Twinbird, Sunpower, Stirling Cryogénics

Les usages habituels sont :

- applications cryogéniques médicales industrielles, biologie, ...
- applications frigorifiques : glacières portables

Les coûts des composants sont plutôt élevés car fonctionnement à haute pression avec des matériaux nobles.

Marchés potentiels : le petit froid commercial

Références

D.M. Berchowitz. 1992. Free-Piston Stirling Coolers. International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue University. Paper 171.

M.J. Fabien. 1991. Evaluation of the free-piston Stirling cycle for domestic cooling applications. XVIIIe Congrès international du froid, Montréal, Québec, Canada. 10-17 Août 1991.

FPSC. SC-UE15 150W Type FPSC Module.
http://fpsc.twinbird.jp/legacy/en/sc_ue15_mod_e.html. 2013/08/09.

Coleman Stirling Power Cooler. <http://coleman.com/product> 2013/08/09.

6.1.5 Machine frigorifique à tube pulsé



Figure 6.13 Tube pulsé
(Sumitomo)

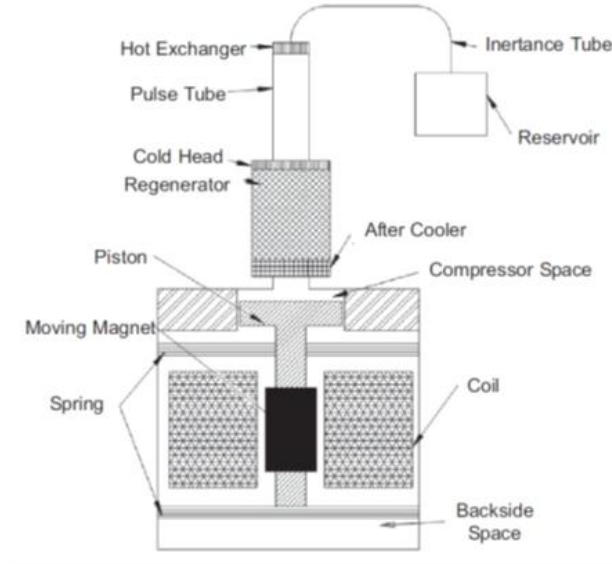


Figure 6.14 Coupe d'un tube pulsé de type
« Stirling » (X. Wang)

Les tubes pulsés cryogéniques constituent une technologie mature depuis le début des années 90 où les performances énergétiques ont rejoint celles des systèmes cryogénique Stirling. On peut considérer que les tubes pulsés constituent au moins 50 % du marché actuel des cryostats ou réfrigérateurs cryogéniques dont les températures se situent autour de -200 °C et jusqu'à -270 °C.

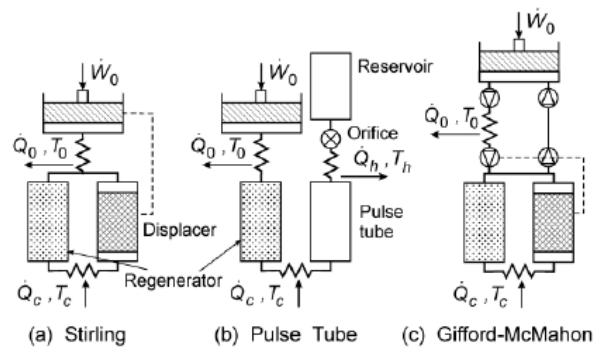


Figure 6.15 Analyse comparative des 3 systèmes cryogéniques qui se partagent le marché des cryostats (extrait de R. Radebaugh 00)

Le principe du tube pulsé à orifice s'explique assez simplement par comparaison aux systèmes Stirling et Gifford-Mac Mahon, le simple volume du tube pulsé remplace le déplaceur des autres systèmes. Le débit gazeux oscillant passant à travers l'orifice situé en aval du tube et en amont d'un réservoir. Cet ensemble volume du tube pulsé, orifice et réservoir a le même effet que le déplaceur des 2 autres systèmes, à savoir séparer le bout chaud et le bout froid. Le cycle est le suivant :

- 1 Compression de l'hélium dans le tube pulsé
- 2 Ecoulement du gaz comprimé à travers l'orifice et rejet de la chaleur au bout chaud situé en amont de l'orifice
- 3 Aspiration de l'hélium et détente de l'hélium dans le tube pulsé

- 4 Transfert du gaz froid vers le bout froid (an aval du régénérateur) via la surpression provenant du réservoir

Les puissances frigorifiques varient de 1 à 100 kW à des températures de l'ordre de - 200 °C

Les COP référés à Carnot sont de l'ordre de 5 à 10 %

Les écarts de températures accessibles varient de 220 à 280 K

Les fabricants de telles machines sont : Cold Edge, Sumitomo, Cryomech, Air Liquide, Linde, Thales Aerospace

Les marchés sont :

- les cryostats pour les cryo-pompes nécessaires à la fabrication de semi-conducteurs, soit un marché de 20 000 cryostats /an encore dominé par les Cryostat Gifford - McMahon
- les applications d'observations satellitaires, 500 à 1000 cryostats par an, puissance 1 à 2 W
- les applications médicales
- la liquéfaction du gaz naturel (démonstration en préparation)

Les coûts des machines se situent entre 30 k€ et 80 k€ selon les puissances

Références

X. Wang, W. Dai, J. Hu, E. Luo, and L. Zhou. 2011. Performance of a Stirling-type pulse tube cooler for high efficiency operation at 100 Hz. . International Cryocooler Conference Inc. Boulder CO. USA.

D.R. Brown, J.A. Dirks, N. Fernandez, T.B. Stout. 2010. The Prospects of Alternatives to Vapor Compression Technology for Space Cooling and Food Refrigeration Applications. Report prepared for the US DOE. Ref. PNNL-19259.

J.S. Brown and P.A. Domanski. 2011. Alternative cooling technology options. ICR 2011, August 21-26, Prague, Czech Republic. ID: 214.

P. Duthil. 2007. Un réfrigérateur sonore. IPN Science n° 11, p. 26-30. Novembre 2007.

W.E. Gifford and R.C. Longworth. Pulse Tube Refrigeration Progress. Adv. in Cryogenic Engineering, Vol. 10, Plenum Publishing Corp., New York (1965), pp. 69-79.

I. Paek, J.E. Braun, and L. Mongeau. 2006. Evaluation of Thermoacoustic Cycles for Cooling Applications. International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 17-20, 2006. R130.

R. Radebaugh. 2000. Development of the Pulse Tube Refrigerator as an Efficient and Reliable Cryocooler. NIST.

S. Rotundo, G. Hughel, A. Rebarchak, Y. Lin, B. Farouk. 2007. Cryocoolers 14, edited by S.D. Miller and R.G. Ross, Jr. International Cryocooler Conference Inc. Boulder CO. USA.

6.1.6 Machine frigorifique thermo-acoustique

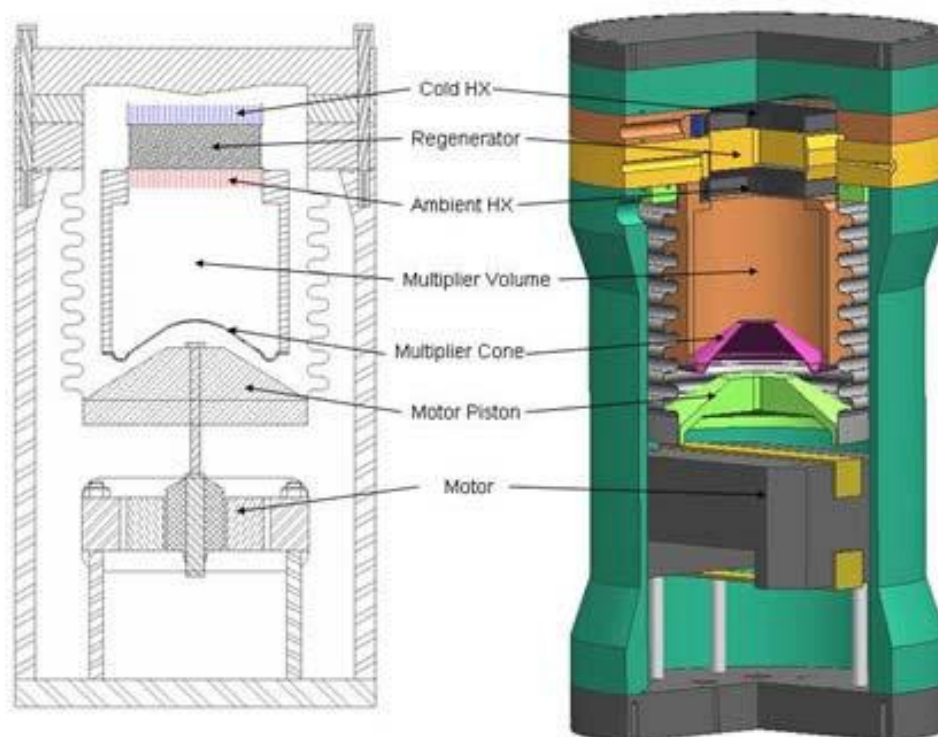


Figure 6.16 Congélateur thermoacoustique Ben & Jerry's (Pen State university)

Le froid thermo acoustique consiste à organiser le transfert de chaleur d'un fluide en résonance acoustique (échauffement à la compression du gaz par l'onde acoustique, refroidissement lors de la détente) vers une structure solide isolante (figure 6.16 : Regenerator et figure 6.17 paroi). Ce transfert va créer **un** gradient thermique qui va permettre de générer un « bout » chaud (figure 1 : ambient Hx) et un « bout » froid (Cold Hx)

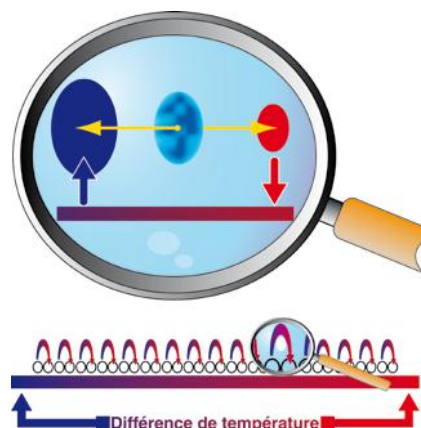


Figure 6.17 Principe de la compression/ détente du gaz par l'onde thermoacoustique et échange avec la paroi (P. Duthil)

Le système consomme de l'énergie acoustique générée par le résonateur acoustique qui est mu électriquement et développe un cycle qui se rapproche du cycle Stirling, à savoir deux évolutions isochores (l'une de détente, l'autre de compression) et deux évolution de transfert de chaleur dites « isothermes ». Bien sûr les évolutions isothermes sont idéales et les transferts de chaleur se font avec des écarts de température.

L'effet thermo-acoustique est connu depuis le 19^{ème} siècle mais la thermo-acoustique pratique n'a commencé qu'à partir de 1960, par les calculs de N. ROTT et sont liés aussi aux travaux sur les tubes pulsés qui en fait s'effectuent à plus basse fréquence. Mais les développements continus se font à l'université de PEN State sous la houlette de S. Garrett. En 2003, cette équipe a réalisé un congélateur démonstrateur « Ben's & Jerry » dont on peut analyser les performances tableau 6.2 aux côté de deux prototypes, l'un pour l'espace STAR (1992) et TALSR (1991).

Tableau 6.2 Performances de systèmes thermo-acoustiques (source G. Pénelet 2010)

	S.T.A.R.	T.A.L.S.R	« Ben & Jerry's » Fridge
ΔT (K)	<80	<50	<50
Q_c (W)	<5	260	120
COPR (%)	20	40	19
Working Fluid	97% He, 3% Ar 10 Atm. (1 MPa)	89% He, 11% Xe 20 Atm.	He 10 Atm.

Comme on peut le constater :

- les puissances frigorifiques des démonstrateurs sont de quelques dizaines à quelques centaines de Watts
- les COP référés à Carnot sont de l'ordre de 20 % et peuvent d'élèver à 40 %
- les écarts de températures accessibles par des prototypes de 50 à 80 °C

Les fabricants de telles machines sont des sociétés de R&D (Hekyom en France) ou des laboratoires (LAUM).

Les démonstrations ont été faites dans une quinzaine de laboratoires dans le monde.

Les usages potentiels sont : le petit froid commercial, mais aussi des systèmes de grandes tailles pour la liquéfaction du gaz naturel.

Les coûts des composants sont : plutôt du côté « high Tech »

L'estimation des marchés potentiels porte sur la production d'électricité par le cycle thermo-acoustique moteur par récupération de chaleurs perdues et pour la production d'électricité à bord de satellites.

Références

G. Pénelet. 2010. Introduction à la thermoacoustique. Journées thématiques « Machines thermoacoustiques : contribution au développement durable ». Paris, 10 décembre 2010.

P. Duthil. 2007. Un réfrigérateur sonore. IPN Science 11 (2007) 26-30.

G. Poignand. 2006. Réfrigérateur thermo-acoustique : Etude du système compact et du comportement transitoire. Thèse de doctorat de l'Université du Maine, Le Mans, France.

I. Paek, J.E. Braun, L. Mongeau. 2006. Evaluation of thermoacoustic cycles for cooling applications. International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 17-20, 2006. R130.

M.E. Poese and S.L. Garrett. 1998. Performance measurements on a thermoacoustic refrigerator driven at high amplitude. The Pennsylvania State University. Technical Report no. TR98-003.

R. Starr, P.K. Bansal, R.W. Jones, B.R. Mace. 1996. The Reality of a Small Household Thermoacoustic Refrigerator. International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, 1996. Paper 344.

6.1.7 Machine frigorifique magnétocalorique

L'effet magnétocalorique (EMC) est un effet qui est associé à l'exposition, puis au retrait d'un matériau magnétique dans un champ magnétique. Cet effet a été mis en évidence en 1881 par Warburg. Cette description sommaire implique que soit le matériau magnétique circule alternativement dans et hors champ magnétique, ce qui est possible avec des slurries comportant en suspension des matériaux magnétiques, soit que l'aimant, de préférence permanent, change de position de manière alternée. Il existe de tels dispositifs rotatifs.

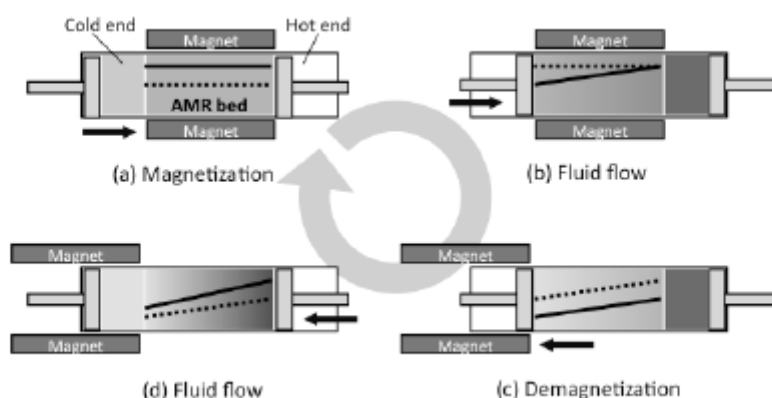


Figure 6.18 : Principe du froid magnétique (Kawanami 2010)

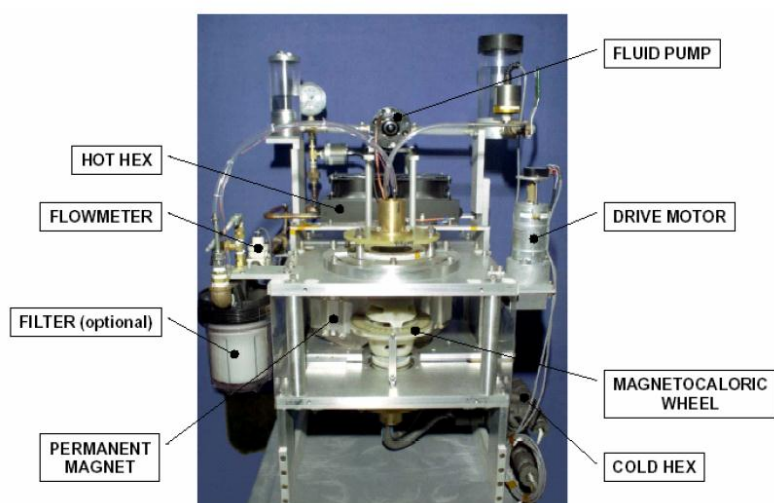


Figure 6.19 : Principe du froid magnétique (Astronautics Corporation of America)

La figure 6.18 montre le cycle de fonctionnement qui est un cycle de transfert de chaleur alterné (exothermique puis endothermique) en étant **dans** puis **hors** du champ magnétique et la figure 6.19 montre un des premiers prototypes.

Le matériau magnétique sélectionné pour fonctionner à des températures proches de l'ambiance est le gadolinium ou des alliages de ce matériau.

Il est à noter qu'il faut des champs magnétiques d'au moins 2 Tesla avec des aimants permanents pour obtenir des résultats significatifs. Pour obtenir de telles intensités magnétiques, la qualité des matériaux et l'utilisation de terres rares est indispensable, ce qui amène obligatoirement à effectuer une analyse de cycle de vie des matériaux utilisés. Il en va de même du gadolinium qui est aussi une terre rare. Les recherches matériaux portent justement sur le remplacement du gadolinium par d'autres alliages. Le coefficient de performance est très sensible aux écarts de températures qui sont liés à la fois au point de

curie du matériau et à la variation de susceptibilité magnétique du matériau en fonction de la température.

La puissance frigorifique obtenue jusqu'à alors est de l'ordre de 1 kW.

La puissance électrique fournie est de 800 W pour produire ce kW, **pour un écart de températures** de 12 °C **entre la source et le puits** selon les données publiées par Engelbrecht.

Le COP est de 1,2 tel que mesuré. Les COP envisagés, en prenant en compte l'ensemble des auxiliaires, sont du même ordre de grandeur que ceux des systèmes à compression de vapeur.

L'entreprise française Cooltech, qui existe depuis 2003, vient de faire une levée de fonds de 8 M€ pour le développement du froid magnétique et revendique un effectif de 30 personnes. Pour l'instant, aucun prototype fonctionnel n'a été présenté. Sur l'échelle TRL (Technologie Readiness Level) qui comporte neuf niveaux, TRL 1 étant la preuve de concept élémentaire et TRL 9 l'industrialisation, le froid magnétique est à un TRL de 2 à 3.

Entreprises de R&D de tels systèmes : Astronautics Corporation of America, Cooltech, Chudu Electric Power,...

Les usages habituels sont : il n'existe pas d'usage industriel actuel.

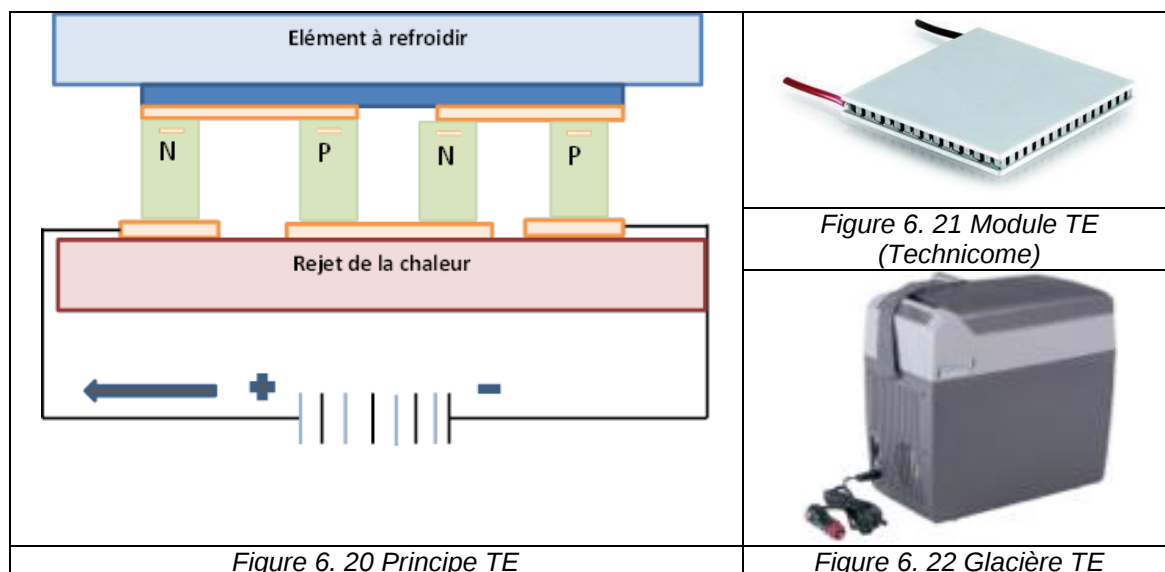
Les coûts des composants sont élevés compte tenu de la nature des matériaux.

Le champ d'application potentiel est le petit froid commercial à température positive pour les produits.

Références

- [Bou08] Houssem Rafik El-Hana BOUCHEKARA. Recherche sur les systèmes de réfrigération magnétique. Modélisation numérique, conception et optimisation. Thèse de Génie électrique, Institut Polytechnique de Grenoble. 2008
- [Dea84] D.D. DEARDORFF and D.L. Johnson. Magnetic Refrigeration Development. TDA Progress Report 42-78. April-June 1984.
- [Ego07] Peter W. EGOLF, Andrej Kitanowski, Didier Vuarnoz, Marc Diebold, Christophe Besson. An introduction to magnetic refrigeration. International Congress of Refrigeration, Beijing, 2007.
- [Eng06] Kurt L. ENGELBRECHT, Greg. F. Nellis, Sanford A. Klein. Predicting the performance of an active magnetic regenerator refrigerator used for space cooling and refrigeration. HVAC&R Research, Vol.12, no. 4, October 2006.
- [lif07] Le froid magnétique à température ambiante. 20^{ème} Note d'information de l'IFF sur les technologies du froid. Bulletin IIF IIR 2007-5.
- [May11] Charlotte MAYER. Nouveaux matériaux magnétocaloriques pour la réfrigération magnétique. Thèse en Physico-chimie de la matière condensée. Université Bordeaux 1. 2011
- [Row05] Andrew ROWE, Armando Tura, John Dikeos, and R. Chahine. Near room temperature magnetic refrigeration. Proceedings of the International Energy Conference – IGEC-1, Waterloo, Ontario, Canada, June 2005. Paper 084.

6.1.8 Machine frigorifique thermoélectrique (TE)



Le froid thermoélectrique est basé sur le principe (cf. figure 6.20) d'associer en série électriquement des couples P et N de matériaux semi-conducteurs usuellement du tellure de bismuth (Bi_2Te_3). Le matériau de type N est dopé de telle manière à avoir des électrons en excès, alors que ceux de type P sont dopés de manière à être déficients en électrons. Le flux de chaleur est déplacé par le flux d'électrons de telle manière que le refroidissement thermique de la liaison P vers N et le rejet de chaleur de N vers P associent les modules TE thermiquement en parallèle alors qu'ils sont électriquement en série. Les modules commercialisés (cf. figure 6.21) ont **des puissances thermiques, évaluées à un écart de températures nul**, qui varient de 5 à 100 W. En effet l'usage de refroidissement le plus usuel des modules thermoélectriques est le refroidissement de composants électroniques qu'il faut maintenir à une température ambiante donnée. La puissance de refroidissement est faible, au mieux quelques centaines de watts, et l'efficacité énergétique décroît très vite avec l'écart de températures. C'est la raison pour laquelle sont commercialisés des équipements comme les glacières électriques de 12/24 V d'une contenance de 10 à 15 l (cf. figure 6.22) dont la puissance frigorifique typique est de 20 W pour un écart de températures d'une vingtaine de degrés Celsius.

La caractéristique essentielle d'un matériau thermoélectrique est définie par le facteur de mérite Z :

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \lambda} T$$

Avec :

α : coefficient de Seebeck (en V/K)	ρ : résistivité électrique ($\Omega \cdot m$)	λ : conductivité thermique ($W/m \cdot K$)
--	--	--

La valeur typique des facteurs de mérite est de 1. Les coefficients de Seebeck typiques sont de l'ordre de 0,2 V/K ; on vérifie donc qu'on se situe dans des niveaux énergétiques faibles. De plus, les coefficients de performance relativement à Carnot sont de l'ordre de 10 à 15 % au mieux alors que les systèmes à compression de vapeur standards sont autour de 50 %.

Comme le fait voir la figure 6.23, la puissance thermique varie de manière quasi logarithmique avec le courant et indique une saturation rapide de l'augmentation de puissance. Le facteur le plus important est l'écart de températures, plus il est faible, plus la puissance peut l'être à courant circulant égal.

La figure 6.24 indique des COP inférieurs à 1,5 dès que l'écart de températures entre les bouts chaud et froid est de 20 °C. De plus, comme le fait voir la figure 6.21, les modules présentent

une petite surface qui requiert souvent l'usage d'un liquide secondaire pour transférer l'énergie à l'air pour des volumes de taille supérieure à quelques litres.

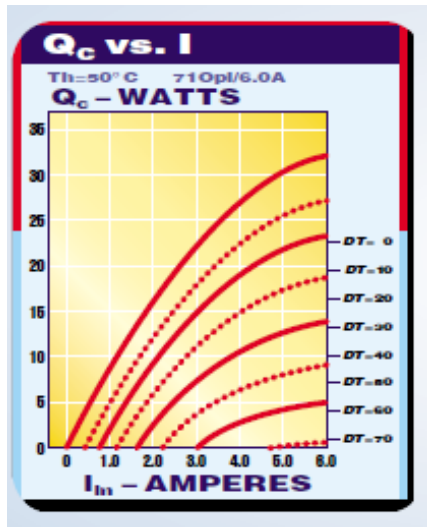


Figure 6.23 Variation de la puissance thermique en fonction de l'ampérage et de l'écart de température (Otey et Moskowitz)

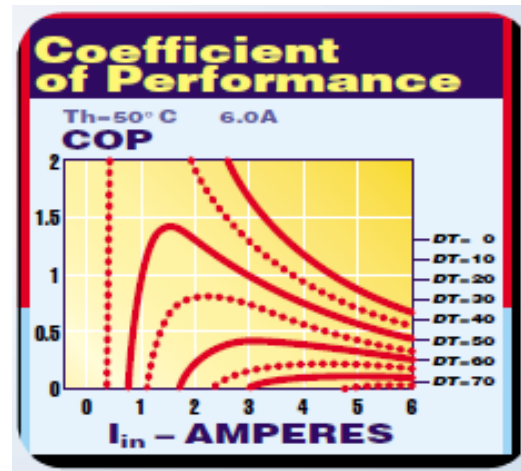


Figure 6.24 Variation du COP en fonction de l'ampérage et de l'écart de température (Otey et Moskowitz)

Les fabricants de modules sont nombreux : Ferrotec, Kryotherm, DBK, Laird Technologies, CUI Inc., Analog Technologies, Fisher Elektronik, Photonik product ...

Ils sont soit fabricants de modules multi-applications, soit spécialisés en refroidissement de composants électroniques ou de sources laser.

Il existe des fabricants de glacières et de petits réfrigérateurs (Samsung, mais aussi des fabricants chinois) qui sont des applications de niche.

L'usage habituel est le refroidissement de composants électroniques.

Les coûts des composants sont de l'ordre de 10 à 20 € pour un module thermoélectrique capable de produire 10 W sous 10 °C d'écart de températures.

Estimation des marchés potentiels pour les applications frigorifiques : marché de niche des glacières portables

Références

R. Otey and B. Moskowitz. 2001. Thermoelectric coolers offer efficient solid-state heat-management options. From OE Magazine March 2001.

J.G. Stockholm. Génération thermoélectrique. 2002. Energie portable : autonomie et intégration dans l'environnement humain. 21-22 mars 2002, Cachan. Journées Electrotechniques du Club EEA. ISBN 2-909968-10-3. P. 35-42.

J. Yu, B. Wang. 2009. Enhancing the maximum coefficient of performance of thermoelectric cooling modules using internally cascaded thermoelectric couples. International Journal of Refrigeration 32 (2009) 32-39. Elsevier.

Thermoélectricité. <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=95860001>. Août 2013.

6.1.9 Systèmes à glace carbonique et systèmes à azote liquide

Pour ces systèmes, il y a découplage **entre la production** du vecteur de froid : glace carbonique ou azote liquide **et l'utilisation** de la puissance frigorifique. Dans les deux cas, il s'agit en fait d'un stockage de froid qu'on va utiliser sans se soucier a priori de l'énergie incorporée pour disposer de la puissance frigorifique utile.

Glacé carbonique

Le CO_2 présente un point triple à -56°C et 5,2 bar, ce qui en fait un corps exceptionnel. A pression atmosphérique, il se sublime à -78°C , sa chaleur latente de sublimation est d'environ 580 kJ/kg, ce qui est 175 % supérieur à la chaleur latente de fusion de la glace hydrique. Comme le fait voir la figure 6.25, la glace carbonique est vendue sous différentes formes selon l'utilisation.



Figure 6.25 Différentes formes de glace sèche de CO_2 (Messer)

Tout le transport aérien en soute d'avions cargo se fait par sublimation de CO_2 soit par convection naturelle, soit assisté par système de ventilation.



Figure 6.26 Pelletiseur de glace CO_2 (Cold Jet)



Figure 6.27 Conteneur de glace carbonique (Linde)

Comme le fait voir la figure 6.26, soit il est possible de produire sa propre glace de CO_2 par détente de bouteille de CO_2 , soit de se faire livrer les conteneurs de glace sèche (figure 6.27). Le CO_2 industriel provient principalement du procédé de production de l'ammoniac à partir du procédé Haber-Bosch où 4 molécules de CO_2 sont formées pour une molécule d'ammoniac. Les matières premières du procédé sont le méthane et l'azote. Le CO_2 produit est de très grande pureté (99 %) ; après traitement il est amené à 99,995 %, pureté requise pour la qualité alimentaire.

Evaluation de l'énergie incorporée

La purification suppose une pressurisation qu'on va supposer être la même que celle du transport, à savoir 20 bar. Le CO₂ étant au point de départ à la pression atmosphérique on va supposer une compression bi-étagée avec un compresseur de rendement 75 %, soit une énergie de compression de 320 kJ/kg et une énergie de refroidissement des températures de refoulement à 30 °C effectuée par refroidissement sur tour, évaluée à 30 kJ/kg de 30 °C à -20 °C de 135 kJ/kg (groupe de refroidissement à -25 °C avec un COP fixé à 2,5) soit au total 485 kJ/kg. Il faudrait prendre en compte les pertes de CO₂ dues au maintien de la pression constante par compensation des pertes thermiques qui se font par évaporation, mais les données sont manquantes. Il vient donc **un COP apparent** qui suppose que la chaleur latente de sublimation est entièrement utile. En rapportant cette énergie utile à l'énergie nécessaire à la production de la glace carbonique, il vient :

$$580 / 485 = 1,2$$

On voit que si l'utilisation du froid s'effectue vers -45 °C, ce COP est proche des systèmes à compression de vapeur mais pour maintenir des températures positives, le COP est au moins inférieur d'un facteur 2,5 à 3 comparativement aux systèmes à compression de vapeur.

En conclusion, la glace carbonique est un moyen intéressant pour des transports rapides pour des produits à haute valeur ajoutée. C'est aussi un moyen complémentaire ou de dépannage utile pour préserver des produits à température dirigée ; ces applications sont bien identifiées et limitées.

Système frigorifique à azote liquide

L'utilisation de l'azote liquide est connue dans les procédés agro-alimentaires pour surgeler des produits à haute valeur ajoutée comme les framboises ou plus généralement les fruits fragiles.



Figure 6.28 Schéma de principe d'un système frigorifique dit « indirect » (source Air Liquide)

Compte tenu des réglementations à venir sur les fluides de type HFC, les producteurs d'azote liquide comme Air Liquide, Messer ou Linde proposent chacun des technologies frigorifiques par évaporation d'azote liquide pour le transport à température dirigée (cf. figure 6.28).

Deux concepts coexistent :

- la circulation directe de l'azote dans la caisse frigorifique avec des événements situés à des endroits précis, ce qui requiert une formation adéquate des opérateurs pour éviter l'anoxie
- les systèmes dits indirects comme représenté figure 6. 28 où l'azote refroidit l'air circulant et l'azote évaporé est rejeté à l'extérieur de manière à éviter toute concentration asphyxiante à l'intérieur de la caisse frigorifique. On doit noter que cette technologie modifie le jeu d'acteurs et la répartition de la valeur ajoutée. Les fabricants de caisses frigorifiques captent une valeur ajoutée sur la production frigorifique qui leur échappait et qui revenait aux grands acteurs des systèmes frigorifiques embarqués comme Carrier et Thermoking.

Du point de vue énergétique, il faut rappeler que la production d'1 kg d'azote liquide requiert **2 500 kJ**, sa chaleur latente à -196 °C est de **198 kJ/kg** et la chaleur sensible de -196 à 0 °C est de **160 kJ/kg**, soit un COP de $358 / 2500 = 0,14$ pour maintenir un produit à 0 °C, soit une consommation **environ 30 fois supérieure** à celle d'un système frigorifique à compression de vapeur.

Le froid cryogénique ne se justifie que parce que l'azote est produit de manière fatale avec l'oxygène dans un rapport 1 à 4 et qu'il y a donc un excès d'azote qui fait que son prix ne reflète par l'énergie incorporée. L'utilisation de l'azote liquide restera donc d'un emploi limité pour des applications à haute valeur ajoutée dans les industries agro-alimentaires et pour des niches pour des transports sur des distances de l'ordre de 500 km.

References

Air Liquide. Blueeze, le froid cryogénique au service du transport sous température dirigée. Commercial document.

Cold Jet. <http://www.coldjet.com/en/products/dry-ice-production/>

Messer. Le CO₂ solide. Neige et glace carbonique. Commercial document.

Thermo King Cryotech. Groupes frigorifiques propres, silencieux et efficaces. Commercial document.

7. Synthèse des interviews

Cette section est dédiée à la synthèse des interviews réalisées auprès d'experts ou d'entreprises soit impliquées dans la conception, la fabrication d'équipement frigorifique, soit dans l'exploitation de ces installations frigorifiques.

La méthodologie a reposé sur des échanges soit en face à face, soit en rendez-vous téléphonique avec des acteurs clés. Les entretiens ont été menés en utilisant un questionnaire type figurant en annexe du présent rapport.

7.1 utilisateurs clés, organismes représentatifs et entités apparentées par domaine et sous-secteur

La liste des acteurs clés a été établie par les membres du consortium qui a recensé 30 acteurs répartis comme suit :

- Froid commercial : stand alone : 5
- Froid commercial : remote : 2
- Froid commercial : froid centralisé : 5
- IAA : refroidisseur de lait : 3
- IAA Entreposage : 1
- IAA Process : 3
- Organisations pro/syndicats : 3
- Climatisation : 3
- Chillers : 2
- Producteur et distributeurs de fluides frigorigènes : 3

Les entretiens ont été planifiés et réalisés dans la période allant du 1^{er} août 2013 au 15 novembre 2014. Lors des entretiens, il a été demandé aux entreprises et organismes interviewés de formaliser au maximum leurs dires en produisant à l'appui de leur propos des éléments objectifs tels que :

- des résultats d'études antérieures ;
- des relevés techniques sur les installations en exploitation ;
- des rapports d'essais ou d'expertise tierce partie ou interne.

La liste détaillée des entités ayant participé est donnée en annexe. Les résultats des questionnaires détaillés et des éléments formels transmis lors des enquêtes ne sont pas versés

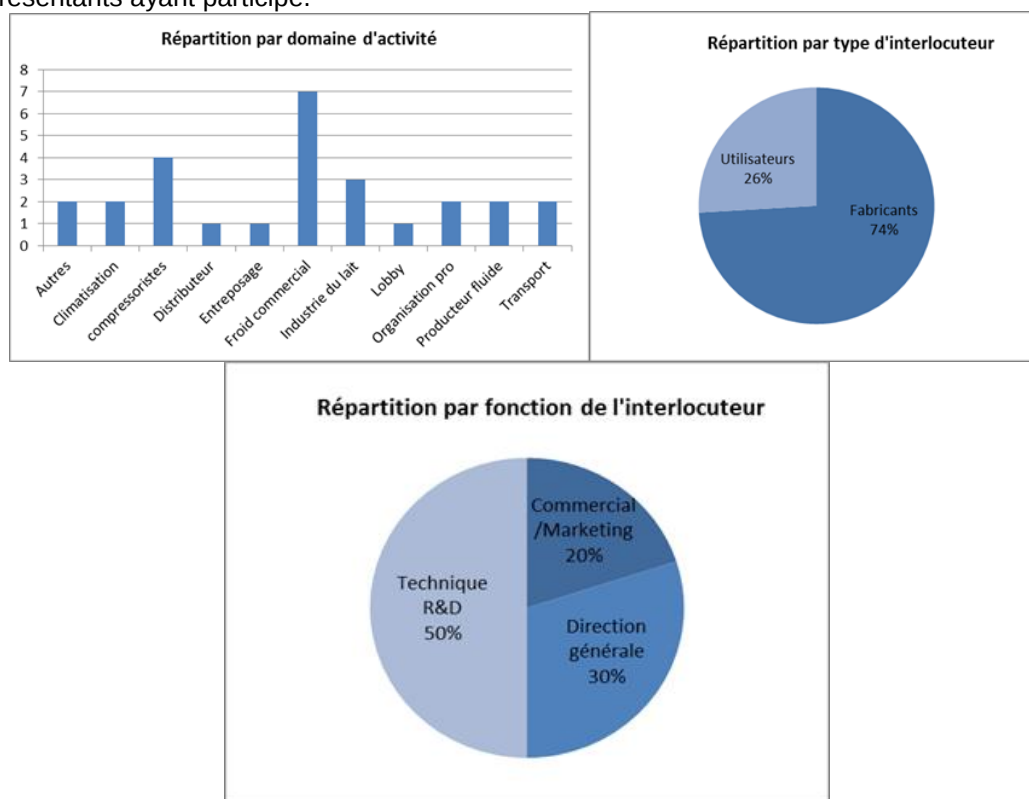
au rapport compte tenu de la demande systématique des organisations interrogées de conserver confidentielles ces données.

7.2 Profil des personnes interrogées

Les profils des experts interrogés sont représentés sur les graphiques suivants en distinguant :

- la fonction dans l'entreprise (R&D, Marketing, direction générale)
- le type d'entreprises représentées (fabricant utilisateur)
- les secteurs conformément à la segmentation représentée.

Il est à noter que les organismes interprofessionnels consultés sont classés selon le collège qu'il représente (fabricants pour les syndicats professionnels de fabricants ou d'installateurs et utilisateurs pour les syndicats d'entreprise détentrice d'équipement). Certains organismes sollicités dans cette étude ont souhaité réaliser une synthèse de leurs propres adhérents lors de réunions communes. Dans ce cas, cette consultation est pondérée par le nombre de représentants ayant participé.



7.3 Situation résultant des enquêtes

Les retours d'informations provenant du dépouillement des interviews et des documents transmis montre une situation contrastée des grands acteurs du froid et de la climatisation dans les réflexions liées aux alternatives aux fluides frigorigènes à fort GWP. On constate en effet les grandes tendances suivantes.

Pour les constructeurs de solution clé en main :

- Des constructeurs globalement peu favorables à l'utilisation de fluides halogénés à faible GWP par crainte que ces fluides, potentiellement impacté par la F-gas, ne constituent que des solutions de transition
- Des constructeurs ayant peu de données chiffrées sur les alternatives existantes ou pour lesquels des essais de développement ont été ralentis, voire stoppés dans l'attente des résultats de la révision de la F-gas
- Des constructeurs faisant état de phases de développement de solutions alternatives potentiellement assez courtes (3 à 4 ans) y compris lorsque la conception mécanique

des machines (compresseur, circuit frigorifique, chambre) est impactée en raison de la capacité volumétrique des fluides de substitution

- Des constructeurs en attente d'un contexte réglementaire plus précis sur l'usage des hydrocarbures comme fluides frigorigènes et d'une charge maximale admissible au regard des risques incendie
- Pour le froid centralisé, le positionnement marqué du CO₂ comme alternative pour les installations neuves ;

Pour les utilisateurs :

- Des utilisateurs incertains sur les choix techniques à réaliser et ayant un degré de connaissance très limité sur les développements en cours ; seuls les professionnels fédérés autour d'un syndicat interprofessionnel adopte une démarche de choix technique qui tient compte du contexte particulier des fluides à fort GWP
- Une crainte que les fluides de substitution halogénés ne soit que des fluides de transition
- Une forte crainte relative à la sécurité des équipements contenant des hydrocarbures et des questionnements sur le niveau de responsabilité des détenteurs d'équipement en cas d'accident
- Une forte attente d'une meilleure acceptation des équipements à l'ammoniac par les DREAL dont certaines sont considérées comme hostiles au déploiement de ces techniques malgré le respect des exigences ICPE
- Le constat d'une offre limitée en France pour l'ammoniac et le CO₂

Annexe 1 : Présentation du consortium

EReIE

EReIE est une Jeune Entreprise Innovante (JEI) créée en décembre 2010. Son activité s'inscrit dans les Nouvelles Technologies de l'Energie(NTE). EReIE valorise plusieurs technologies, inventées par ses fondateurs et brevetées par ARMINES, dont EReIE est licencié exclusif.

L'effectif d'EReIE est en croissance rapide, 17 salariés dont 10 docteurs en mai 2013, occupant des fonctions de responsables de projets, ou de dirigeants. EReIE est entreprise de RID (Recherche Innovation et Développement) et en même temps elle est une ingénierie pour le développement et la réalisation de systèmes Rankine Organique, TRIANGLE DOR® ou de systèmes CRYOPUR®, de purification et liquéfaction de biométhane. EReIE assemble ses équipements sans son atelier. Enfin EReIE maintient une forte activité de recherche interne en liaison avec des laboratoires externes, en particulier ceux de MINES ParisTech et effectue des opérations de R&D&D pour compte de tiers, grandes entreprises ou PME.

EReIE conçoit, réalise ou fait réaliser sous sa supervision toutes les étapes qui permettent de passer du concept initial à l'industrialisation d'un produit ou d'un procédé. EReIE est positionné en aval des centres de recherche, une fois que la preuve de concept a été effectuée en laboratoire. EReIE réalise donc des pilotes et des démonstrateurs qui vont fonctionner dans des conditions progressivement identiques aux conditions d'exploitation réelles. Beaucoup de ces contrats sont confidentiels car les résultats appartiennent au client et à lui seul.

EReIE a rédigé et suit sa charge qualité et prépare sa certification ISO-9001 et ISO-14001.

Etudes, inventaires et audits énergétiques et exergétiques

Les connaissances approfondies des technologies frigorifiques, d'air conditionné, de pompes à chaleur et des systèmes ORC ont amené les fondateurs d'EReIE à développer au CEP ARMINES une base de données pour la France, puis pour le monde, sur l'ensemble des systèmes de réfrigération et d'air conditionné. Cette base de données RIEP permet de mener des études pour réaliser les inventaires des banques de fluides frigorigènes contenus dans les équipements et prévoir ainsi les émissions et les impacts environnementaux en fonction des molécules utilisées (HCFC, HFC, NH₃, CO₂, HC...).

Les connaissances en thermodynamique des systèmes, la maîtrise de l'analyse exergétique et de l'intégration énergétique pour les procédés industriels et pour le « système bâtiment » constituent les bases pour la méthodologie des audits énergétiques et exergétiques (AEE) menés par EReIE. Sur cette base et avec une instrumentation adaptée à chaque secteur, EReIE fort d'une longue expérience de ses membres fondateurs, propose des audits (AEE) qui analysent le procédé dans son ensemble et non pas seulement les utilités. Cet effort de compréhension avec les experts de l'entreprise auditée amène toujours à des concepts neufs qui génèrent souvent des ruptures du point de vue de l'efficacité énergétique, voire de la gestion des déchets.

CEMAFROID

Le Cemafruid est le centre d'expertise indépendant sur la chaîne du froid et la réfrigération. Il offre aux professionnels des prestations :

- d'essais et de vérification d'équipements,
- de certification réglementaire ou volontaire,
- d'expertise et de conseil,
- de service public,
- de formation.

Le Cemafruid réalise des essais et tests de matériels, d'équipements et engins pour la chaîne du froid : emballages, conteneurs, engins de transport, groupes frigorifiques, chambres froides, refroidisseurs de lait, pompes à chaleur, matériel de cuisine, thermomètres, enregistreurs, meubles de vente, Il dispose pour ce faire de laboratoires d'essais et d'étalonnages à

Antony (92) et Cestas (33). Ces laboratoires sont accrédités par le COFRAC suivant la norme ISO 17025 et par l'OMS.

Le Cemafruid est station d'essai ATP agréée par les Nations Unies. A ce titre il effectue les essais de types des engins neufs et les essais pour le renouvellement des attestations ATP. Il est également notifié par plusieurs ministères pour réaliser des essais officiels : ministère de l'alimentation, ministère de la défense, de la santé, de l'intérieur....

Le Cemafruid certifie des entreprises pour la conformité de leurs produits ou services suivant les référentiels en vigueur. Il certifie en particulier les conformités de production des constructeurs d'engins de transport afin de leur permettre de demander directement les attestations ATP. Le Cemafruid habilite également les centres de test pour le renouvellement des engins de transport à 6 et 9 ans.

Le Cemafruid certifie dans le cadre des nouvelles réglementations européennes et nationales les entreprises manipulant les fluides frigorigènes.

Le Cemafruid délivre également des marques de certification volontaire en particulier la marque Cemafruid performance.

Le Cemafruid apporte également son expertise et ses conseils indépendants aux acteurs du froid et de leurs fournisseurs. Cette expertise s'adresse aux professionnels de la chaîne du froid, des usines de fabrication à la remise au consommateur en passant par le transport et le stockage, mais aussi de la climatisation et du conditionnement d'air, et plus largement aux professionnels de la réfrigération.

L'expertise du Cemafruid intègre l'ensemble des composantes de la réfrigération. Elle concerne les besoins des entreprises, le choix des équipements, leur validation, leur utilisation, leur réglage ou leur maintenance, leur consommation énergétique ou encore l'organisation et les pratiques de terrain.

Le Cemafruid offre également une expertise spécifique sur le développement et l'innovation en accompagnement des concepteurs et des constructeurs de matériels et d'équipements. A l'interface entre la recherche, les industriels et les utilisateurs, le Cemafruid accompagne les entreprises pour l'industrialisation de leurs solutions.

Depuis 2009, dans le cadre d'une délégation de service public, le Cemafruid délivre pour le compte du ministère de l'agriculture les attestations de conformité technique des engins de transport sous température dirigée.

Plus de 25 000 attestations sont délivrées chaque année aux plus de 110 000 engins de transport sous température dirigée français. La base de données et l'application en ligne DATAFRIG permettent une gestion entièrement dématérialisée de ces procédures.

Le catalogue de formation du Cemafruid offre une gamme de stages inter-entreprises dans les domaines de compétence du Cemafruid. Il est complété par des formations à la carte intra entreprise.

ARMINES CES

Le Centre Efficacité énergétique des Systèmes est un Centre de Recherches de MINES-ParisTech regroupant 75 chercheurs et doctorants. Spécialisé dans les domaines de l'efficacité énergétique et la décarbonation des procédés, les thématiques du CES s'articulent autour du stockage de l'énergie, des villes et bâtiments durables, de l'énergie industrielle et véhicules basses émissions ainsi que des politiques énergétiques et environnementales.

Parmi les cinq pôles de compétence formés par le CES, les équipes de la thermodynamique des systèmes ont l'expertise à la fois des technologies des équipements du froid et de la climatisation et des fluides frigorigènes. Des méthodologies et outils logiciels ont été développés au CES afin de permettre la caractérisation des fluides frigorigènes. Des projets de recherche et études expérimentales sont en cours, en partenariat avec des producteurs, afin de caractériser et tester les futurs fluides à bas GWP sur différentes technologies.

Par ailleurs, le CES a développé depuis plus de 10 ans une base de données mondiales sur les équipements du froid et de la climatisation. Celle-ci est régulièrement mise à jour afin de permettre la réalisation d'études d'inventaires et de projections d'émissions de fluides frigorigènes. Un outil logiciel, RIEP (Refrigerant Inventories and Emission Prevision) a été développé et enrichi au CES afin de pouvoir réaliser ces études bilans. Le logiciel, couplé aux bases de données, permet d'évaluer la mise en place de réglementations, existantes ou potentielles (Taxe sur les HFC, Evolutions de la Fgas, obligation de démantèlement des équipements aux CFC et HCFC, etc.) et l'introduction de nouveaux fluides frigorigènes sur les marchés d'équipements (France, Europe).

Le CES a par ailleurs réalisé plusieurs études de synthèses et d'analyse sur les réglementations et pratiques au niveau international, notamment l'étude comparative des filières de récupération de fluides frigorigènes en fin de vie des équipements pour le compte de l'AFCE.

Annexe 2 : liste des Experts du consortium ayant participé à l'étude

Experts EReIE

Nom et Fonction	Diplômes et Formations	Expériences et compétences	Références
Denis CLODIC Président EReIE	Ingénieur CNAM Docteur en énergétique Mines ParisTech	Actuellement président d'EReIE (JEI de l'efficacité énergétique) De 1984 à décembre 2010, 25 ans de recherche à MinesParisTech dont 18 comme responsable du CEP Paris (80 personnes)	Auteur principal du chapitre froid commercial du RTOC depuis 1996. Auteur principal du chapitre sur la climatisation automobile du rapport IPCC 2005. Co-Auteur du chapitre RAC du Guideline IPCC 2006 sur les méthodes d'inventaires. Co-auteur de l'ensemble des rapports ARMINES sur les inventaires de fluides frigorigènes France depuis 1996 et co-auteur des trois rapports d'inventaires mondiaux Membre de l'Académie des technologies Membre du RTOC
Xueqin PAN Responsable de projets	Docteur MINES ParisTech Ingénieur en cryogénie, Université du Zhejiang (Chine)	Xueqin PAN occupe actuellement un poste de chef de projets au sein d'EReIE. En 2009, elle rejoint ARMINES, en charge de la partie dépollution des fumées de centrales de production d'énergie pour le projet captage de CO ₂ . En 2007, elle intègre le service recherche et développement d'ACE Industrie comme chef de produits ROOFTOP. En 2004, elle rejoint le service engineering de la société Trane, en tant que chargée de la conception et du développement d'une nouvelle gamme de produits de conditionnement d'air orienté vers le monde entier.	AIRWELL, TRANE, SHERPA ENG., ARMINES, Cie des appareils électroménagers de Hangzhou, Chine

Experts Cemafrica

Nom et Fonction	Diplômes et Formations	Expériences et compétences	Références
Gérald CAVALIER Président Tecnea - Gérant Cemafrica	Polytechnicien (X90) Ingénieur ENGREF (93-95) Ingénieur en Chef des Ponts, des Eaux et des Forêts	Gérald Cavalier a débuté sa carrière en 1995 chef de service et directeur adjoint à la Direction départementale de l'agriculture et de la forêt du Haut Rhin puis comme chargé de mission du préfet, avant de prendre en charge en 1999 les relations internationales du Cemagref, organisme de recherche sur l'agriculture et l'environnement. Il devient en 2002 directeur du développement du groupe RUAS, 20 M€, 250 personnes, PME dans la distribution d'eau et les services public, il a créé et dirigé plusieurs filiales du groupe en développant fortement l'activité. En 2005 il a pris la direction du GIE Cemafrica qui a triplé son CA en 5 ans pour atteindre 4,2M€ en 2010. Gérald Cavalier est président de la commission transport de l'Institut International du Froid et de la commission chaîne du froid des produits de santé de l'AFF et de la SFSTP. Il est expert auprès de l'UNECE, du CEN, de l'OMS et de Transfrigoroute International.	Institut International du Froid, Association Française du Froid, IFTIM, Groupe Ruas, Cemagref, DDAF 68 et 30, AFNOR, Transfrigoroute France et International

Eric DEVIN Directeur des opérations – Président Cemafruid Formation	Ingénieur de l'université Paris XI – Orsay Filière « Sciences et génie des matériaux »	Eric Devin a débuté sa carrière au laboratoire national d'essais (LNE), responsable des laboratoires d'essais et de métrologie en thermique, chef de la division métrologie légale pendant 5 ans. Il a participé activement à l'ouverture au marché européen dans le cadre de directive nouvelle approche. Fin 2007, Eric DEVIN rejoint le Cemafruid pour contribuer à son développement en particulier dans le domaine de la certification, positionnant le Cemafruid en tête des organismes agréés sur les fluides frigorigènes. Eric Devin est membre actif au sein de l'AFF dont il est président du comité IDF, Président de la sous-commission CERTE au sein de l'IIF dédiée au transport et vice-président du WP11 de l'UNECE pour la réglementation ATP. Il participe également au comité français de métrologie et est membre du bureau de l'AFCE. Il coordonne le consortium Datafluides qui regroupe 4 organismes agréés pour les attestations de capacité et qui concerne plus de 12 000 entreprises en France	Ministère de l'industrie (DARQSI), MEEDE, CECOD, OIML, WELMEC, ISO, CEN, AFNOR, syndicat de la mesure, UNECE, Institut International du Froid, Association Française du Froid, Transfrigoroute France
Thomas MICHINEAU Ingénieur Développement	MBA en Marketing et Stratégie Ecole Supérieure de Commerce Extérieure (ESCE), IAE Poitiers Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes (EPUN) Département Thermique – Énergétique, Option Froid Climatisation	Thomas Michineau a débuté comme responsable adjoint du département d'information scientifique et technique, Institut International du Froid (IIF). Il a à cette occasion rencontré la plupart des experts internationaux dans le domaine du froid et participé à de nombreux colloques. Il a rejoint le Cemafruid en 2012 où il a pris en charges des études diverses (études de marché dans les alternatives aux groupes à compression dans le transport, études des installations des GMS, froid magnétique, Etude européenne. Il pilote le projet d'implantation de la nouvelle plateforme d'essais du Cemafruid (ammoniac CO₂)	EDF, IIF, UE

Florence MOULINS Ingénieur expertise conseil	Marketing stratégique INM-IFG Diplôme supérieur du Froid Industriel IFFI-CNAM BTS Froid et Climatisation	Directrice prescription France et adjointe au directeur marketing chez ANYO puis Directeur des ventes OEMS chez TECUMSEH EUROPE, Florence a ensuite été responsable des ventes distribution et chef produits chez ACAL SA et Ingénieur technico-commerciale climatisation chez TOSHIBA SYSTEMES SA avant de rejoindre le Cemafrroid. Membre de l'Association Française du Froid (AFF), Florence est inspectrice certifiée Afnor pour l'inspection des PAC et des clim et intervient dans de nombreuses missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage, d'audits énergétiques de retrofit, de retro commissionning en France et en Europe.	SANYO, TECUMSEH EUROPE, ACAL SA, TOSHIBA SYSTEMES SA,AFF
Jean-Michel BONNAL Responsable Certification Environnement	Ingénieur Climatisation, Eclairage, Acoustique DUT Génie Civil	De 1999 à 2001 Responsable du tunnel d'essais de Bordeaux du Cemafrroid. Il finalise l'accréditation COFRAC du laboratoire. De 2001 à 2008 Responsable Certification transport. Il met en place le transfert de compétences entre l'administration et le Cemafrroid du contrôle des véhicules ATP. Fort de cette expérience tant en essais qu'en certification, il participe à la sous-commission CERTE dont il devient secrétaire en 2005. Il participe également en tant que conseiller technique auprès du Ministère en charge de l'agriculture au WP11 des Nations Unies dont il devient Vice-président en 2005. Chez INGERSOLL RAND, il est en charge de l'homologation des produits liés à la réfrigération. Il est de plus en charge des relations extérieures au sein des instances inter professionnelles. Il revient au Cemafrroid en 2012 pour piloter l'unité environnement qui inclut les activités opérationnelles de délivrance des attestations de capacité fluides frigorigènes.	CEMAGREF ; INGERSOLL RAND (THERMOKING) ; MEEDE,

Experts Armines

Nom et Fonction	Diplômes et Formations	Expériences et compétences	Références
Stéphanie BARRAULT Ingénieur de recherche	Docteur en Energétique MINES ParisTech Ingénieur ESTACA	Depuis 2002, Stéphanie Barrault est ingénieur de recherches pour le CES MINES-ParisTech/ ARMINES. Elle est responsable des études annuelles d'inventaires d'émissions de fluides frigorigènes pour la France métropole et les DOM COM. Elle est également en charge des études de projections d'émissions de fluides frigorigènes et d'évaluation de réglementations fluides. Elle a participé au développement de l'outil de calcul SceGES pour le compte du Ministère de l'Ecologie. Elle est membre de l'AFCE depuis 2007. Auparavant, elle a eu successivement des postes d'ingénieur recherche au sein de la division calcul scientifique, puis Ingénieur projet dans la division Nouveaux Concepts de Véhicules chez PSA Peugeot Citroën.	CES Mines-ParisTech/ ARMINES ADEME MEDDE/direction générale de l'énergie et du climat CITEPA PSA PEUGEOT-CITROEN

Annexe 3 : Liste des entreprises consultées dans le cadre de l'étude

BEE
Schecco
Copeland US
Tecumseh europe
Bitzer
Danfoss
Arkema
Dupont Honeywell
Perifem
Carrier transicold
Thermoking
Daikin
Johnson Control
AHT
EPTA Refrigeration
ACFRI
FRIAX
Fritec
Profroid
Vauconsant
Packo Inox
PANEM
POMONA
DeLaval
SERAP

Annexe 4 : Liste des rapports et publications utilisés dans le cadre de cette étude

Base de données Datafrig pour le secteur transport sous température dirigée
Recensement de la banque de fluides frigorigènes réalisée par Armines chaque année
Rapport EIA Chilling Facts V : RETAILERS ON THE CUSP OF A GLOBAL COOLING REVOLUTION
Etude d'impact MEDDE 2012 (Bureau VERITAS)
Base Fridoc de l'IIF (institut international du Froid)

- [ARE12] AHRI (Air-Conditioning, Heating & Refrigeration Institute) Low-GWP Alternative Refrigerants Evaluation Program.
http://www.ahrinet.org/ahri+low_gwp+alternative+refrigerants+evaluation+program.aspx
- [BAR12] Barrault, S., Saba, S., Clodic, D., 2012: Inventaire des Emissions des fluides frigorigènes FRANCE - Année 2011. Rapport final pour le MEDDTL. Décembre 2012.
- [CLO11] Clodic, D., Barrault, S., Pan, X. Septembre 2011. 1990 to 2010 Refrigerant inventories for Europe and prevision on banks and emissions from 2010 to 2030. Report for EPEE (European Partnership for Energy and the Environment).
- [DEV12] Les entrepôts et leur activité en 2012. Observation et Statistiques. Chiffres et statistiques. Commissariat Général au Développement Durable, N° 334 Juillet 2012.
- [MAR13] System Drop-In Tests of Refrigerant Blends L-40, DR-7 and ARM-30a in a Trailer Refrigeration Unit Designed for R-404A, Marketa Kopecka, Michal Hegar, Vladimir Sulc, Jeff Berge, Thermo king corporation, Rapport AREP/AHRI, Janvier 2013
- [PAN12] Panorama des industries agroalimentaires, édition 2012. Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt.
- [PER13] Note de synthèse : Alternatives crédibles en réfrigération commerciale. PERIFEM, 23 Janvier 2013.
- [RAJ13] Rajan Rajendran Bangkok Technical Conference 2013
- [SCH11] Schwarz et al., 2011, 'Preparatory study for a review of Regulation (EC) No 842/2006 on certain fluorinated greenhouse gases', Öko-Recherche et al.
- [SKM12] Phase Down of HFC Consumption in the EU - Assessment of Implications for the RAC Sector. Final report. August 2012. SKM Enviros.
- [TOC11] 2010 Report of the Refrigeration, Air conditioning and Heat Pumps Technical Option Committee. 2010 Assessment. UNEP, February 2011.
- [ZOU13] Fluides frigorigènes alternatifs: état des lieux en agro-alimentaire. Assaad Zoughaib, CES MINES-ParisTech, Colloque AFCE 2013.

Annexe 5 : Liste des textes réglementaires

- Règlement CE 842/2006
- Directive 97/23/CE « Équipements sous pression »
- Arrêté du 15 mars 2000 relatif à l'exploitation des équipements sous pression (modifié par les arrêtés du 13 octobre 2000 et du 30 mars 2005)
- Rubrique ICPE n°2920 : « Réfrigération ou compression (installations de) fonctionnant à des pressions effectives supérieures à 10^5 Pa »
- Rubrique ICPE n°1136 B : « Emploi de l'ammoniac »
- Rubrique ICPE n°2921 : « Refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air (installations de) »
- Arrêté du 14 février 2000 portant approbation de dispositions complétant et modifiant le règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public
- DIR 09 Directive 2009/125/CE du Parlement européen et du conseil du 21 octobre 2009 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie.
- MeeRp 2011. Methodology for Ecodesign of Energy-related Products. MEErP 201. Final Report. Part 2: Environmental policies and data. Report for the European Commission, DG Enterprise and Industry. Contract SI2.581529.
- REG 12 Commission Regulation (EU) No 206/2012 of 6 March 2012 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for air conditioners and comfort fans.

Annexe 6 : Liste des normes et recommandations

- NF EN 378-1 2008 : Systèmes de réfrigération et pompes à chaleur – Exigences de sécurité et d'environnement – Partie 1 : exigences de base, définitions, classifications et critères de choix
- NF EN 378-2 2008 : Systèmes de réfrigération et pompes à chaleur – Exigences de sécurité et d'environnement – Partie 2 : Conception, construction, essais, marquage et documentation
- NF EN 378-3 2008 : Systèmes de réfrigération et pompes à chaleur – Exigences de sécurité et d'environnement – Partie 3 : Installation in situ et protection des personnes
- NF EN 378- 2008 : Systèmes de réfrigération et pompes à chaleur – Exigences de sécurité et d'environnement – Partie 4 : Fonctionnement, maintenance, réparation et récupération
- NF EN 13136 : Systèmes de réfrigération et pompes à chaleur – Dispositifs de surpression et tuyauteries associées
- NF EN 10216-2 (P265GH) : Tubes sans soudure en acier pour service sous pression
- CODAP 2000 : Code de construction des appareils à pression
- CODETI 2001 : Code de construction des tuyauteries industrielles
- RECOMMANDATIONS DE LA C.N.A.M. (29 novembre 1983)

Annexe7 : Valeurs des GWP de fluides frigorigènes

Les GWP sont donnés pour leurs valeurs à l'horizon d'intégration 100 ans

Type	Nom	Composition ou Formule	GWP ₁₀₀			
			2 nd	3 rd	4 th	TOC 2011
HCFC	HCFC-22		1 500	1 700	1 800	1 790
HCFC	R-123		90	120	77	77
HFC	R-152a					133
HFC	R-125					3 420
HFC	R-143a					4 180
HFC	HFC-32					716
HCFC	R-408A	R-125/143a/22 (7/46/47)	2 650	3 015	3 200	3 200
HCFC	R-401A	HCFC-22/152a/124 (53/13/34)	970	1 130	1 200	1 200
HFC	HFC-134a		1 300	1 300	1 430	1 370
HFC	R-404A	R-125/143a/134a (44/52/4)	3 260	3 785	3 900	3 700
HFC	R-407C	HFC-32/125/134a (23/25/52)	1 525	1 655	1 800	1 700
HFC	R-407F	HFC-32/125/134a (30/30/60)				2063
HFC	R-410A	HFC-32/125 (50/50)	1 730	1 975	2 100	2 100
HFC	R-417A	R-125/134a/600 (46.6/50/3.4)	1 955	2 235	2 300	2 300
HFC	R-422A	R-125/134a/600a (85.1/11.5/3.4)	2 535	2 895	3 100	3 100
HFC	R-422D	R-125/134a/600a (65.1/31.5/3.4)	2 235	2 625	2 700	2 700
HFC	R-427A	HFC-32/125/143a/134a (15/25/10/50)	1 830	2 015	2 100	2 100
HFC	R-507A	R-125/143a (50/50)	3 300	3 850	4 000	3 800
HCFO	R-1233zd					6
HFO	R-1234yf	CH ₂ =CFCF ₃				4
HFO	R-1234ze	CHF=CHCF ₃				6
HC	R-600a		20	20	20	4
HC-290	R-290	CH ₃ CH ₂ CH ₃				6*
HC-1270	R-1270	CH ₃ CH=CH ₂				2*
NH ₃	R-717		0	0	0	<1
CO ₂	R-744		1	1	1	1

Nom	Formule	GWP (TOC 2011)
ARM-30a	HFC-32/1234yf (29/71)	210
ARM-31a	HFC-32/134a/1234yf (28/21/51)	490
ARM-32	HFC-32/125/134a/1234yf (25/30/25/20)	1 548
ARM-42a	HFC-134a/152a/1234yf (7/11/82)	114
ARM-70	HFC-32/134a/1234yf (50/10/40)	497
D-52Y	HFC-32/125/1234yf (15/25/60)	965
DR-5	HFC-32/1234yf (72,5/27,5)	520
DR-7	HFC-32/1234yf (36/64)	260
D2Y-60	HFC-32/1234yf (40/60)	289
D2Y-65	HFC-32/1234yf (35/65)	253
HPR-1D	HFC-32/744/1234ze (60/6/34)	432
L-20	HFC-32/152a/1234yf/1234ze (40/10/20/30)	302
L-40	HFC-32/152a/1234yf/1234ze (40/10/20/30)	302
L-41a	HFC-32/1234yf/1234ze (73/15/12)	524
L-41b	HFC-32/1234ze (73/27)	524
LTRAX	HFC-32/125/134A/1234ze (28/25/16/31)	1 277
LTR6A	HFC-32/744/1234ze (30/7/63)	219
N13a	HFC-134a/1234yf/1234/ze (42/18/40)	579
XP-10	HFC-134a/1234yf (44/56)	605

Annexe 8 : Comparaison de la segmentation adoptée avec celle proposée par SKM [SKM12]

La classification SKM est proche de celle adoptée dans les inventaires. Elle est issue d'une analyse critique des propositions faites dans les rapports EReIE/Armines [CLO11] et Oke-Recherche [OKO12]. Dans certains domaines, SKM distingue des sous-catégories en fonction du niveau de température (froid industriel) ou de la réversibilité (chillers et PAC).

Description des fiches SKM

- SKM propose une fiche par domaine dans lequel il est défini 1 modèle standard 2010 et pour lequel les alternatives disponibles ou envisageables en 2012 sont mentionnées. Cas particulier, quand le standard n'est pas un fluide à fort GWP, la fiche présente les alternatives aux autres HFC utilisés dans le domaine (ex: froid domestique).
- Le modèle "standard 2010" est défini par le fluide utilisé, la charge moyenne, la puissance moyenne, le COP. Les compositions de la banque et du marché neuf sont données (% fluides). Les niveaux d'émissions 2010 sont mentionnés. La part des pré-chargés importés et des compléments de charge sur site est évaluée. Le parc et le marché d'équipements sont évalués pour 2010 et 2030. Mis à part le fluide, toutes ces caractéristiques ne sont pas données pour l'alternative. Les coûts moyens 2010 sont définis pour le système en termes de: coût d'investissement ("capital"), durée de vie, dépenses en €/an liées à la consommation d'énergie et à la maintenance.
- L'alternative est pour eux un fluide, pas un autre système (pas de mention des systèmes indirects) ni une nouvelle technologie. Un tableau récapitulatif chiffre, en % par rapport à une référence donnée (HFC ou HCFC-22), le surcoût d'investissement, de consommation d'énergie et de maintenance. Une mention est faite sur la date de disponibilité. Pas de mention sur les retrofits possibles. Pas de description de l'alternative.

Les principaux écarts entre notre structure et celle de SKM

FROID COMMERCIAL

Pour les groupes hermétiques des petits commerces ("Small Hermetic") deux cas sont différenciés : moyenne et basse températures. Ils sont caractérisés par les mêmes fluides (HFC-134a), charge (240 g), Puissance (0,8 kW), seul le COP diffère parmi leurs données : de 2,1 pour les MT et 1,2 pour les LT). Ils ne mentionnent pas les groupes hermétiques au R-404A (nous avons fait la correction après...). En 2012, ils considèrent les mêmes alternatives disponibles : R-600a et CO₂.

Pour les groupes de condensation des petits commerces ("Single condensing units"), même chose, deux niveaux de température sont considérés. Ils considèrent que le système standard fonctionne au R-404A et les caractéristiques sont différentes selon les niveaux de température.

	Charge (kg)	Pmy (kW)	COP	Alternatives existantes
MT	3,6	5	2,2	HFC-134a, R-407A, R-407F
LT	2,7	2	1,2	R-407F

Pour le froid centralisé, ils considèrent des "Large Multipack", système unitaire de base dans l'installation centralisée, avec deux niveaux de températures :

MT (Cmy = 100 kg) et LT (Cmy = 200 kg).

TRANSPORT

- SKM rassemble les systèmes autonomes du transport routier et les conteneurs maritimes.
- SKM ne mentionne pas les installations des reefers.

INDUSTRIES

SKM distingue :

- les systèmes à détente directe en considérant les niveaux de température LT/MT et, à chaque fois, trois tailles d'installations (petit 20 à 30 kW/moyen 80 à 100 kW/grand 300 à 400 kW)

Détente directe alternatives R-404A	Basse température	Moyenne température
Petit	R-407A ou F	HFC-134a / R-407A ou F
Moyen	R-407A ou F	HFC-134a / R-407A ou F
Grand	R-407A ou F, NH ₃ , CO ₂	R-407A ou F, NH ₃ , CO ₂ , -134a

- les chillers (moyens et grands)
 - les systèmes à évaporateur noyé (moyenne et basse température)
- SKM ne mentionne pas les procédés industriels autres que l'agroalimentaire.

SAC et PAC

SKM regroupe au sein d'un même domaine les équipements de climatisation à air et les pompes à chaleur et distingue pour la plupart des équipements le cas réversible du cas non réversible. Cette distinction ne paraît pas très utile car les caractéristiques sont les mêmes, excepté les spécifications chauffage, et les alternatives disponibles ou envisagées ainsi que les écarts de coûts et disponibilités données sont les mêmes. Ainsi, dans l'étude SKM, les catégories proposées sont:

- les portables
- les petits splits (P = 3,5 kW, C = 0,8 kg)
- les petits splits réversibles (P = 3,5 kW, C = 1,2 kg) -> mêmes alternatives et mêmes écarts de coûts que les splits non réversibles
- les splits de taille moyenne non réversibles (P = 7,5 kW, C = 2 kg)
- les splits de taille moyenne réversibles (P = 7,5 kW, C = 2,5 kg) -> mêmes alternatives et mêmes écarts de coûts que les splits non réversibles
- les splits de grande taille non réversibles (P = 14 kW, C = 5,6 kg)
- les splits de grande taille réversibles (P = 14 kW, C = 5,6 kg) -> mêmes alternatives et mêmes écarts de coûts que les splits non réversibles
- les "packaged systems" (P = 80 kW, C = 20 kg) réversibles qui incluent les rooftops et "ducted splits de P > 12 kW"
- les "packaged systems" (P = 80 kW, C = 20 kg) non réversibles qui incluent les rooftops et "ducted splits de P > 12 kW" -> ici encore, mêmes alternatives et mêmes écarts de coûts dans les cas réversibles et non réversibles
- les VRV non réversibles
- les VRF réversibles -> ici encore, mêmes alternatives et mêmes écarts de coûts dans les cas réversibles et non réversibles.

SKM distingue donc 6 catégories de splits là où nous n'en prenons que deux (splits pour la climatisation individuelle, de puissance inférieure à 17,5 kW et cas des multisplits de P < 17,5 kW). Seul le HFC-32 est identifié en alternative disponible pour tous les splits. Pour les large splits, un mélange "blend 700" est supposé être un jour disponible. Pour les autres, il est également envisagé un mélange avec un GWP autour de 300 disponible entre 2015 et 2018.

Les ducted splits sont inclus dans les splits et multisplits de plus de 17,5 kW -> structure adaptée à celles des statistiques françaises.

La petite catégorie des "armoires" n'est pas traitée

Les PAC air/eau, eau/eau et Sol/eau sont traitées avec les chillers ("hydronic heat pumps").

CHILLERS

SKM prend en compte, comme dans notre étude, trois gammes de puissance, incluant les compresseurs screw et scroll, et, bien que les fluides utilisés soient identiques, distingue les "air cooled" des "water cooled" d'une part et les équipements de chauffage seul, ce qui équivaut à 10 catégories de PAC à eau et chillers.

Catégorie SKM	P froid/ P chaud (kW)	Cmy (kg)	COP	Fluide	Marché équipt EU2010	Alternatives disponibles futures
Chiller petite puissance "cooling only air cooled"	100	29	3,1	R-410A	48 000	HFC-134a, HFC-32, HC <i>Blend 300, 700, 1234ze.</i>
Chiller moyenne puissance "cooling only air cooled"	500	150	3,6	HFC-134a	10 000	HFC-32, NH ₃ , HC <i>R-1234ze, blend300 et 700</i>
Chiller forte puissance "cooling only air cooled"	1200	360	3,8	HFC-134a	1 000	HFC-32, NH ₃ , HC <i>R-1234ze, blend300 et 700</i>
Chiller petite puissance "cooling only water cooled"	100	29	5	R-410A	1 400	HFC-134a, HFC-32, HC <i>Blend 300, 700, 1234ze.</i>
Chiller moyenne puissance "cooling only water cooled"	500	150	5,5	HFC-134a	1 200	HFC-32, NH ₃ , HC <i>R-1234ze, blend300 et 700</i>
Chiller forte puissance CENTRIFUGE "cooling only water cooled"	2 500	750	6,4	HFC-134a	650	HFC-32, R-1234ze <i>DR2/N12, Blend300&700</i>
PAC air/eau chauffage seul utilisation domestique	15	4,4	2,9	R-410A	240 000	HFC-134a/HFC-32 <i>Blend300&700</i>
PAC air/eau chauffage seul de taille moyenne	100	29	2,9	R-410A	6 000	HFC-134a/HFC-32 <i>Blend300&700</i>
PAC air/eau réversible de petite taille	100 100	29	3,1 2,5	R-410A	11 000	HFC-134a/HFC-32 <i>Blend300&700 & HC</i>
PAC air/eau réversible de taille moyenne	500 500	150	3,6	HFC-134a	2 100	HFC-32 <i>Blend300&700, HC</i>

Ce tableau montre que les catégories "water cooled" sont peu représentatives du marché neuf et présentent les mêmes caractéristiques et alternatives que les "air cooled" (et aussi exactement les mêmes écarts de coûts en %). Il n'y a donc pas vraiment d'intérêt de les distinguer. On retrouve à peu près les mêmes catégories que celles des inventaires pour les chillers (le large cooling only water cooled" correspondant aux centrifuges), mais les limites faible et forte puissance sont différentes.

Pour les PAC, SKM ne parle pas des sol/sol, sol/eau et eau/eau mais distingue 4 catégories de PAC eau/eau. Les alternatives sont toujours les mêmes, avec des niveaux de coûts et de disponibilité identiques, ce qui aurait tendance à montrer qu'il n'y a pas d'intérêt de les distinguer également.

CLIMATISATION AUTOMOBILE

Regroupe les systèmes pour les bus et trains, sans prendre en compte les systèmes au R-407C pour les trains.

Annexe 9 : Analyse sectorielle des banques et demandes pour la maintenance des installations de froid et de climatisation du parc français.

A9 – 1 Le R-404A et R-507

Les secteurs les plus utilisateurs du R-404A sont le froid commercial et le froid industriel (figure A9.1).

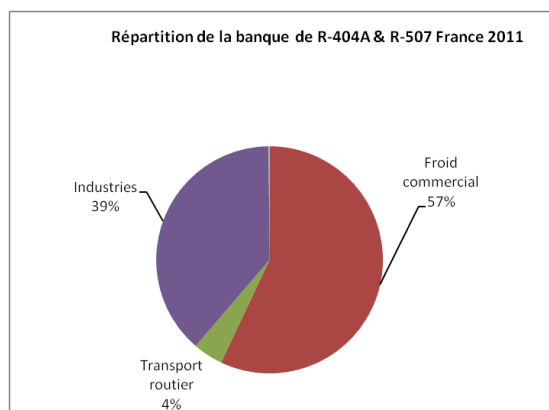


Figure A9.1 Répartition sectorielle de la banque de R-404A (et R-507) France 2011

L'extraction des résultats par sous-secteur (figure A9.2 et tableau A9.1) montre que la banque de R-404A (et R-507) est dominée par le froid commercial centralisé (hypermarchés 25 % et supermarchés 19 %) et l'industrie agroalimentaire (17 %). Les entrepôts et les groupes de condensation utilisés dans les petits commerces constituent également une banque de R-404A importante (plus de 800 t chacune).

Tableau A9.1 Banques de R-404A (et 507) par sous-secteur - France 2011

Banque 2011 de R-404A + R-507	
Supermarchés	1 457
Hypermarchés	1 907
Petits commerces G hermétiques	106
Petits commerces G condensation	861
Syst poulie courroie Transport routier	41
Syst autonomes Transport routier	284
Agroalimentaire - viande	489
Agroalimentaire - laiteries	330
Agroalimentaire - brasseries	265
Agroalimentaire - surgelés	144
Agroalimentaire - autres	52
Tanks à lait	274
Entrepôts	868
Patinoires	50
Procédés Industriels	456
Reefers	9
TOTAL	7 593

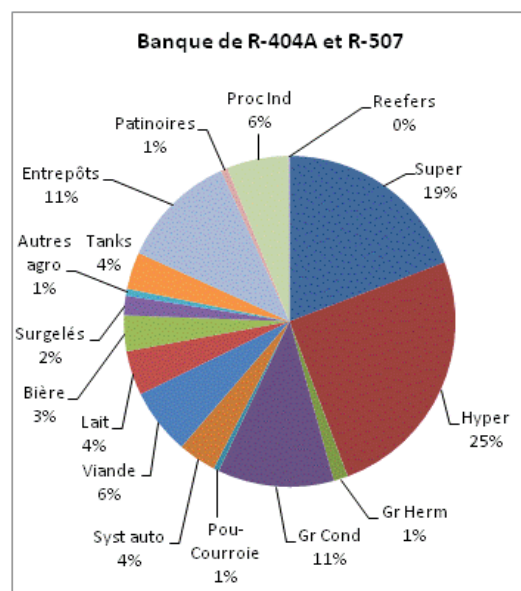


Figure A9.2 Répartition par sous-secteur de la banque de R-404A (et R-507) France 2011

Les besoins en R-404A pour la maintenance des équipements sont dominés aux deux tiers par le froid commercial (figure A9.3).

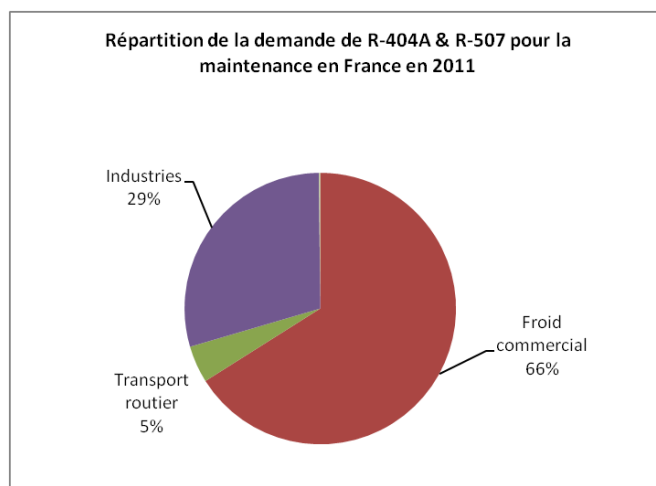


Figure A9.3 Répartition sectorielle de la demande de R-404A (et R-507) nécessaire à la maintenance des équipements formant le parc français en 2011

L'extraction des résultats par sous-secteur (figure A9.4 et tableau A9.2) montre que la demande pour la maintenance en R-404A (et R-507) est dominée par les hypermarchés à 36 %. Les besoins sont également élevés en supermarchés (21 %) et industrie agroalimentaire (13 %).

Tableau A9.2 Demande maintenance de R-404A (et R-507) par sous-secteur - France 2011

Demande Maintenance 2011 R-404A + R-507	
Supermarchés	327
Hypermarchés	570
Petits commerces G hermétiques	1
Petits commerces G condensation	142
Syst poulie courroie Transport routier	10
Syst autonomes Transport routier	59
Agroalimentaire - viande	81
Agroalimentaire - laiteries	47
Agroalimentaire - brasseries	38
Agroalimentaire - surgelés	24
Agroalimentaire - autres	8
Tanks à lait	37
Entrepôts	143
Patinoires	6
Procédés Industriels	78
Reefers	2
TOTAL	1 575

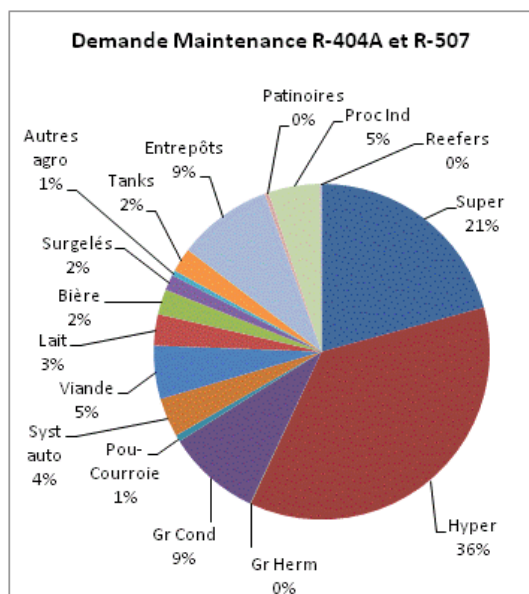


Figure A9.4 Répartition par sous-secteur de la demande de R-404A (et R-507) pour la maintenance des équipements - France 2011

A9 – 2 Le R-410A

Le domaine le plus utilisateur du R-410A est la climatisation à air (SAC). Il représente 60 % de la banque française de R-410A. Le secteur des pompes à chaleur (PAC) est en forte croissance et représente 26 % de la banque française de R-410A en 2011 (figure A9.5).

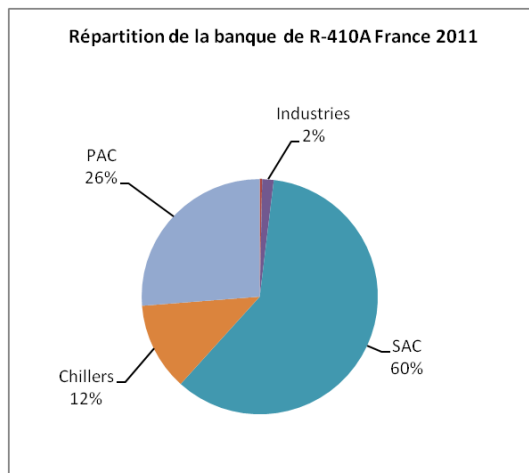


Figure A9.5 Répartition sectorielle de la banque de R-410A - France 2011

L'extraction des résultats par sous-secteur (figure A9.6 et tableau A9.3) montre que la banque de R-410A est dominée par celle des applications de type split à 27 %, des PAC air/eau à 17 % et des multi-splits à 14 %.

Tableau A9.3 Banque de R-410A par sous-secteur - France 2011	
Banque 2011 de R-410A	
Supermarchés	4
Hypermarchés	18
Syst autonomes Transport routier	1
Procédés Industriels	107
Chillers volumétriques (P<50kW)	277
Chillers volumétriques (50<P<350kW)	364
Chillers volumétriques (P<350kW)	174
SAC "mobile"	509
Splits	1 859
Multi-splits	944
SAC "Cabinet"	28
SAC "Windows"	44
Rooftops	118
Central AC	132
SAC "VRV"	415
PAC air/eau	1 152
PAC eau/eau	113
PAC sol/eau	169
PAC sol/sol	342
TOTAL	6 769

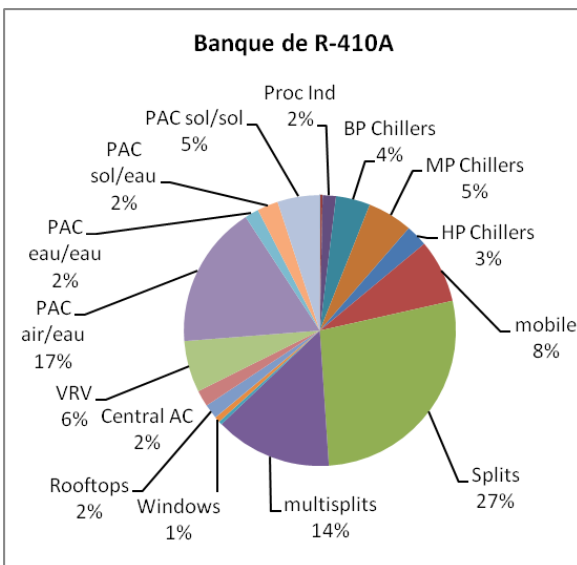


Figure A9.6 Répartition par sous-secteur de la banque de R-410A - France 2011

Les besoins en R-410A pour la maintenance des équipements sont assez faibles, de l'ordre de 330 t en 2011. Ils sont dominés aux deux tiers par le secteur de la climatisation à air. Les taux d'émissions des PAC étant plus faibles, la demande pour la maintenance est faible pour ce secteur.

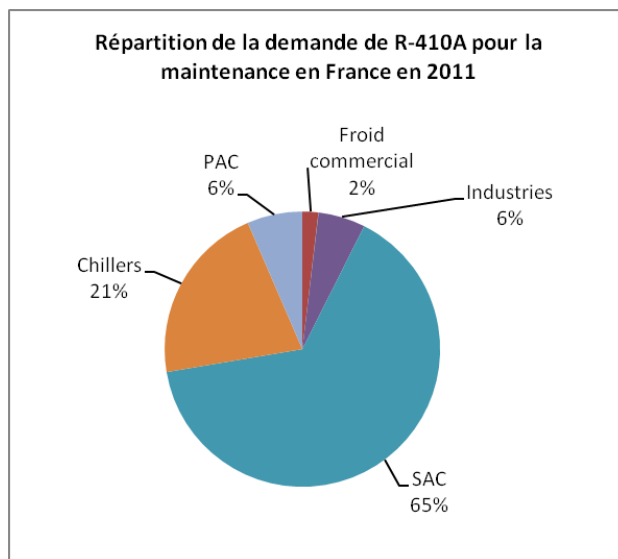


Figure A9.7 Répartition sectorielle de la demande de R-410A nécessaire à la maintenance des équipements formant le parc français en 2011

L'extraction des résultats par sous-secteur (figure A9.8 et tableau A9.4) montre que les applications de type splits et multisplits dominent la demande en R-410A pour la maintenance des équipements en 2011. (A noter, cette demande est oscillante selon les années).

Tableau A9.4 Demande de R-410A pour la maintenance par sous-secteur - France 2011

Demande Maintenance 2011 R-410A	
Supermarchés	1
Hypermarchés	5
Syst autonomes Transport routier	0
Procédés Industriels	18
Chillers volumétriques (P<50kW)	37
Chillers volumétriques (50<P<350kW)	27
Chillers volumétriques (P<350kW)	6
SAC "mobile"	-
Splits	80
Multi-splits	93
SAC "Cabinet"	3
SAC "Windows"	-
Rooftops	-
Central AC	10
SAC "VRV"	30
PAC air/eau	3
PAC eau/eau	2
PAC sol/eau	10
PAC sol/sol	7
TOTAL	332

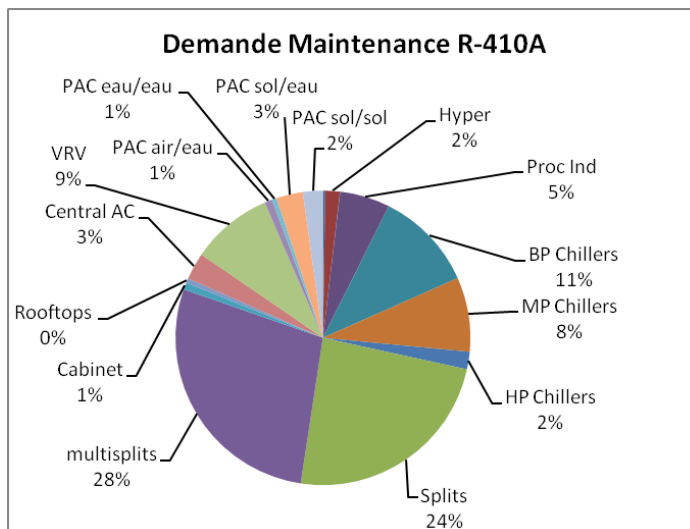


Figure A9.8 Répartition par sous-secteur de la demande de R-410A pour la maintenance - France 2011

A9 – 3 Le R-407C

Le secteur le plus utilisateur du R-407C est celui des chillers. Sa banque représente près de la moitié de la banque française de R-407C.

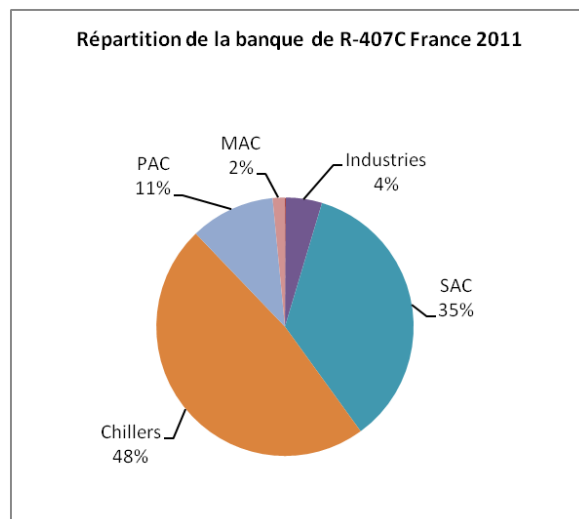


Figure A9.10 Répartition sectorielle de la banque de R-407C - France 2011

L'extraction des résultats par sous-secteur (figure A9.11 et tableau A9.5) montre que la banque de R-407C est dominée par celles des chillers volumétriques de forte puissance à 28 %. Les banques de R-407C des chillers de moyenne puissance, des splits et multisplits représentent également des parts importantes (9 à 15 %).

Tableau A9.5 Banque de R-407C par sous-secteur - France 2011

Banque 2011 de R-407C	
Supermarchés	3
Hypermarchés	3
Procédés Industriels	236
Chillers volumétriques (P<50kW)	230
Chillers volumétriques (50<P<350kW)	787
Chillers volumétriques (P<350kW)	1 477
Splits	573
Multi-splits	493
SAC "Cabinet"	23
Rooftops	330
Central AC	34
SAC "VRV"	391
PAC air/eau	231
PAC eau/eau	40
PAC sol/eau	115
PAC sol/sol	168
Trains	80
TOTAL	5 213

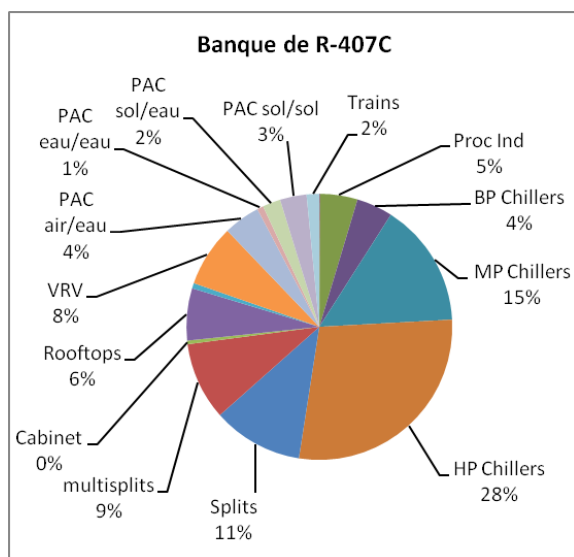


Figure A9.11 Répartition par sous-secteur de la banque de R-407C - France 2011

La demande en R-407C pour la maintenance du parc français est fortement liée au domaine des chillers (figure A9.12).

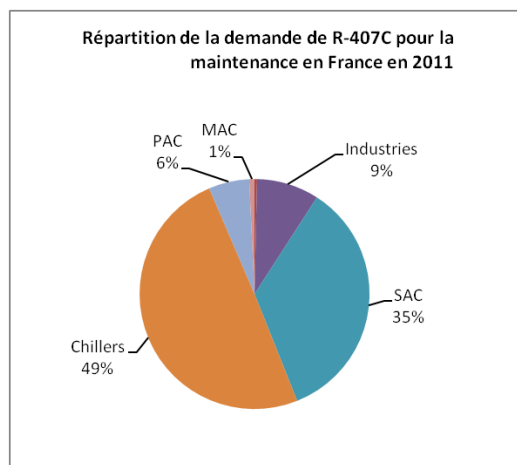


Figure A9.12 Répartition sectorielle de la demande de R-407C nécessaire à la maintenance des équipements formant le parc français en 2011

Le niveau de la demande pour la maintenance du parc français est de l'ordre de 460 t de R-407C en 2011. Les résultats par sous-secteur montrent que les chillers de forte puissance, ceux de moyenne puissance et les multisplits couvrent plus de la moitié de cette demande.

Tableau A9.6 Demande de R-407C pour la maintenance par sous-secteur - France 2011

Demande Maintenance 2011 R-407C	
Supermarchés	1
Hypermarchés	1
Procédés Industriels	40
Chillers volumétriques (P<50kW)	32
Chillers volumétriques (50<P<350kW)	88
Chillers volumétriques (P<350kW)	108
Splits	38
Multi-splits	83
SAC "Cabinet"	2
Rooftops	1
Central AC	5
SAC "VRV"	32
PAC air/eau	4
PAC eau/eau	2
PAC sol/eau	11
PAC sol/sol	9
Trains	3
TOTAL	461

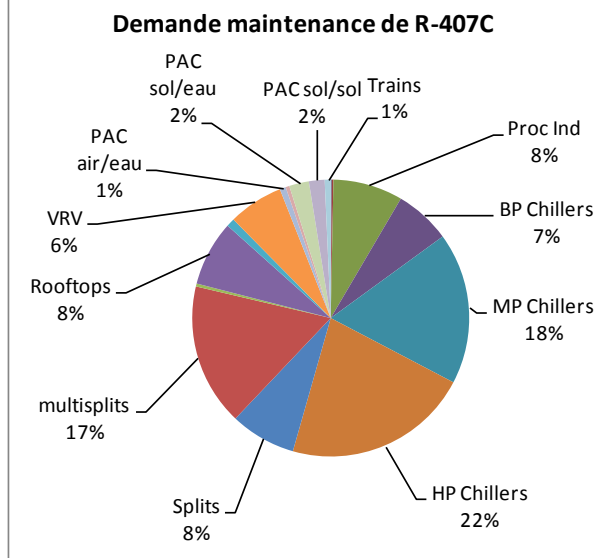


Figure A9.13 Répartition par sous-secteur de la demande de R-407C pour la maintenance France 2011

A9 – 4 Le HFC-134a

La banque française de HFC-134a est dominée aux deux tiers par le secteur de la climatisation automobile (figure A9.14). Les chillers, l'industrie et le froid domestique sont les principaux utilisateurs du tiers restant.

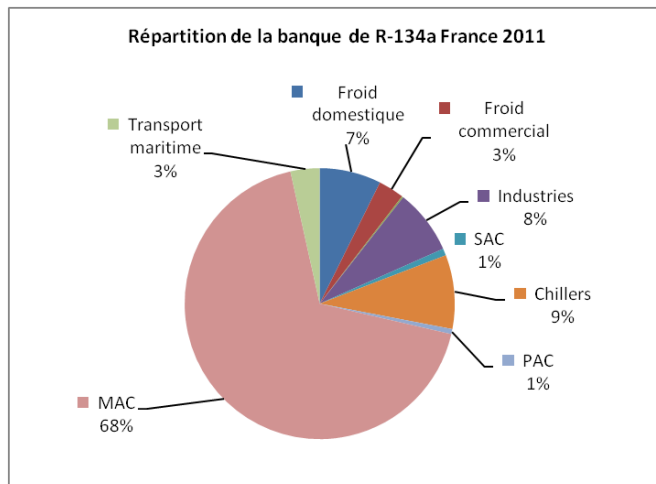


Figure A9.14 Répartition sectorielle de la banque de HFC-134a - France 2011

La figure A9.15 et le tableau A9.7 donnent la répartition par sous-secteur.

Tableau A9.7 Banque de HFC-134a par sous-secteur - France 2011

Froid domestique	1 675
Supermarchés	53
Hypermarchés	61
Groupe hermétiques petits commerces	407
Groupe condensation petits commerces	179
Poulies courroie Routier	38
Agroalimentaire - viande	64
Agroalimentaire - laiteries	45
Agroalimentaire - brasseries	36
Agroalimentaire - surgelés	8
Agroalimentaire - autres	2
Entrepôts	52
Procédés Industriels	1 500
Patinoires	60
Chillers centrifuges	815
Chillers volumétriques (50<P<350kW)	48
Chillers volumétriques (P<350kW)	1 156
SAC "Cabinet"	13
Rooftops	15
SAC "VRV"	159
PAC air/eau	78
PAC eau/eau	9
PAC sol/eau	20
PAC sol/sol	33
Climatisation automobile	14 638
Véhicules Industriels	287
Bus et cars	471
Trains	86
Containers	793
TOTAL	22 805

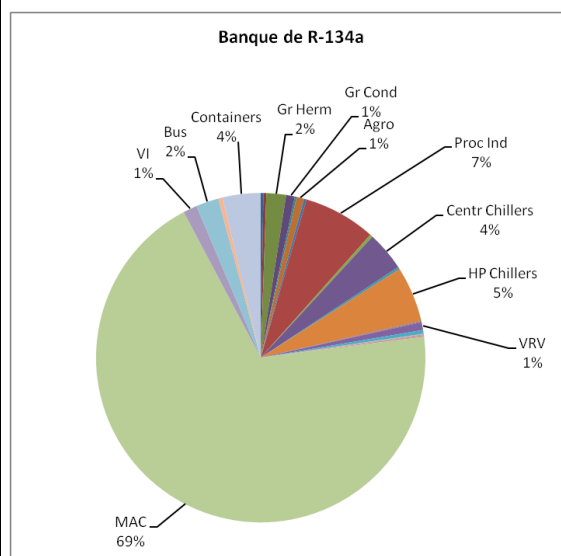


Figure A9.15 Répartition par sous-secteur de la banque de HFC-134a - France 2011

Le HFC-134a est utilisé dans beaucoup d'applications, en petite proportion. Mis à part la climatisation automobile, ce sont les sous-secteurs du froid domestique, des chillers à forte puissance et des procédés industriels qui sont les plus utilisateurs de HFC-134a en 2011.

En termes de maintenance, la demande de HFC-134a est également dominée par le secteur de la climatisation automobile à près de 50 %. Ensuite, le besoin concerne le froid industriel, le transport maritime, puis les chillers.

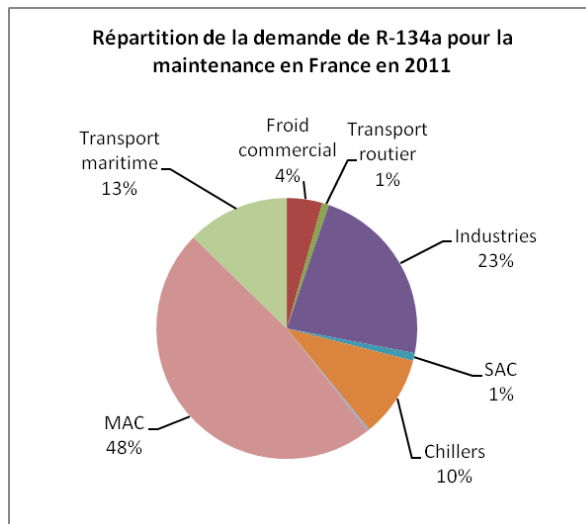


Figure A9.16 Répartition sectorielle de la demande de HFC-134a nécessaire à la maintenance des équipements formant le parc français en 2011

Le niveau de la demande pour la maintenance du parc français est de l'ordre de 1 500 t de HFC-134a en 2011, dont un tiers pour la climatisation automobile. Les résultats par sous-secteur montrent que les procédés industriels, les conteneurs réfrigérés du transport maritime et les bus couvrent près de la moitié de la demande en HFC-134a.

Tableau A9.8 Demande de HFC-134a pour la maintenance par sous-secteur - France 2011

Demande Maintenance 2011 R-134a	
Froid domestique	0
Supermarchés	12
Hypermarchés	18
Groupes hermétiques petits commerce	5
Groupes condensation petits commerce	30
Poulies courroie Routier	12
Agroalimentaire - viande	11
Agroalimentaire - laiteries	6
Agroalimentaire - brasseries	5
Agroalimentaire - surgelés	1
Agroalimentaire - autres	0
Entrepôts	9
Procédés Industriels	295
Patinoires	9
Chillers centrifuges	77
Chillers volumétriques (50<P<350kW)	-
Chillers volumétriques (P<350kW)	72
SAC "Cabinet"	1
Rooftops	1
SAC "VRV"	11
PAC air/eau	0
PAC eau/eau	0
PAC sol/eau	2
PAC sol/sol	1
Climatisation automobile	531
Véhicules Industriels	21
Bus et cars	167
Trains	9
Containers	187
TOTAL	1 474

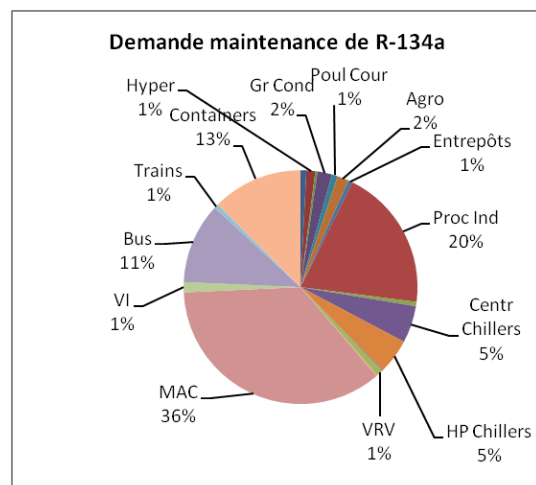


Figure A9.17 Répartition par sous-secteur de la demande de HFC-134a pour la maintenance - France 2011

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit..

www.ademe.fr.

ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr