



Promouvoir
une attitude
responsable

ÉTAT DES LIEUX SUR L'EFFICACITÉ ÉNERGETIQUE DES FLUIDES ET SYSTÈMES À FAIBLE PRP DISPONIBLES

Rapport Final

Septembre 2018

Etude commanditée par l'AFCE et réalisée par le Cemafruid, le CITEPA et EReIE.

Rédacteurs : Stéphanie Barrault (CITEPA)

Olivier Calmels (Cemafruid)

Denis Clodic (EReIE)

Thomas Michineau (Cemafruid)

REMERCIEMENTS

Nous tenons très sincèrement à remercier les membres du Comité de Pilotage pour leurs contributions :

Bénédicte BALLOT-MIGUET, EDF

Emmanuelle BRIERE, UNICLIMA

Tristan HUBE, Service Entreprises et Dynamiques Industrielles, ADEME

Laurent GUEGAN, François HEYNDRICKX, Régis LEPORTIER, Frédéric PIGNARD, AFCE.

Nous tenons également à remercier l'ensemble des professionnels contactés dans le cadre de l'étude.

Copyright 2018

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement des auteurs ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon de le Code de la propriété intellectuelle (art. L122-4) 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 le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L122-10 à L122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

SOMMAIRE

Sommaire 3

<i>Liste des Figures</i>	6
<i>Liste des Tableaux</i>	8
<i>Lexique</i>	11
<i>Mots clés</i>	15
<i>Résumé pour Décideurs</i>	16
1 - Introduction	19
1.1 Objectif de l'étude	19
1.2 Commanditaires	21
1.3 Présentation des Organismes ayant réalisé l'étude	21
2 - Approche méthodologique de l'étude	22
2.1 Evolutions par rapport à la précédente étude	22
2.2 Les fiches par application	23
3 - Etat des lieux réglementaire et normatif	26
3.1 Introduction	26
3.2 Environnement : F-Gaz	27
3.3 Sécurité	30
3.4 Efficacité énergétique/Eco Design	46
3.5 Programmes de Certification Volontaires	56
3.6 Guides et Recommandations	57
4 - Les fluides frigorigènes de substitution	62
4.1 Analyse globale de la banque 2016	62
4.2 R-134a et ses substituts	63
4.3 R-404A et ses substituts	65
4.4 R-410A et ses substituts	67
5 - Equipements domestiques (réfrigérateurs, congélateurs, CET)	70
5.1 Réfrigérateurs et congélateurs domestiques	70
5.2 Les chauffe-eaux thermodynamiques (CET) sur air neuf ou air extrait	71
6 - Froid commercial	73
6.1 Groupe autonome pour meuble frigorifique de vente	73

6.2	Groupe de condensation _____	75
6.3	Système centralisé à détente directe ou indirecte en froid positif et négatif _____	78
7 -	<i>Climatisation à air</i> _____	89
7.1	Climatisation à systèmes hermétiques _____	90
7.2	Système split ou Multisplits (P<17.5 kW) _____	90
7.3	Multisplits P>17.5 kW, systèmes DRV et rooftops _____	92
7.4	Conclusion climatisation a air _____	93
8 -	<i>Pompes à chaleur</i> _____	94
8.1	Fluides de référence _____	94
8.2	Alternatives pour les équipements neufs _____	94
8.3	Etude de la banque sectorielle 2016 _____	95
8.4	Conclusions & perspectives _____	95
9 -	<i>Climatisation mobile (boucle de climatisation automobile)</i> _____	97
10 -	<i>Groupe Refroidisseurs d'eau (GRE)</i> _____	100
10.1	GRE centrifuge _____	100
10.2	GRE volumétriques _____	102
11 -	<i>Froid dans les Industries Agroalimentaires</i> _____	106
11.1	Etude de la banque sectorielle 2016 _____	106
11.2	Système à détente directe froid négatif ou positif et négatif _____	107
11.3	Système à évaporateur noyé froid positif ou froid négatif et positif _____	109
12 -	<i>Transport frigorifique</i> _____	111
12.1	Caractéristiques des groupes _____	111
12.2	Fluides frigorigènes de référence _____	112
13 -	<i>Bilan des Etudes de cas mis en œuvre de nouvelles Options et retour d'expérience</i> _____	117
13.1	Retrofit dans la grande distribution _____	117
13.2	Transport à température dirigée _____	120
13.3	Performance des meubles à groupe hermétiquement scellés _____	121
14 -	<i>Etat des Lieux sur les formations aux alternatives</i> _____	125
14.1	Introduction _____	125
14.2	Législation européenne en matière de formation _____	126
14.3	Les Compétences clés liées aux fluides soumis à la F-gaz _____	127
14.4	Les compétences clés liées aux fluides inflammables _____	128
14.5	Les compétences clés liées aux fluides haute pression _____	128

14.6	Les compétences clés liées aux fluides toxiques_____	129
14.7	Les Compétences clés liées aux mélanges HFC/HFO_____	129
14.8	Synthèse _____	130
14.9	Annuaire de formation disponibles_____	131
<i>Références 132</i>		
<i>Annexe 1 137</i>		
	Programmes de formations existantes _____	137

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Indicateur multicritère (type radar)	24
Figure 2-2 : Aperçu d'une fiche application	24
Figure 3-1 : Calendrier d'entrée en vigueur des réglementations et normes	26
Figure 3-2 : Rubrique ICPE 4802 : définition des régimes.....	29
Figure 3-3 : Pictogramme « Attention : risque d'incendie »	41
Figure 3-4 : Pictogramme « Attention : risque d'incendie »	44
Figure 3-5 : Typologie de fuite en fonction des ratios diamètre de fuite/diamètre de la tuyauterie.....	58
Figure 4-1 : Evolution de la banque de fluides frigorigènes de 1990 à 2016 – tous secteurs.....	62
Figure 4-2 : Banque de fluides frigorigènes 2016 – tous secteurs.....	63
Figure 5-1 : Répartition des fluides frigorigènes utilisés sur la banque 2016 du froid domestique (Barrault 2016)	70
Figure 6-1 – Groupes hermétiques (petits commerces) - Banque 2016	74
Figure 6-2 – Banque 2016 des groupes de condensation utilisés dans les petits commerces.....	77
Figure 6-3 – Comparaison des émissions totales CO ₂ équivalentes annuelles de plusieurs types d'installations de froid commercial (Bivens, 2002).	79
Figure 6-4 – Evolution des coûts et des consommations énergétiques des installations CO ₂ de froid commercial Retour d'expérience de la Suisse (European Commission, 2017).	82
Figure 6-5 : Banque de fluides frigorigènes utilisés en Froid commercial – systèmes centralisés des super et hypermarchés. (Barrault, 2016).....	86
Figure 7-1 : Banque 2016 – Systèmes de climatisation avec groupes hermétiques	90
Figure 7-2 : Banque 2016 – Systèmes split et multisplit	91
Figure 7-3 : Banque 2016 – Equipements multisplits, DRV et rooftops.....	92
Figure 8-1 : Répartition des fluides frigorigènes utilisés sur la banque 2016 des PAC (air/eau, eau/eau, sol/eau et sol/sol).....	95
Figure 9-1 : Evaluation des émissions CO ₂ équivalentes totales (directes + indirectes au sens LCCP) des flottes de climatisations automobiles en supposant la mise en œuvre des alternatives sur l'ensemble des véhicules neufs à partir de 2011 (Source : Papasavva, 2014).....	98
Figure 9-2 : Répartition des fluides frigorigènes sur la banque 2016 du secteur climatisation mobile.	99
Figure 10-1 : Banque 2016 des GRE à compresseur centrifuge	102
Figure 10-2 – Banque 2016 – GRE à compresseurs volumétriques.....	104

Figure 11-1 : Répartition des fluides frigorigènes utilisés sur la banque du froid agroalimentaire en 2016.....	107
Figure 11-2 : Schéma de principe de l'alimentation d'évaporateurs noyés (documentation Hermetic)	109
Figure 12-1 : La typologie des technologies du froid du parc d'engins sous température dirigée, France 2017.....	111
Figure 12-2 : L'autonomie du groupe de froid, France 2015.....	112
Figure 12-3 : Bilan des attestations ATP délivrées pour des engins neufs par type de fluide.....	114
Figure 12-4 : Bilan des attestations ATP délivrées pour des engins en service par type de fluide ..	114
Figure 12-5 : Répartition des banques de fluide dans le transport en 2016 (<i>Barrault, 2016</i>), avant l'introduction du R-452A).....	115
Figure 12-6 : Répartition des banques de fluide dans le transport en 2017 (source Cemafroid) et en 2016 (source Inventaires 2016, avant l'introduction du R-452A).....	115
Figure 12-7 : Répartition des banques de fluide dans le transport en 2018.....	116
Figure 13-1 : Enregistreur de température.....	117
Figure 13-2 : Enregistreur de température et d'hygrométrie	117
Figure 13-3 : Analyseur de puissance.....	117
Figure 13-4 : Entrées/sorties du système frigorifique.....	118
Figure 13-5 : Consommation électrique journalière comparée au taux de fonctionnement de la centrale positive après et après le retrofit. En bleu la consommation journalière en kWh (axe de gauche). En vert le taux de fonctionnement (axe de droite).....	118
Figure 13-6 : Evolution de la puissance absorbée comparée aux horaires de dégivrage des centrales positive et négative	119
Figure 13-7 : Tunnel climatique d'essai pour groupe frigorifique de transport.....	120
Figure 13-8 : Evolution des puissances frigorifiques des groupes lors du remplacement du fluide R-404A par du.....	121
Figure 13-9 : Evolution des performances (COP) des groupes lors du remplacement du fluide R-404A par du.....	121
Figure 13-10 : Plan de charge d'un meuble frigorifique de vente	122
Figure 13-11 : Cellule climatique d'essai pour Meuble frigorifique de vente	122

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Notation des critères.....	25
Tableau 3-1 : Equivalence 5 Teq selon le fluide utilisé.....	27
Tableau 3-2 : Equipements hermétiquement scellés	27
Tableau 3-3 : Equipements de réfrigération.....	27
Tableau 3-4 : Equipements de climatisation.....	28
Tableau 3-5 : Entretien et maintenance.....	28
Tableau 3-6 : Limites d'autorisation de la F-gaz	28
Tableau 3-7 : Classification des fluides frigorigènes en fonction de leur inflammabilité et toxicité..	31
Tableau 3-8 : Caractéristiques des fluides	32
Tableau 3-9 : Fluides couramment utilisés à l'heure actuelle	33
Tableau 3-10 : Fluides dits « naturels »	33
Tableau 3-11 : HFO et mélanges HFC-HFO	34
Tableau 3-12 : Catégories d'accès selon l'occupation des lieux.....	35
Tableau 3-13 : Classification selon l'emplacement des systèmes frigorifiques	35
Tableau 3-14 : Plafonds de charge	36
Tableau 3-15 : Chapitres de la DESP	39
Tableau 3-16 : Fluides frigorigènes et leurs caractéristiques	43
Tableau 3-17 : Tableau des exigences et calendrier : Règlement 643/2009	47
Tableau 3-18 : Exigences relatives à la consommation électrique maximale en mode arrêt et en mode veille pour les climatiseurs à simple et à double conduit et pour les ventilateurs de confort .	48
Tableau 3-19 : Tableau des exigences et calendrier : Règlement 206/2012.	48
Tableau 3-20 : Tableau des exigences et calendrier : Règlement 206/2012	49
Tableau 3-21 : Tableau (Extrait) des exigences et calendrier : Règlement 813/2013.....	50
Tableau 3-22 : Tableau (Extrait) des exigences et calendrier : Règlement 814/2013.....	50
Tableau 3-23 : Tableau des exigences et calendrier : Règlement 2015/1095.....	52
Tableau 3-24 : Tableau des exigences et calendrier	52
Tableau 3-25 : Tableau des exigences et calendrier	53
Tableau 3-26 : Tableau des exigences et calendrier : Règlement 2016/2281.....	55

Tableau 3-27 : Tableau des exigences et calendrier : Règlement 2016/2281	56
Tableau 3-28 Phénomènes dangereux et effets attendus pour chaque classe de fluide	58
Tableau 3-29 : Cas traités	61
Tableau 4-1 : Données des fluides frigorigènes de remplacement du R-134a	64
Tableau 4-2 : Caractéristiques de deux frigorigènes pour la conversion d'installations au R-134a..	65
Tableau 4-3 : Données de fluides frigorigènes de remplacement du R-404A	66
Tableau 4-4 : Données de fluides frigorigènes pour la conversion d'installation au R-404A	67
Tableau 4-5 : Données de fluides frigorigènes de remplacement du R-410A	68
Tableau 5-1 - Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour le froid domestique	71
Tableau 5-2 - Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les CET	72
Tableau 6-1 – Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les groupes autonomes des petits commerces	75
Tableau 6-2 - Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les groupes de condensation des petits commerces	78
Tableau 6-3- Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les installations centralisés des supermarchés et hypermarchés	87
Tableau 7-1: Marchés d'équipements de climatisation en France en 2015	89
Tableau 7-2 : Fluides utilisés en climatisation à air (<i>Barrault, 2015</i>)	89
Tableau 7-3 : Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les équipements de climatisation à air	93
Tableau 8-1 : Marché des PAC résidentielles	94
Tableau 8-2 - Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les PAC	96
Tableau 9-1 - Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP pour la climatisation automobile	99
Tableau 10-1 : marchés des GRE en France (<i>Barrault, 2015</i>)	100
Tableau 10-2 : Fluides utilisés sur le marché neuf des GRE 2010-2015 (<i>Barrault, 2015</i>)	100
Tableau 10-3 - Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les GRE centrifuges...	102
Tableau 10-4 - Fluides utilisés sur le marché neuf des GRE volumétriques en 2010 et 2016 selon (<i>Barrault, 2015</i>)	103
Tableau 10-5 : Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les GRE volumétriques	105
Tableau 11-1 : Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour le secteur des Industries agroalimentaires	109

Tableau 12-1 : Charges moyennes par type de véhicule.....	112
Tableau 12-2 : Quantité de fluide par année et par nature de fluide.....	114
Tableau 12-3 – Bilan des alternatives aux HFC à fort PRP disponibles pour le transport routier ...	116
Tableau 13-1 : Classes de températures.....	123
Tableau 13-2 : Tableau Comparatif des consommations journalières d'énergie de meuble à groupe hermétiquement scellés	123
Tableau 14-1 : Synoptique développement de compétences	126
Tableau 14-2 : Synoptique parcours de formation	127
Tableau 14-3 : Attestation d'aptitude requise par domaine et par activité.....	128
Tableau 14-4 : Coordonnées des centres de formation.....	131

LEXIQUE

AHRI : Air-conditioning, Heating, and Refrigeration Institute.

Anoxie : L'air respirable contient environ 21% d'O₂. En deçà d'une teneur d'environ 17% le risque de perte de connaissance brutale sans signe précurseur, est à craindre, c'est l'anoxie.

ASERCOM : Association of European Refrigeration Component Manufacturers.

Azéotrope : Un mélange Azéotrope ou Azéotropique (a privatif, du grec zêin bouillir et tropos action de tourner) est un mélange de deux ou plusieurs fluides de volatilités différentes qui, dans des conditions déterminées de composition et de pression, présentent des compositions identiques (ou quasi-identiques) des phases liquide et vapeur. Sous pression constante, le changement de phase liquide-vapeur de l'azéotrope se fait à température et composition pratiquement constantes (contrairement aux zéotropes). On assigne conventionnellement aux frigorigènes azéotropes la série R-500.

BP : Basse Pression. Sur un système frigorifique, désigne la partie du système allant schématiquement de la sortie du détendeur à l'entrée du compresseur.

Capacité volumétrique : 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.

CET : Chauffe-eau thermodynamique.

CFC : Membre d'une famille de composés organiques comportant des atomes de chlore, de fluor et de carbone. Leur grande stabilité chimique leur confère un fort potentiel de destruction de la couche d'ozone (grand ODP, "Ozone Depletion Potential"). Ces substances complètement halogénées étaient couramment utilisés comme frigorigènes, agents d'expansion de mousses plastiques isolantes, aérosols, agents stérilisateurs, solvants de nettoyage, et dans un grand nombre d'autres applications. En raison de leur pouvoir de destruction de l'ozone stratosphérique, leur élimination est programmée dans le cadre du Protocole de Montréal (1987).

Chiller : Equipement conçu pour produire de l'eau glacée pour des systèmes ou des unités de conditionnement d'air.

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.

CTP : Cahier Technique Professionnel pour le suivi en service des systèmes frigorifiques sous pression.

Drop In : Procédure de remplacement d'un frigorigène par un autre, de préférence moins néfaste pour l'environnement, dans des installations frigorifiques de toutes natures, et n'impliquant pas de modifications de l'installation autres que des modifications mineures.

DRV : Système de climatisation à Débit de Réfrigérant Variable permettant d'alimenter plusieurs unités intérieures en régulant le débit de fluide frigorigène utilisé par chaque unité intérieure et nécessaire pour traiter un local à climatiser.

ERP : Les Etablissements Recevant du Public sont des bâtiments dans lesquels des personnes extérieures sont admises (ex : salles de spectacles, magasins, établissements de formation, lieux de culte...).

Feu de nuage : En cas d'inflammation d'un nuage de gaz dans sa plage d'inflammabilité, c'est-à-dire que si la concentration de gaz dans l'air se situe entre la limite inférieure d'inflammabilité (LII) et la limite supérieure d'inflammabilité (LSI), il sera observé un phénomène dit de feu de nuage (flash fire). Ce feu de nuage générera des effets thermiques et des effets de surpression.

Feu Torche : Les feux torche sont la conséquence de fuites de fluides inflammables, qui produisent au contact d'une source d'inflammation des jets enflammés à fort pouvoir calorifique.

F-gaz : Règlementation européenne visant à réduire les émissions de gaz à potentiel de réchauffement climatique.

GRE : Groupe Refroidisseur d'Eau. Equipement conçu pour produire de l'eau glacée pour des systèmes ou des unités de conditionnement d'air. Traduction de « chiller ».

GTC : Gestion Technique Centralisée. Système informatique permettant de contrôler le bon fonctionnement d'installations techniques et de les piloter en relevant les mesures d'un grand nombre de capteurs, et en commandant des actionneurs à distance.

GWP : Global Warming Potential. Nom anglais du PRP.

HCFC : Membre d'une famille de composés chimiques apparentés aux CFC mais contenant des atomes d'hydrogène, de chlore, de fluor et de carbone. Les HCFC sont partiellement halogénés et ont un potentiel de destruction de la couche d'ozone (ODP, "Ozone Depletion Potential") notablement plus faible que celui des CFC. Comme exemples de HCFC, on peut citer le R-22 (CHClF₂) ou le R-123 (CHCl₂CF₃).

HFC : Membre d'une famille de composés chimiques apparentés aux CFC, consistant en un ou plusieurs atomes de carbone entourés d'atomes d'hydrogène et de fluor. Comme les HFC ne comportent pas de brome ou de chlore, ils ne contribuent pas à la destruction de la couche d'ozone.

Les HFC sont largement utilisés comme fluides frigorigènes. Comme exemples de HFC, on peut citer le R-134a (CF₃-CH₂F) ou le R-152a (CHF₂CH₃).

HP : Haute Pression. Sur un système frigorifique, désigne la partie du système allant schématiquement de la sortie du compresseur à l'entrée du détendeur.

IAA : Industrie Agroalimentaire.

INERIS : l'Institut National de l'Environnement industriel et des RISques est un établissement public placé sous la tutelle du ministère chargé de l'environnement. Il mène des programmes de recherche portant sur la compréhension des phénomènes susceptibles de conduire à des situations de risques ou d'atteinte de l'environnement et de la santé.

LCCP : Life Cycle Climate Performance. Evaluation exhaustive de l'impact des installations frigorifiques sur le réchauffement planétaire. Il couvre toutes les émissions produites au long du cycle de vie de l'installation (du berceau à la tombe) et comprend outre les émissions (directes et indirectes) dues au fonctionnement, les émissions produites pendant la fabrication des composés, chimiques ou non, de l'installation ainsi que les émissions produites pendant la mise au rebut ou le recyclage.

ODP : Ozone Depletion Potential. Index précisant, en valeur relative, l'importance de la destruction de l'ozone entraînée par la présence dans l'atmosphère de substances chimiques. Le niveau de référence de 1 correspond à la destruction d'ozone causée par le R-11.

PRP : Potentiel de réchauffement planétaire. Pouvoir de réchauffement d'une substance libérée dans l'atmosphère, par rapport à celui du CO₂, par définition égal à 1. Il est d'usage de le calculer sur une période de 100 ans.

Quasi-Azéotrope : Se dit d'un mélange azéotropique caractérisé par un glissement de température suffisamment réduit pour être négligé sans provoquer d'erreur notable dans l'analyse d'une application spécifique.

Retrofit ou conversion : Amélioration ou ajustement d'un équipement de telle façon qu'il puisse être utilisé dans des conditions modifiées ; par exemple : équipement frigorifique que l'on souhaite faire fonctionner avec un frigorigène n'appauvrissant pas la couche d'ozone, à la place d'un CFC ou d'un HCFC.

Surpression : Effet pouvant être entraîné par un VCE. Augmentation soudaine de la pression pouvant entraîner des lésions internes aux poumons et aux tympans ainsi que des blessures provenant de la projection de débris.

Température de rosée : Température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans un air humide est saturée (humidité relative de 100 %). A partir de cette température commence, par refroidissement, la condensation de la vapeur d'eau (sur les murs ou des particules d'impureté) pour une humidité et une pression données.

Température normale d'ébullition : Température à laquelle le fluide s'évapore en condition normale de pression, soit 101 325 Pa.

VCE : Vapor Cloud Explosion. Explosion de nuage de vapeur.

Zéotrope : Mélange de deux ou plusieurs fluides de volatilités différentes, dont les phases liquides et vapeur, en équilibre présentent des compositions différentes. Sous pression constante, le changement de phase liquide-vapeur d'un zéotrope se fait à température et composition non constantes (contrairement aux azéotropes). On assigne conventionnellement aux frigorigènes zéotropes la série R-400.

MOTS CLES

Alternatives, ammoniac, CFC, Chauffe-eau thermodynamique, Chillers, Climatisation, CO₂, Compression de vapeur, Fluide naturel, fluide frigorigène, Fluide à faible PRP, Formation, HCFC, HFC, HFO, Hydrocarbure, PAC, Pompe à chaleur, Propane, Règlement F-Gaz, Système frigorifique.

RESUME POUR DECIDEURS

Ce rapport est la restitution du prolongement de **l'étude sur les alternatives aux HFCs à fort PRP** publiée en 2014 par l'**AFCE** et réalisée par le même consortium. Il vise à mettre à jour l'état des lieux des options disponibles en s'intéressant tout particulièrement à **l'impact des fluides frigorigènes disponibles sur l'efficacité énergétique** des équipements.

Depuis son entrée en vigueur, le 1er Janvier 2015, le règlement européen (EU) 517/2014 dit « **F-Gaz** » a instauré une réduction progressive des quantités de HFCs autorisées à être mises sur le marché européen ainsi que des interdictions sectorielles d'usage, pour les équipements neufs et pour la maintenance des installations de réfrigération et de climatisation. De ce fait, la réglementation, et l'usage fait de leurs quotas par les producteurs de HFC ont fortement contraint le marché.

On notera que la définition de fluide frigorigène à **fort PRP** a évolué et que les chimistes concentrent leurs efforts au développement et à la promotion de fluides dont le PRP est inférieur à 150. **Tout fluide ayant un PRP supérieur à cette valeur sera amené à se raréfier à court ou moyen terme.** On peut constater que les fluides HFO, mélanges HFC-HFO à faible PRP proposés sont tous **légèrement inflammables (A2L)**. Par ailleurs, les hydrocarbures (A3), l'ammoniac et le CO₂ voient leurs utilisations s'élargir significativement dans certaines applications et les technologies des équipements ont été améliorées ; Cependant les conditions d'usage des hydrocarbures et de l'ammoniac doivent être étudiées en détail comme l'indiquent les normes de sécurité.

Parallèlement à cela, le **cadre réglementaire et normatif évolue rapidement**. Les réglementations **EcoDesign** imposent des objectifs de plus en plus ambitieux, en termes d'efficacité énergétique, à un certain nombre d'équipements des secteurs du froid et de la climatisation. Les **normes « produit »** imposent des limites de charges pour les fluides inflammables et des obligations en matière d'affichage. La norme **NF EN 378, version 2017**, met à jour les exigences en matière de sécurité et d'environnement, intègre la nouvelle catégorie de fluide A2L et introduit de nouveaux indices pour le calcul de charge limite et la notion d'analyse de risque tout au long du cycle de vie d'une installation. Enfin, **la réglementation française concernant la sécurité incendie dans les établissements recevant du public interdit** l'usage des fluides inflammables à ce jour ce qui est un frein au développement des options alternatives à faible PRP. Des travaux ont été lancés afin de mettre en cohérence l'article CH 35 avec les objectifs du règlement européen F-Gaz.

Il était donc nécessaire de faire un **point sur le corpus réglementaire** en place et les guides techniques publiés récemment.

L'analyse des options de remplacement est établie par secteur d'application et concerne, d'une part, les **installations neuves** et d'autre part, les **installations en service** pour lesquelles les options de retrofit ou de drop-in sont plus restreintes.

Pour le **froid domestique**, le R-600a est désormais l'unique fluide frigorigène utilisé en Europe dans les réfrigérateurs et congélateurs et permet aujourd'hui d'atteindre le label A++++ en termes d'efficacité énergétique.

Pour le segment des groupes hermétiques pour **petit froid commercial**, la transition du R-134a vers des alternatives hydrocarbures a commencé et le CO₂ a été introduit dans les

distributeurs automatiques ; le R-1234yf est aussi une solution énergétiquement envisageable pour ce type d'équipement. Concernant le remplacement du R-404A, des mélanges A2L (R-454A ou R-455A) sont proposés, d'efficacité énergétique supérieure ou comparable à celle du R-404A.

Des alternatives aux fluides à fort PRP existent pour **les groupes de condensation**. Cependant, les produits ne sont pas tous matures et le personnel formé à l'utilisation des fluides présentant des risques d'inflammabilité est encore insuffisant. Ces constats poussent certains fabricants à miser sur des HFO (le R-1234yf ou R-1234ze). Le CO₂ commence à être proposé y compris par des majors. Les fabricants proposent également comme fluide de transition le R-448A ou le R-449A pour répondre à la demande immédiate mais cette solution n'est pas pérenne.

Différentes options alternatives aux systèmes à détente directe utilisant du R-404A sont actuellement disponibles pour les installations centralisées des super et hypermarchés. Le rapport du 4 Août 2017 de la Commission Européenne en fait un premier bilan et montre que d'une part les solutions R-134a/CO₂ sont énergétiquement efficaces et bien implantées en Europe et que, d'autre part, les alternatives « CO₂ transcritiques » tendent à réduire leur coût et consommation d'énergie. On retrouve dans la littérature de nombreux articles qui comparent des systèmes de type cascade HFC/CO₂ avec des systèmes CO₂ transcritiques. Les progrès technologiques récents permettent aux installations CO₂ transcritiques d'améliorer leur efficacité énergétique et d'être envisagées en climat tempéré/chaud même si le retour d'expérience mérite d'être consolidé pour le froid positif. Les mélanges HFC-HFO de PRP au voisinage de 600, s'avèrent être des remplaçants efficaces au R-134a dans les systèmes cascades HFC/CO₂ et peuvent être envisagés, pour certains, en solutions quasi drop-in. Des solutions avec des PRP sous le seuil de 150 existent (R-455A, R454C). Encore très rares en France, des systèmes indirects ou cascade à l'ammoniac sont utilisés en Europe et très efficaces, notamment en cascade.

Cependant, les besoins pour la maintenance des installations de froid commercial utilisant le R-404A restent importants. Les fluides de remplacement proposés de PRP autour de 1300 permettent de réduire les consommations d'énergie de 4 à 20 % selon les configurations, dans les cas étudiés dans la littérature.

Le marché de la **climatisation à air** est mondial. Il est dominé par des firmes japonaises, américaines, coréennes et maintenant chinoises. Le fluide massivement utilisé est le R-410A. Pour les systèmes hermétiquement scellés, le R-290 (propane) est une option mais son utilisation est, à l'heure actuelle, limitée au climatiseur mobile. Dans des systèmes split ou multi split, l'alternative plébiscitée par les grandes firmes est le R-32. Les fluides de remplacement du R-407C, utilisé pour rentabiliser des lignes de production conçues pour les équipements au R-22, sont le R-454C et le R-455A. Pour les systèmes multi split de forte puissance, Systèmes DRV et Rooftop, il n'y a actuellement pas d'alternative autre que le R-32 qui est prouvé plus efficace que le R-410A.

Les pompes à chaleur, autres que les climatiseurs réversibles traités plus haut, qui restituent la chaleur dans une boucle d'eau, sont majoritairement chargées avec du R-410A. Là encore, le R-32 est proposé par plusieurs marques japonaises. Le R-290 est déjà sur le marché hors Europe et verra vraisemblablement son usage se développer en France, porté par des firmes européennes. Pour les deux fluides de remplacement, l'efficacité énergétique obtenue est égale ou supérieure à celle du R-410A.

Pour la **climatisation automobile**, du fait de l'interdiction au 1^{er} janvier 2017 des fluides à PRP supérieur à 150 (Directive 40/2006), **le R-1234yf** est le fluide choisi par les équipementiers.

La production de masse de climatisation automobile avec ce fluide, dont l'efficacité par rapport au R-134a a été démontrée, est en place.

Les **groupes refroidisseurs d'eau (GRE)** peuvent être segmentés selon le type de compression (volumétrique, centrifuge) et en fonction de la puissance. Pour les GRE centrifuges, le marché européen est dominé par le R-134a. L'alternative la plus répandue est le R-1234ze dont les performances énergétiques sont à 5 à 10% supérieures à celle du R134a. Le R-1233zd, qui est un HCFO, s'est également imposé hors Europe, en remplacement du R-123 (HCFC interdit par le protocole de Montréal). Les alternatives pour les GRE à compression volumétrique sont le R-290 (pour les petites puissances), le R-32, l'ammoniac, et le R1234ze (pour les plus fortes puissances), solutions alternatives permettant à la fois un gain en PRP et une réduction de la consommation énergétique.

Pour les **procédés industriels** en détente directe moyenne température, l'ammoniac est déjà très fortement utilisé comme alternative au R-404A. Les autres options possibles sont le R-1234yf ou R-1234ze. Pour les applications basse température, l'ammoniac est également possible en cascade aux deux niveaux de température. La cascade Ammoniac/CO₂, reste la solution permettant les meilleurs gains en termes de consommations d'énergie. On peut également remplacer le R-404A par du R-455A ou du R-454C, dont les efficacités énergétiques mesurées sont supérieures au R-404A selon les premiers retours d'expérience. A l'heure actuelle il n'existe pas de mélange à faible PRP et faible glissement de température adapté aux installations en régime noyé.

Enfin, dans le domaine du **transport frigorifique**, l'alternative au R404-A est, à l'heure actuelle, le R-452A. La technologie CO₂ est désormais disponible sur le marché.

Pour illustrer les performances des alternatives par rapport aux systèmes de référence, des études de cas sont présentées dans le domaine du transport frigorifique, des meubles frigorifiques à groupes hermétiquement scellés et d'une installation de froid centralisé dans un supermarché. Dans les trois cas présentés, les mesures de performances ont permis de démontrer une gain de performance des solutions de remplacement par rapport aux systèmes de références.

La mise en œuvre, en toute sécurité, des solutions alternatives nécessite des compétences particulières pour les opérateurs manipulant ces fluides. Un certain nombre de directives européennes imposent d'ores et déjà la fourniture de formations adéquates au personnel travaillant avec des fluides frigorigènes de substitution. L'absence d'obligation de certification européenne peut donner à penser qu'aucune exigence contraignante ne s'applique en matière de formation sur les substituts aux HFCs or ce n'est absolument pas le cas.

1 - INTRODUCTION

1.1 OBJECTIF DE L'ETUDE

L'AFCE est une association loi 1901 qui promeut une attitude responsable vis-à-vis de l'utilisation des fluides frigorigènes. A ce titre, elle suit les travaux règlementaires relatifs aux fluides halogénés et, d'une manière générale, l'efficacité énergétique des systèmes de production de froid.

Dans le prolongement de l'étude publiée en 2014 sur les alternatives à l'utilisation des HFC à fort PRP, l'AFCE a sollicité le même consortium et commandé à EReIE, au Cemafrroid et au CITEPA, une seconde étude indépendante. Ce deuxième volet met à jour l'état des lieux des solutions disponibles en s'intéressant tout particulièrement à l'impact des fluides frigorigènes disponibles sur l'efficacité énergétique des équipements.

Depuis son entrée en vigueur, le 1er Janvier 2015, le règlement européen (UE) n°517/2014, dit « F-Gaz », a instauré une réduction progressive des mises sur le marché Européen des HFC par l'instauration de quotas alloués aux producteurs et importateurs sur le territoire Européen ainsi que des interdictions sectorielles d'usage pour les équipements neufs et pour la maintenance des installations de réfrigération et de climatisation. De ce fait, la réglementation, et l'usage fait de leurs quotas par les producteurs de HFC ont fortement modifié le marché.

Parallèlement, les réglementations EcoDesign imposent des objectifs de plus en plus ambitieux, en termes d'efficacité énergétique.

Ces cinq dernières années, l'offre HFC a fortement évolué : de nouveaux fluides frigorigènes, les HFO, ont été développés et, d'autre part les hydrocarbures, l'ammoniac et le CO₂ ont vu leurs utilisations s'élargir significativement sur certains segments.

Les objectifs de l'étude sont :

- De répertorier et de décrire, d'un point de vue thermodynamique, les fluides frigorigènes disponibles, par application, pour remplacer les HFCs à fort PRP traditionnellement utilisés : hydrocarbures, ammoniac, CO₂, HFO purs, mélanges composés de HFC et de HFO, voire de HC;
- D'identifier les solutions techniques associées mais aussi les évolutions technologiques liées à l'usage de ces alternatives ;
- D'analyser les avantages et inconvénients de chaque solution, notamment en termes de consommation énergétique ;
- D'expliciter les normes et réglementations associées à l'usage des alternatives proposées ;
- De faire un état des lieux des formations existantes nécessaires à la mise en œuvre des alternatives.

Le calcul d'indicateurs environnementaux (LCCP ou TEWI) n'entre pas dans le champ de cette étude. Une analyse de cette envergure ne pouvait être menée dans le cadre de cette étude mais il sera, dans la mesure du possible, fait référence aux publications identifiées sur le sujet.

Nota : Le LCCP (Life Cycle Climate Performance) distingue les émissions directes, liées à l'usage du fluide au cours de la vie de l'équipement, des émissions indirectes liées à la fois à la consommation d'énergie de l'équipement mais aussi à la fabrication de l'équipement, à la production du fluide et au démantèlement de l'équipement (IIR, 2015).

Le TEWI (Total Equivalent Warming Impact), autre indicateur, ne prend en compte que les consommations d'énergie dans l'estimation des émissions indirectes.

Ces indicateurs sont utilisés dans plusieurs études pour comparer l'impact environnemental des fluides frigorigènes dans certains équipements en tenant compte de l'ensemble des émissions, à la fois directes dépendant du PRP et des taux d'émissions, mais aussi indirectes, soit principalement les émissions liées à la consommation d'énergie de l'équipement.

Dans l'approche LCCP, toutes les émissions indirectes cherchent à être prises en compte mais avec un grand nombre d'approximations et les émissions hors consommation d'énergie représentent moins de 10 % des émissions totales. Des logiciels dédiés à certaines applications ont été développés (Clim auto, PAC, etc.).

L'objectif de cette étude est principalement de réaliser une mise à jour de l'étude précédente prenant en compte toutes les alternatives actuellement mises sur le marché, en axant l'analyse sur les gains en efficacité énergétique qu'elles peuvent offrir au vu des dernières publications. Les inconvénients, en matière de sécurité, de technicité, de toxicité ou de disponibilité seront également soulignés.

1.2 COMMANDITAIRES

Coordonnées des commanditaires :

AFCE
55b, Rue Porte Rabel
61300 L'AIGLE

ADC3R
Immeuble Le Diamant,
14, rue de la République,
92800 Puteaux

ASERCOM
35 rue du Congrès
B-1000 BRUXELLES

EDF – Département R&D
Avenue des Renardières
F-77818 Moret sur Loing

DAIKIN
ZA du Petit Nanterre
31, rue des Hautes Pâtures
92737 Nanterre Cedex

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

1.3 PRESENTATION DES ORGANISMES AYANT REALISE L'ETUDE

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

- du CEMAFROID, centre d'expertise de la chaîne du froid, coordinateur de l'étude
- du CITEPA, Opérateur d'état pour le Ministère de l'environnement chargé de l'élaboration, de la vérification et de la diffusion des informations relatives au gaz à effets de serre et de polluants atmosphériques.
- d'EReIE, société spécialisée dans le domaine des techniques de réfrigération.

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 frigorifique, 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.

2 - APPROCHE METHODOLOGIQUE DE L'ETUDE

2.1 EVOLUTIONS PAR RAPPORT A LA PRECEDENTE ETUDE

Par rapport à l'étude menée en 2014 par le même consortium pour l'AFCE, certaines évolutions sont à noter :

- Seuls les fluides frigorigènes purs ou mélanges ayant une dénomination normalisée selon la dernière mise à jour de l'ASHRAE 34 seront pris en compte ;
- La comparaison des solutions proposées sera basée sur le retour d'expérience des détenteurs et opérateurs vis-à-vis d'installations utilisant ces alternatives, sur des garanties de fabricants d'équipements ou sur des publications soumises à une revue par un comité de lecture.
- L'étude s'attachera aux solutions alternatives pour les équipements neufs en prenant en compte l'efficacité énergétique des solutions proposées.
- Les solutions pour le retrofit, pour lesquelles les données sur l'efficacité énergétique sont plus incertaines (car l'optimisation est limitée aux réglages de l'installation existante) seront également listées.
- Des études de cas réalisées par le Cemafruid viendront illustrer les comparaisons d'alternatives avec les fluides de référence.

Comme dans la précédente étude, la structuration utilisée pour décrire les équipements s'appuiera sur celle du rapport *Refrigeration, Air-conditioning and Heat Pumps Technical Option Committee* de l'UNEP qui se décompose en 8 grands domaines d'application :

- le froid domestique,
- le froid commercial,
- la climatisation à air,
- les pompes à chaleur,
- la climatisation mobile,
- les chillers,
- le froid dans les Industries Agroalimentaires,
- le transport frigorifique.

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.

Après un état des lieux réglementaire et normatif, le rapport présentera un panorama des fluides de substitution.

Les alternatives par secteur d'équipements seront détaillées en présentant :

- Les fluides de référence, utilisés historiquement ;
- L'analyse des alternatives présentes sur le marché pour les équipements neufs. Celle-ci tiendra compte des retours d'expérience, de l'analyse bibliographique, des choix des fabricants et des études de cas ;
- Pour chaque secteur, une analyse de la banque de fluides frigorigènes en 2016 est présentée. Par banque, on entend les quantités de fluides frigorigènes contenues dans les équipements constituant le parc installé en France. Les graphes ont été établis, avec l'autorisation du Ministère de l'Environnement, à partir des résultats de l'étude d'Inventaire de fluides frigorigènes – France métropole – Année 2016 réalisée par Armines (S. Barrault, A. Zoughaib) en collaboration avec EreIE (D. Clodic) pour le

compte du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. Il s'agira ici de montrer les banques résultant d'une tendance d'utilisation des alternatives identifiées aux systèmes utilisant des HFC à fort PRP et non de dénombrer les parcs d'installations utilisant des alternatives.

Enfin, l'étude accordera une dernière partie aux besoins identifiés en termes de formation.

2.2 LES FICHES PAR APPLICATION

Une fiche est établie pour chaque application retenue dans la segmentation issue de l'analyse des secteurs utilisateurs de froid et de climatisation. Chaque fiche est constituée de 3 parties.

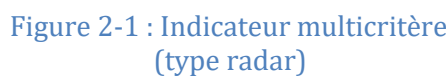
La première partie intitulée « Description du système de référence » donne les informations suivantes pour chaque application concernée :

- Le fluide le plus couramment utilisé lorsque la technique, dite de référence, est basée sur l'emploi de HFC à fort PRP ;
- S'il s'agit d'un mélange, les fluides qui le composent et dans quelles proportions ;
- Le PRP du ou des fluides utilisés. Les valeurs de PRP retenues sont celles parues dans le *4th assessment report* de l'IPCC. De ces valeurs sont calculés les PRP des mélanges composés de plusieurs frigorigènes avec un arrondi à l'unité. Ceci est valable pour les PRP des fiches ainsi que pour toute valeur de PRP précisée dans ce rapport ;
- La classe de sécurité des fluides selon la norme NF EN 378 ou ASHRAE 34 ;
- La charge moyenne par équipement, donnée en kilogrammes de cette solution ;
- La durée de vie des équipements. Cette durée théorique ne tient pas compte de l'effet qu'auraient des mesures de restriction anticipées pour l'emploi du fluide couramment utilisé. Cette durée fournit par conséquent un indicateur qui permet de juger si une mesure éventuelle de restriction aurait un impact ou non sur l'obsolescence du parc des équipements ;
- La banque de fluide en France ;
- Une justification technique du choix de cette solution qui a été fait par le passé ;
- Une synthèse de la réglementation applicable au secteur en France et en Europe.

La deuxième partie intitulée « Alternatives techniques pour les installations neuves » présente les éléments ci-dessous. Lorsque le cas se présente, plusieurs solutions alternatives sont possibles, les éléments à suivre sont alors donnés pour chacune des alternatives.

- Le nom de la solution alternative ;
- Le ou les fluides utilisés pour cette solution ;
- Une synthèse de la réglementation applicable à la solution ;
- Les 6 paramètres technico économiques retenus permettant de comparer cette solution alternative à la solution d'origine :
 - La valeur du PRP ;
 - Le niveau de l'efficacité énergétique, basé sur les résultats trouvés dans la littérature ;
 - La capacité volumétrique comparée à celle de la référence ;
 - La sécurité. Critère basé sur la classification des fluides frigorigènes selon la Norme NF EN 378 et fonction de leur toxicité (A/B) et de leur inflammabilité (1/2/2L/3) ;
 - Le coût, hors maintenance, de la solution ;
 - La disponibilité, en prenant en compte les volumes proposés à la vente par les fabricants de fluides frigorigènes selon leur politique, l'état de développement d'une solution.
- Un bilan Freins / Avantages de la solution basé sur la littérature et sur les entretiens menés auprès des acteurs dans le cadre de l'étude. Les freins et avantages peuvent par

- Un indicateur multicritère qui représente graphiquement les 6 paramètres technico-économiques afin de mettre en relief les avantages et inconvénients de chaque solution. Plus de détails sont donnés ci-après.



- [illegible]

Partie 3 : Alternative(s) technique(s) existante(s) pour le rétrofit

Approche méthodologique de l'étude

Pour les fiches application, chaque solution est notée à l'aide d'un indicateur multicritères. Une note de 0 à 6 est attribuée à chacun des 6 paramètres technico-économiques retenus. Le « 0 » est la meilleure note qui puisse être attribuée, et le « 6 » la moins bonne. Sur ces « radars » une petite surface correspond donc à une solution intéressante. Les critères de notation sont les suivants.

Tableau 2-1 : Notation des critères

Critère	Code	Indices						
		0	1	2	3	4	5	6
PRP	PRP	Très faible (<10)		Faible (<150)	Moyen (<300)	Assez fort (<750)	Fort (<1500)	Extrêmement fort (>1500)
Efficacité énergétique	Eff Energ	Excellente			Moyenne		Mauvaise	
Risque sur la sécurité	Sécu	Classe A1		Classe A2L et B2L		Classes A2 et B2		Classes A3 et B3
Coût de la solution	Coût	Faible			Moyen		Elevé	
Disponibilité	Dispo	Solution éprouvée, fluide largement disponible			Plusieurs pilotes en France ou à l'étranger		Test laboratoires et/ou pénurie de fluide frigorigène prévisible	
Capacité volumétrique	Cap Vol	Suffisante			Moyenne		Insuffisante	

3 - ETAT DES LIEUX REGLEMENTAIRE ET NORMATIF

3.1 INTRODUCTION

Les installations frigorifiques et les pompes à chaleur sont soumises à un cadre réglementaire et normatif contraignant sur les thèmes de la sécurité, des fluides frigorigènes ayant un impact sur l'environnement et de l'efficacité des équipements neufs.

Ce chapitre aborde l'ensemble des textes réglementaires pouvant impacter le choix des fluides de substitutions aux fluides à fort PRP :

- Règlement (UE) n°517/2014 dit « F-Gaz »,
- Suivi en service des Equipements frigorifiques sous pression,
- Directive sur l'Eco-conception,
- Norme NF EN 378,
- Normes Produits.

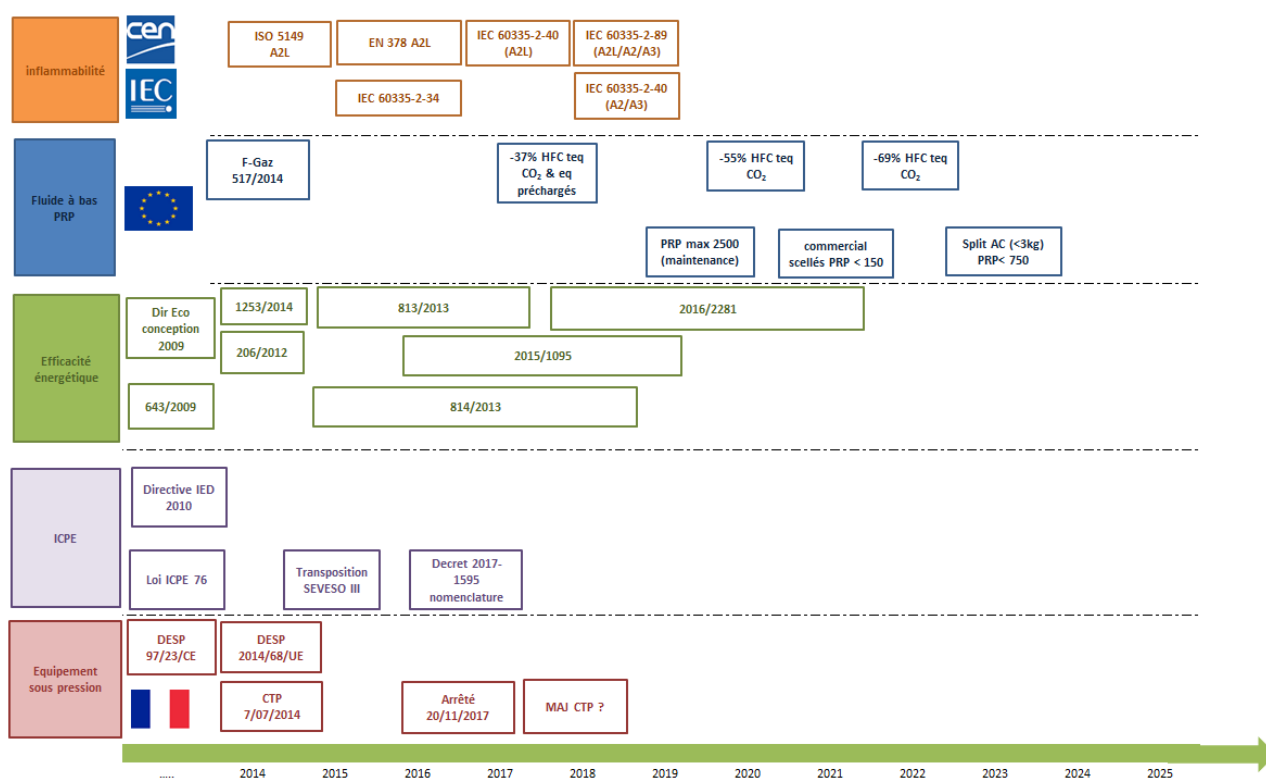


Figure 3-1 : Calendrier d'entrée en vigueur des réglementations et normes

3.2 ENVIRONNEMENT : F-GAZ

Le règlement (UE) n°517/2014 dit « F-Gaz » abroge et remplace le précédent règlement (CE) 842/2006 dont les règles applicables sont inscrites dans le code de l'environnement Livre V, Titre IV, chapitre III, section 6 et réglementent les conditions de mise sur le marché, d'utilisation, de récupération et de destruction des fluides frigorigènes utilisés dans les équipements frigorifiques et climatiques comportant plus de 2 kg de fluide.

Le règlement européen F-Gaz, applicable depuis le 1^{er} janvier 2015, conduit à une diminution des émissions de gaz à effet de serre dues à l'utilisation des fluides fluorés selon un calendrier progressif jusqu'en 2030. L'objectif en est ambitieux puisqu'il s'agit d'atteindre une réduction à terme de 79 % des émissions par rapport au niveau de référence (2009-2012), voir Tableau 3-6.

Les émissions de gaz à effet de serre se mesurent en tonnes équivalent CO₂, et sont le produit de la quantité de fluide fluoré (exprimé en kg) par le PRP dudit fluide.

Par exemple, pour un système frigorifique comportant une charge équivalente à 5 TeqCO₂, la quantité en fluide frigorigène varie comme ci-dessous :

Tableau 3-1 : Equivalence 5 Teq selon le fluide utilisé

Fluide	R-134a – PRP 1430	R-404A – PRP 3922	R-410A – PRP 2088
5 TeqCO ₂	3,5 kg	1,3 kg	2,4 kg

Cette diminution des émissions est programmée selon 2 axes majeurs :

- Une réduction progressive des fluides halogénés à fort PRP (Application de quotas de mise sur le marché exprimé en TeqCO₂) ;
- Des interdictions sectorielles, sauf pour les applications militaires, lorsque des alternatives techniques existent.

Les interdictions sectorielles portent sur les éléments suivants :

- **Equipements hermétiquement scellés :**

Tableau 3-2 : Equipements hermétiquement scellés

Type d'équipement	Conditionnalité	Date d'interdiction
Commerciaux hermétiques scellés	PRP ≥ 2500	1 ^{er} janvier 2020
Commerciaux hermétiques scellés	PRP ≥ 150	1 ^{er} janvier 2022

- **Equipements de réfrigération :**

Tableau 3-3 : Equipements de réfrigération

Type d'équipement	Conditionnalité	Date d'interdiction
Equipements de réfrigération fixes	PRP ≥ 2500 (ou tributaires) Sauf application pour -50°C	1 ^{er} janvier 2020
Systèmes centralisés multipostes à usage commercial	Puissance ≥ 40 kW PRP ≥ 150 (ou tributaires) Sauf primaire de cascade si PRP < 1500	1 ^{er} janvier 2022

- **Equipements de climatisation :**

Tableau 3-4 : Equipements de climatisation

Type d'équipement	Conditionnalité	Date d'interdiction
Equipements de climatisation mobiles autonomes (équipements hermétiquement clos)	PRP ≥ 150	1 ^{er} janvier 2020
Systèmes de climatisation bi-blocs	PRP ≥ 750 (ou tributaires) Charge < 3kg	1 ^{er} janvier 2025

- **Entretien et maintenance :**

Tableau 3-5 : Entretien et maintenance

Origine du GES fluoré	Conditionnalité	Date d'interdiction
Généralité	PRP ≥ 2500 Charge < 40 TeqCO ₂ Sauf application pour -50°C	1 ^{er} janvier 2020
GES fluoré régénéré	PRP ≥ 2500 Equipements existants Etiquetage ad hoc	1 ^{er} janvier 2030
GES fluoré recyclé	PRP ≥ 2500 Récupérés depuis le même type d'équipement. L'entreprise qui l'a récupéré ou pour laquelle ils ont été récupérés. Equipements existants Etiquetage ad hoc	1 ^{er} janvier 2030

Le tableau ci-dessous présente les différentes limites d'autorisation de la F-gaz de manière synthétique.

Tableau 3-6 : Limites d'autorisation de la F-gaz

Dates au 1 ^{er} janvier	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Quantité de HFC	100%		93%		63%			45%			31%			24%			21%
Equipements neufs	Meubles ménagers PRP ≥ 150																
	Meubles commerciaux PRP ≥ 2500							PRP ≥ 150									
	Froid fixe PRP ≥ 2500																
	Froid commercial > 40 kW et PRP ≥ 150																
	Climatisation mobile PRP ≥ 150																
	Climatisation bi-bloc < 3kg HFC, PRP ≥ 750																
Maintenance	PRP ≥ 2500, charge > 40 TeqCO ₂																
Etiquetage	Pas d'étiquetage																

La 2^e phase du calendrier (à partir de 2018) est très contraignante puisqu'elle exige à la fois :

- Dès 2018: Réduction de 37% des quantités de HFC mises sur le marché en tonnes de CO₂ équivalentes par rapport au seuil de référence;
- Dès 2020: Interdiction d'usage des HFC dont le PRP est supérieur ou égale à 2500 à l'exception de la maintenance des installations existantes dont la charge de HFC est inférieure à 40 tonnes équivalent CO₂

L'observation du marché des HFC en 2018 fait apparaître les premières conséquences du phase down :

- Abandon rapide des fluides à fort PRP, y compris lorsqu'il n'y a pas d'interdiction sectorielle associée ;
- Extension des effets des quotas de mise sur le marché aux fluides dont le PRP est supérieur à 2000 afin d'atteindre les objectifs globaux.

La gestion des quotas étant relative à la mise sur le marché, ceci signifie que seule la manipulation de fluide vierge est prise en compte ; ainsi un système peut continuer à fonctionner quel que soit le fluide qui y circule dès lors qu'il n'est pas nécessaire de manipuler ce dernier.

La manipulation des fluides à fort PRP recyclés ou régénérés n'est pas prise en compte dans les interdictions sectorielles, et ne rentre pas dans les quotas. Ceci signifie que la manipulation de fluide récupéré est possible jusqu'en 2030.

Les fluides fluorés sont soumis à la réglementation relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (rubrique ICPE 4802 bientôt remplacé par la rubrique 1185). Les prescriptions sont différentes en fonction que le fluide est utilisé en tant que fluide frigorigène au sein d'un système frigorifique ou stocké. Ces prescriptions sont définies dans l'arrêté ministériel du 4 aout 2014.



LIBERTÉ • ÉGALITÉ • FRATERNITÉ
REPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE



AIDA



maîtriser le risque
pour un développement durable

**La réglementation de la prévention
des risques et de la protection de l'environnement**

Accueil
Réglementation
Aide réglementaire
Guides et BREF
Recherche

Autres versions

- Version PDF
- Version imprimable

A propos du document

- Type : Rubrique de la nomenclature
- Date d'entrée en application : 01/06/2015
- Etat : en vigueur

4802. Fabrication, emploi ou stockage de gaz à effet de serre fluorés visés par le règlement (CE) n° 842/2006 ou de substances qui appauvrissent la couche d'ozone visées par le règlement (CE) n° 1005/2009.

4.8 Autres substances et mélanges nommément désignés

(Décret n° 2014-285 du 3 mars 2014, article 4 et Décret n° 2015-1200 du 29 septembre 2015)
Gaz à effet de serre fluorés visés à l'annexe I du règlement (UE) n° 517/2014 relatif aux gaz à effet de serre fluorés et abrogeant le règlement (CE) n° 842/2006 ou substances qui appauvrissent la couche d'ozone visées par le règlement (CE) n° 1005/2009 (fabrication, emploi, stockage).

1. Fabrication, conditionnement et emploi autres que ceux mentionnés au 2 et à l'exclusion du nettoyage à sec de produits textiles visé par la rubrique 2345, du nettoyage, dégraissage, décapage de surfaces visées par la rubrique 2564, de la fabrication en quantité industrielle par transformation chimique ou biologique d'hydrocarbures halogénés visée par la rubrique 3410-f et de l'emploi d'hexafluorure de soufre dans les appareillages de connexion à haute tension.	
Le volume des équipements susceptibles de contenir des fluides étant	
a) Supérieure à 800 l	(A-1)
b) Supérieure à 80 l, mais inférieure ou égale à 800 l	(D)
2. Emploi dans des équipements clos en exploitation.	
a) Équipements frigorifiques ou climatiques (y compris pompe à chaleur) de capacité unitaire supérieure à 2 kg, la quantité cumulée de fluide susceptible d'être présente dans l'installation étant supérieure ou égale à 300 kg	(DC)
b) Équipements d'extinction, la quantité cumulée de fluide susceptible d'être présente dans l'installation étant supérieure à 200 kg	(D)
3. Stockage de fluides vierges, recyclés ou régénérés, à l'exception du stockage temporaire.	
1. Fluides autres que l'hexafluorure de soufre : la quantité de fluide susceptible d'être présente dans l'installation étant :	
a) En récipient de capacité unitaire supérieure ou égale à 400 l	(D)
b) Supérieure à 1 t et en récipients de capacité unitaire inférieure à 400 l	(D)
2. Cas de l'hexafluorure de soufre : la quantité de fluide susceptible d'être présente dans l'installation étant supérieure à 150 kg quel que soit le conditionnement	(D)

Régime de la déclaration : Arrêté du 04/08/14 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 4802

Figure 3-2 : Rubrique ICPE 4802 : définition des régimes.

3.3 SECURITE

3.3.1 NF EN 378

3.3.1.1 Introduction

Une norme, par nature d'application volontaire, ne s'impose que si elle est référencée dans un contrat de gré à gré ou si une réglementation la rend obligatoire.

Publiée au printemps 2017, la nouvelle version de la norme NF EN 378 ne déroge pas à cette règle et met à jour les exigences en matière de sécurité et d'environnement relatives aux systèmes frigorifiques et aux pompes à chaleur.

Elle tient compte des dernières évolutions générées par les contraintes réglementaires qui pèsent sur les fluides frigorigènes et imposées notamment par la F-Gaz.

Elle intègre la nouvelle classification des fluides frigorigènes à laquelle une nouvelle catégorie de fluide « légèrement inflammable » a été ajoutée et définit les mesures appropriées.

La nouvelle norme introduit de nouveaux indices (RCL, QLAV, QLMV) pour le calcul de la charge limite.

3.3.1.2 Présentation de la norme

La norme s'applique aux systèmes thermodynamiques mobiles et fixes de toutes tailles, incluant les pompes à chaleur, les systèmes de refroidissement ou de chauffage secondaire et les emplacements de ces systèmes frigorifiques. Elle exclue la climatisation automobile. Elle est structurée en 4 parties de manière à traiter l'ensemble du cycle de vie d'un système :

- NF EN 378-1 : Exigences de base, définition, classification et critère de choix
- NF EN 378-2 : Conception, construction, essais, marquage et documentation
- NF EN 378-3 : Installation in-situ et protection des personnes
- NF EN 378-4 : fonctionnement, maintenance, réparation et récupération.

3.3.1.3 Objet de la norme

Les prescriptions de la norme ont pour objectif de maîtriser les dangers inhérents aux systèmes frigorifiques, en particulier ceux liés aux caractéristiques physico-chimiques des fluides frigorigènes utilisés, aux températures et pression d'utilisation. L'annexe G de la partie I dresse la liste de ces risques potentiels et le Guide du CETIM sur la norme NF EN 378 entre dans le détail de l'analyse des risques.

Les mesures proposées de limitation des risques sont très diverses. Elles prennent en compte l'ensemble des phases de vie des systèmes et s'adressent à l'ensemble des acteurs : les fabricants, les installateurs, les mainteneurs et les exploitants.

D'autres normes produits viennent compléter le cadre réglementaire et normatif et font l'objet de mesures complémentaires de réduction des risques. Elles doivent être identifiées, appréciées (grâce à une analyse de risques).

La norme considère dans ses prescriptions plusieurs facteurs et module ses exigences en s'appuyant sur divers classifications définies ci-après.

3.3.1.4 Classification des fluides frigorigènes

La classe de sécurité des fluides est la combinaison de la classe de toxicité (A ou B) et de la classe d'inflammabilité (1, 2L, 2, ou 3) présentées dans le tableau ci-dessous. Les fluides de classe 2L ont une vitesse de combustion plus faible que ceux de la classe 2, réduisant la probabilité et les conséquences d'un allumage.

Tableau 3-7 : Classification des fluides frigorigènes en fonction de leur inflammabilité et toxicité

Inflammabilité	Toxicité	
	Faible	Elevée
Non inflammable	A1	B1
Légèrement inflammable	A2L	B2L
Moyennement inflammable	A2	B2
Hautement inflammable	A3	B3

Une liste présentée en Annexe E de la norme NF EN 378-1 précise la classe de sécurité d'un grand nombre de fluides frigorigènes ainsi que des informations sur leurs principales caractéristiques physico-chimiques.

Tableau 3-8 : Caractéristiques des fluides

Groupe de fluide DESP	Groupe qui permet de caractériser la dangerosité d'un fluide au regard de la directive sur les équipements sous pression. Les fluides du groupe 2 correspondent aux classes de sécurité A1, B1 et certains A2L. Les fluides du groupe 1 considérés comme dangereux correspondent aux classes de sécurité A2, A3, B2L et la majorité des A2L.
Limite pratique (kg/m ³)	Limite pratique d'un fluide frigorigène : représente le niveau de concentration le plus élevé dans un espace occupé qui n'entraîne aucun effet nuisible (aigu) pour l'évacuation d'urgence et n'engendre pas de risque d'inflammation du fluide frigorigène. Elle est utilisée pour déterminer la charge maximale pour ce fluide frigorigène pour une application spécifique.
ATEL (kg/m ³)	Limite d'exposition de toxicité aiguë (ATEL) : Concentration maximale recommandée de fluide frigorigène déterminée conformément à la NF EN 378 et destinée à réduire les risques de toxicité aiguë pour l'homme en cas de décharge d'un fluide frigorigène.
ODL (kg/m ³)	Limite de privation d'oxygène (ODL) : concentration d'un fluide frigorigène ou d'un autre gaz aboutissant à la présence d'oxygène en quantité insuffisante pour une respiration normale
LFL (kg/m ³)	Limite inférieure d'inflammabilité : concentration minimale de fluide frigorigène capable de propager une flamme dans un mélange homogène de fluide frigorigène et d'air
RCL	Limite de concentration du fluide frigorigène : concentration maximale de fluide frigorigène dans l'air fixée afin de réduire les risques de toxicité aiguë, d'asphyxie et d'inflammation
QLAV	Quantité limite avec ventilation supplémentaire : densité de charge de fluide frigorigène qui, lorsqu'elle est dépassée, engendre instantanément une situation dangereuse si la charge totale s'échappe dans l'espace occupé
QLMV	Quantité limite avec ventilation minimale : densité de charge de fluide frigorigène qui aboutirait à une concentration égale à la RCL dans une salle non étanche à l'air en cas de fuite modérément sévère de fluide frigorigène
GWP	Global Warning Potential ou Potentiel de Réchauffement planétaire (PRP)

Les fluides frigorigènes utilisés jusqu'à présent dans les installations frigorifiques et du génie climatique appartiennent principalement à la classe de sécurité A1 (R-404A, R-410A, R-134a, R-407C, etc.). Cependant, avec la F-GAZ limitant l'usage de HFC à fort PRP, le marché s'ouvre à des fluides alternatifs ayant un PRP plus faible mais des caractéristiques d'inflammabilité plus fortes. Le R-32 en est un exemple et sa classe est A2L. Le tableau suivant présente les caractéristiques de certains de ces fluides.

Tableau 3-9 : Fluides couramment utilisés à l'heure actuelle

Classification ASHRAE	R-134a	R-404A	R-407C	R-410A	R-32
Composition	1,1,1,2-Tétrafluoro-ethane	R-125/ R-143a/ R-134a	R-32/ R-125/ R-134a	R-32/ R-125	Difluoro-methane
Classe de sécurité	A1	A1	A1	A1	A2L
Groupe de fluide DESP	2	2	2	2	1
Limites pratiques	0,25	0,52	0,31	0,44	0,061
ATEL/ODL	0,21	0,52	0,29	0,42	0,30
LFL	NI	NI	NI	NI	0,307
PRP	1430	3922	1774	2088	675

Tableau 3-10 : Fluides dits « naturels »

Classification ASHRAE	R-290	R-600a	R-717	R-744
Composition	Propane	Isobutane	Ammoniac	CO ₂
Classe de sécurité	A3	A3	B2L	A1
Groupe de fluide DESP	1	1	1	2
Limites pratiques	0,008	0,011	0,00035	0,1
ATEL/ODL	0,09	0,059	0,00022	0,072
LFL	0,038	0,043	0,116	NI
PRP	3	3	0	1

Tableau 3-11 : HFO et mélanges HFC-HFO

Classification ASHRAE	R-1234yf	R-1234ze(E)	R-448A	R-449A	R-452A
Composition	2,3,3,3-tétrafluoroprop-1-ène	Trans-1,3,3,3-tétrafluoroprop-1-ène	R-32/ R-125 / R-1234yf/ R-134a/ R-1234ze(E)	R-32/ R-125/ R-1234yf/ R-134a	R-32/ R-125/ R-1234yf
Classe de sécurité	A2L	A2L*	A1	A1	A1
Groupe de fluide DESP	1	2*	2	2	2
Limites pratiques	0,058	0,061	0,388	0,357	0,423
ATEL/ODL	0,47	0,28	0,388	0,357	0,423
LFL	0,289	0,303	NI	NI	NI
PRP	4	7	1387	1397	2 140

*Conformément aux conditions d'essai de l'ISO 817, le fluide frigorigène est classé en 2L ; cependant, le groupe de fluides de la DESP est 2, sur la base du Règlement CLP (CE) 1272/2008.

3.3.1.5 Classification des lieux occupés

Un incident, survenant dans une zone à accès libre, aura des conséquences plus graves que dans une zone dont l'accès est restreint et limité à quelques personnes formées aux mesures de sécurité. La norme classe les zones d'occupation en trois catégories d'accès en fonction de la sécurité des personnes pouvant être directement affecté en cas de fonctionnement anormal du système frigorifique. Les considérations de sécurité prennent en compte l'emplacement, le nombre d'occupants potentiels et le type de personnes pouvant y pénétrer. Cette classification est présentée dans le Tableau 3-12.

Tableau 3-12 : Catégories d'accès selon l'occupation des lieux

Catégorie d'accès	Caractéristiques générales	Exemples
Accès général a	Pièces, parties de bâtiment, bâtiments : - des installations de couchages sont prévues - des personnes sont limitées dans leur mouvement - un nombre incontrôlé de personnes sont présentes - quiconque a accès sans personnellement être au courant des mesures de sécurité de l'établissement	Etablissement recevant du public : Hôpitaux, tribunaux, supermarchés, écoles, salles de concert, hôtels, restaurants...
Accès surveillé b	Pièces, parties de bâtiment, bâtiments ou seul un nombre limité de personne peuvent se rassembler, certaines étant nécessairement au courant des mesures de sécurité de l'établissement	Bureaux ou locaux professionnels, laboratoires, usines, etc...
Accès réservé c	Pièces, parties de bâtiment, bâtiments ou n'ont accès que des personnes autorisées qui sont au courant des mesures générale et spéciale de sécurité de l'établissement et où la fabrication, le traitement ou le stockage du matériel ou des produits sont faits sur place	Installation de fabrication (produits chimiques ou alimentaires) d'entreposage, zones non accessibles au public dans les supermarchés...

3.3.1.6 Classification des emplacements des systèmes frigorifiques

L'emplacement des systèmes frigorifiques est également un facteur clé à prendre en compte pour l'appréciation du niveau de risque encouru et la détermination des mesures de sécurité appropriées. La norme tient compte dans ses prescriptions de quatre classes d'emplacements présentées dans le Tableau 3-13.

Tableau 3-13 : Classification selon l'emplacement des systèmes frigorifiques

Classe d'emplacement	Emplacement des systèmes frigorifiques ou des parties contenant du fluide frigorigène
I	Situé dans un espace occupé, c'est-à-dire un espace clos d'un bâtiment occupé par des personnes pendant une période significative
II	Compresseur et récipient sous pressions (Côté HP) situés dans une salle des machines ou à l'air libre, les autres parties dans l'espace occupé
III	Dans une salle des machines ou à l'air libre. une salle des machine se définissant comme un espace clos muni d'une ventilation mécanique, isolé des zones accessibles et non accessibles au public, destiné à contenir les composant du système
IV	Dans une enceinte ventilée (système de conception industrielle spéciale)

3.3.1.7 Classification des systèmes frigorifiques

L'architecture peut être différente selon les systèmes et impacter largement le niveau de risques encourus en cas de fonctionnement anormal. La norme classe les divers systèmes. Elle distingue notamment les systèmes directs et indirects et précise la relation avec la classe d'emplacement.

3.3.1.8 Limitation de charges en fluide frigorigène

La quantité en fluide frigorigène contenue dans un système frigorifique est également déterminante en cas d'incident. La norme prévoit des restrictions de charge modulées selon la combinaison des facteurs de classification susmentionnés et tenant compte de l'application (confort ou autre) pour laquelle le système est prévu.

Il s'agit bien évidemment d'éviter, en cas de fuite, des concentrations pouvant entraîner des risques de toxicité aigüe, d'asphyxie ou d'inflammabilité, dans tout espace confiné ou ces fluides pourraient s'échapper directement ou, dans certaines circonstances, par le biais d'un fluide caloporteur. Ces dispositions impactent le choix du système et les implantations possibles.

Les tableaux suivants indiquent respectivement les limites de charges pour les fluides de classe A1 et A2L.

Tableau 3-14 : Plafonds de charge

Fluide frigorigène	Données d'inflammabilité selon ISO 817				Plafond de charge systèmes basé sur l'inflammabilité En espaces occupés (classe emplacement I et II) Selon NF EN 378		
	Classification Iso 817	LFL [kg/m³]	LFL [%=Vol/Vol]	Densité de vapeur à 25°C [kg/m³]	Plafond 1 Sans contrainte Limite Base [kg]	Plafond 2 Sans contrainte [kg]	Plafond 3 Avec contrainte + mesure sécurité [kg]
R-32	A2L	0,307	14,41%	2,13	1,84	11,97	59,87
R-1234yf	A2L	0,289	6,20%	4,66	1,73	11,27	56,36
R-1234ze	A2L	0,303	6,50%	4,66	1,82	11,82	59,09
R-143a	A2L	0,282	8,20%	3,44	1,69	11	54,99
R-152a	A2	0,13	4,81%	2,7	0,52	3,38	16,9
R-1270	A2	0,046	2,67%	1,72	0,18	1,2	5,98
R-290	A3	0,038	2,11%	1,8	0,15	0,99	1,5
R-600a	A3	0,043	2,38%	2,38	0,17	1,12	1,5

L'exigence relative à la restriction de charge est déterminée sur la base de la charge admissible la plus contraignante obtenue lors des calculs fondés, d'une part sur la toxicité, et d'autre part sur l'inflammabilité.

Le calcul de la limite de charge consistait jusqu'à présent, notamment pour les fluides A1, à multiplier le volume du plus petit des locaux dans lequel le fluide pouvait s'échapper par leur limite pratique. Désormais, la norme permet de baser le calcul sur de nouveaux indices RCL, QLMV et QLAV. Ces trois indices permettent de tenir compte du niveau de ventilation de locaux. Un niveau de concentration est accepté au-delà de la limite RCL (pour étage le plus bas en sous-sol) ou QLMV (pour autres étages) sous réserve de la mise en place d'une mesure additionnelle de sécurité contribuant à la maîtrise du danger en cas de fuite. Au-delà de la limite QLAV, au moins deux mesures additionnelles sont requises (ventilation d'urgence supplémentaire, alarme ou détecteur...). La norme précise les caractéristiques des systèmes supplémentaires à mettre en œuvre.

3.3.1.9 Règles relatives à la conception et la réalisation des circuits frigorifiques

La norme reprend dans sa partie II les prescriptions de la précédente norme sur la conception et la réalisation in-situ des circuits frigorifiques : sur la nature et le type des tubes et raccords, les accessoires, le supportage, l'emplacement, l'accessibilité, etc.

3.3.1.10 Essais et réception de l'installation

La norme reprend également de la précédente norme divers essais de réception : résistance à la pression, étanchéité, fonctionnement des dispositifs de sécurité de l'installation complète avant mise en service.

Dans cette partie sont également indiqués les marquages à effectuer (machines, tuyauteries) et sur les documentations techniques à fournir et leur contenu (constitution du DOE et du dossier descriptif des équipements sous pression notamment)

3.3.1.11 Fonctionnement maintenance réparation et récupération

Les exigences de maintenance, récupération, réutilisation, mise au rebut des systèmes frigorifiques font l'objet de la partie IV de la norme. Elle précise les compétences nécessaires au personnel, les modes de manutention et de stockage des fluides frigorigènes.

Cette partie précise également les points à vérifier lors des contrôles en service. Un amendement a récemment été publié pour préciser les fréquences d'opérations de maintenance en fonction du type d'équipement et de la charge en fluide de l'installation.

3.3.2 SUIVI EN SERVICE DES EQUIPEMENTS SOUS PRESSION

3.3.2.1 Cadre réglementaire

La directive 97/23/CE relative aux équipements sous pression, dite DESP a été transposée en droit français par le décret 99-1046 du 13 décembre 1999 ; elle porte sur les dispositions relatives à la conception, la fabrication et l'évaluation de la conformité des équipements sous pression dont la pression maximale admissible est supérieure à 0,5 bar. Les équipements dont la conformité à la directive est certifiée portent le marquage CE.

La directive 97/23/CE a fait l'objet d'une refonte, sous le nom de directive 2014/68/UE du Parlement Européen et du Conseil du 15 mai 2014, relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché des équipements sous pression (refonte). La refonte porte essentiellement sur des explications complémentaires en regard de la directive.

Dans son avant-propos, au (7), elle précise :

« La présente directive devrait également s'appliquer aux ensembles composés de plusieurs équipements sous pression assemblés pour former un tout intégré et fonctionnel. Ces ensembles peuvent aller d'un ensemble simple, tel un autocuiseur, jusqu'à un ensemble complexe, telle une chaudière tubulaire à eau. Lorsque le fabricant d'un ensemble a l'intention de mettre celui-ci sur le marché et en service en tant que tel — et non pas ses éléments constitutifs non assemblés —, cet ensemble devrait être conforme à la présente directive. En revanche, la présente directive ne devrait pas s'appliquer à l'assemblage d'équipements sous pression effectué sur le site et sous la responsabilité de l'utilisateur qui n'est pas le fabricant, tel que des installations industrielles. ».

Le décret 99-1046 a depuis été abrogé, à compter du 1er janvier 2018, par le décret n° 2016-1925 du 28 décembre 2016. Ce dernier décret vise à poursuivre l'insertion de la réglementation « ESP » auparavant fixée par des décrets, dans le Code de l'environnement (livre V, titre V) au sein de son chapitre dédié aux « Produits et équipements à risques » (chapitre VII, articles R557-1 à R557-15).

Ces dispositions font l'objet du nouvel arrêté du 20 novembre 2017, dont l'objectif est de maintenir le niveau de sécurité de l'équipement pendant son exploitation (Art 17 du décret) en prévoyant ses conditions d'installations et de mise en service pour l'entretien, la surveillance et le contrôle. Ce nouvel arrêté, qui remplace l'arrêté du 15 mars 2000 modifié, généralise la mise en œuvre de plans d'inspection ouvrant aux exploitants, ne disposant pas de Service d'inspection reconnu (SIR), la possibilité de mettre en place une Inspection basée sur le risque afin d'identifier, d'évaluer et de matérialiser les événements susceptibles de compromettre l'intégrité des équipements sous pression de façon à définir la fréquence, la nature et le type de contrôle les plus adéquats en tenant compte des conditions et contraintes d'exploitation.

L'arrêté conduit à des opérations qui sont inappropriées pour les systèmes frigorifiques ; la profession a donc mis en place un protocole particulier de suivi au travers d'un Cahier Technique Professionnel « système frigorifique », validé par décision du BSEI le 7 juillet 2014.

3.3.2.2 Vocabulaire

- Equipement frigorifique sous pression :

Ce sont : les récipients (réservoirs, certains échangeurs, ...), tuyauteries, accessoires de sécurité (soupapes, pressostats, ...) et accessoires sous pression (vannes, filtres, ...).

- Ensemble frigorifique sous pression :

Ce sont : plusieurs équipements sous pression assemblés par un fabricant (en usine ou sur site) utilisés en réfrigération, en conditionnement de l'air ou comme pompe à chaleur pour former un tout intégré et fonctionnel.

Cet ensemble a fait l'objet d'une évaluation de conformité aux exigences essentielles de la DESP par un organisme notifié et dispose d'un marquage CE.

- Installation frigorifique :

Plusieurs équipements sous pression mis ensemble ou individuellement sur le marché et assemblés sur site sous la responsabilité de l'exploitant pour constituer un système frigorifique utilisé en réfrigération, en conditionnement de l'air ou comme pompe à chaleur .

- Accessoires de sécurité :

Dispositifs destinés à la protection des équipements sous pression contre le dépassement des limites admissibles.

- Accessoires sous pression :

Dispositifs jouant un rôle opérationnel et dont l'enveloppe est soumise à pression.

3.3.2.3 Classification des équipements

La DESP conduit à classer les équipements par catégories de risques ; ces catégories sont définies par la classe de risque du fluide que contient l'ESP et par les dispositions sous lesquelles il a été conçu et fabriqué (modules).

Il existe 4 catégories de risque, applicables sur les récipients et sur les tuyauteries, et de façon différente sur les fluides à l'état liquide ou à l'état gazeux.

Les catégories de risque sont définies par la pression maximale admissible (PS), le volume (V) ou le diamètre (DN) des équipements.

Les ESP comportent sur leur plaque signalétique l'indication des modules et/ou l'indication de la catégorie.

3.3.2.4 Mise en service

A partir de certaines conditions, la mise en service d'un ESP peut contraindre à une déclaration en préfecture (Ex : pour un récipient gaz de groupe 2 : $PS > 4$ bars et $PS.V > 10.000$ bar.litres).

3.3.2.5 Suivi en service

Le suivi en service des ESP est régi par l'arrêté du 20 novembre 2017 et les aménagements décrits au sein du Cahier Technique Professionnel Systèmes Frigorifiques du 7 juillet 2014.

Le CTP ne s'applique que pour les fluides à l'état gazeux et à partir de la catégorie II. En cas de possibilité de mélange liquide/vapeur, la limite est conditionnée par les données gaz sauf si on peut prouver qu'il n'y aura jamais de gaz, ceci implique son application sur l'ensemble des équipements d'une installation frigorifique.

Le cahier est composé de 5 chapitres :

Tableau 3-15 : Chapitres de la DESP

A – Généralités applicables aux ESP		
B – Récipients avec dispositions spécifiques	C – Récipients DESP	E - Tuyauteries
F – Cas particuliers		

Il porte sur les points suivants :

- Vérification initiale à la mise en service ;

La Vérification Initiale (VI) est réalisée dans un délai n'excédant pas 3 mois à partir de la date de mise en service (première utilisation par l'utilisateur final - le transfert du système frigorifique du fabricant à l'exploitant faisant l'objet d'un document). A défaut la date de l'épreuve de la vérification finale de la fabrication du récipient ou de la tuyauterie est prise en référence pour le calcul des échéances réglementaires citées dans les chapitres suivants.

Elle est réalisée par une personne habilitée qui procède à des vérifications documentaires et opérations de contrôles visuels. Par ailleurs, dans le cas d'une installation, il est également vérifié l'adéquation entre les réglages des accessoires de sécurité et les limites admissibles (PS/TS) des récipients qu'ils protègent.

Pour un ensemble CE cette vérification a été réalisée par le fabricant et l'Organisme Notifié dans le cadre de la vérification finale et ne nécessite pas d'être reproduite.

La VI donne lieu à un compte-rendu.

- Inspection périodique (24 ou 40 mois) ;

Sauf cas particuliers, l'inspection périodique est réalisée à une fréquence de 40 mois maximum.

Elle porte sur les vérifications documentaires, des contrôles visuels, la vérification de l'état et du mode de fonctionnement du condenseur, de la vérification des accessoires de sécurité.

Elle est réalisée par une personne habilitée ; elle donne lieu à un compte-rendu.

- Requalification périodique ;

La requalification périodique porte sur la vérification de la réalisation des opérations précédentes et des contrôles complémentaires, notamment sur les accessoires de sécurité (retarage ou remplacement des soupapes). La requalification donne lieu à une attestation de requalification. Cette opération ne peut être réalisée que par un organisme habilité.

- Compétence des personnes habilitées et formation.

Le CTP contient le programme de formation permettant au chef d'entreprise d'habiliter son personnel au suivi en service des ESP.

3.3.3 REGLEMENT DE SECURITE CONTRE LES RISQUES D'INCENDIE ET DE PANIQUE DANS LES ETABLISSEMENTS RECEVANT DU PUBLIC (ERP)- ARTICLE CH35

La réglementation relative à la sécurité contre les risques d'incendie dans les établissements recevant du public est définie par l'arrêté du 25 juin 1980 portant approbation des dispositions générales du règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (ERP). L'article CH35 de cet arrêté est intitulé Production, transport et utilisation du froid, titre suffisamment générique pour y inclure tout type d'équipement de production de froid. Utilisant une ancienne classification de la norme NF EN 378 / 2000, ce règlement interdit purement et simplement l'usage de fluides inflammables pour les équipements visés par ce chapitre. Cette réglementation est aujourd'hui obsolète et fait l'objet de nombreux échanges entre ministère et professionnels du fait :

- D'une clarification du champ applicable de cet article qui viserait uniquement les installations fixes de climatisation et ne s'appliquerait pas aux installations de froid commercial.
- De l'évolution de la classification des fluides et de l'introduction de la classe A2L non mentionnée dans la réglementation actuelle.

Dès lors, des aménagements réglementaires sont nécessaires pour fixer les règles dans le CH 35 applicables aux installations de climatisation de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire utilisant des fluides inflammables dont les fluides A2L. L'absence de reconnaissance des spécificités des fluides A2L constituerait un frein à la transition vers des fluides à faible PRP. Le fait d'exclure du règlement les installations de réfrigérations commerciales vont induire des travaux complémentaires pour fixer les conditions acceptables d'usage des installations utilisant des HC :

- Guide M fixant la charge maximale en HC (1,5 kg) et les conditions d'installation des meubles de vente hermétiquement scellés (distance d'éloignement) ;
- Etude Ineris sollicitée par le ministère en charge de l'écologie pour confirmer les seuils maximum admissibles en fluides de classe A3 dans les ERP.

Il est donc attendu à assez court terme des évolutions réglementaires du CH35 pour régler ces questions. Par ailleurs, le statut des équipements centralisés de réfrigération commerciale

utilisant des fluides A2L voir A3 reste flou. En l'excluant du champ d'application du règlement ERP et des guides et études en cours, ces équipements se trouvent dans un vide juridique très inconfortable pour les fabricants.

L'AFCE, UNICLIMA et d'autres organisations ont travaillé activement avec les ministères concernés et l'INERIS pour une reconnaissance explicite des fluides A2L dans le règlement CH35 et sur le traitement des applications non actuellement traitées dans le rapport de l'INERIS. A l'heure du bouclage de l'étude, le texte définitif n'est pas encore publié.

La cohérence entre la future réglementation applicable aux ERP et les guides (type Guide M) avec les normes applicables aux produits devra aussi être recherchée pour éviter que les normes ne soient finalement plus contraignantes que la réglementation et place les fabricants en position d'arbitre.

3.3.4 NORMES PRODUITS

3.3.4.1 IEC 60335-2-24 : Congélateurs et réfrigérateurs

Ce document traite de la sécurité des réfrigérateurs, congélateurs, fabriques de glace et sorbetières à usage domestique ou à usage de loisir pour le camping, le caravanning et le bateau. Il traite également des appareils à compression qui utilisent des fluides frigorigènes inflammables.

3.3.4.1.1 Marquage et instructions

Les appareils à compression (paragraphe 7.1) qui utilisent des fluides frigorigènes inflammables doivent porter le symbole «Attention: risque d'incendie».



Figure 3-3 : Pictogramme « Attention : risque d'incendie »

Les appareils utilisant du R-744 dans un système de réfrigération transcritique doivent porter le marquage, en substance, de la mise en garde suivante : « Le système contient un fluide frigorigène sous haute pression. Ne pas toucher au système. L'entretien doit être fait uniquement par des personnes qualifiées ».

3.3.4.1.2 Dispositions constructives

Les appareils à compression (paragraphe 22.103), y compris les enveloppes de protection d'un système de refroidissement protégé, utilisant des fluides frigorigènes inflammables doivent résister à :

- une pression égale à 3,5 fois la pression de vapeur saturante du fluide frigorigène à 70 °C pour les parties situées du côté haute pression en fonctionnement normal;
- une pression égale à 5 fois la pression de vapeur saturante du fluide frigorigène à 20 °C pour les parties situées uniquement du côté basse pression en fonctionnement normal.

Les appareils utilisant un système de réfrigération transcritique doivent comporter du côté haute pression du système de réfrigération une soupape de sécurité sur le compresseur ou entre le compresseur et le refroidisseur de gaz. Entre le compresseur et la soupape de sécurité, on ne doit

trouver aucun autre dispositif de rupture ni d'autres éléments que la tuyauterie qui puissent entraîner une chute de pression.

Par ailleurs (paragraphe 22.106), la charge en fluide frigorigène des appareils à compression qui utilisent des fluides frigorigènes inflammables dans leur système de réfrigération ne doit pas dépasser 150 g par circuit de réfrigération individuel.

Les appareils à compression (paragraphe 22.109) qui utilisent des fluides frigorigènes inflammables doivent être construits de façon telle que du fluide frigorigène fuyant ne stagne pas au point de créer un risque d'incendie ou d'explosion dans des endroits situés à l'extérieur des compartiments conservateurs de denrées où sont montés les composants électriques qui produisent des arcs ou des étincelles, ou dans des endroits où sont montés les luminaires.

Les températures des surfaces qui peuvent être exposées à des fuites de fluide frigorigène inflammable ne doivent pas dépasser la température d'inflammation du fluide frigorigène spécifiée au Tableau suivant, diminuée de 100 K.

Dans les appareils à compression (paragraphe 22.111) qui utilisent un fluide frigorigène inflammable dans leur système de refroidissement, tous les points de contact possibles intempestifs entre l'aluminium non revêtu et les tuyauteries en cuivre ou entre d'autres métaux différents doivent être protégés des couplages galvaniques par un moyen concret tel que l'utilisation de manchons ou butées isolantes.

3.3.4.2 IEC 60335-2-40 : PAC électriques, climatiseurs et déshumidificateurs

Ce document traite de la sécurité des pompes à chaleur, y compris les pompes à chaleur pour l'eau chaude sanitaire, des climatiseurs et des déshumidificateurs qui comportent des motocompresseurs hermétiques, dont la tension assignée maximale n'est pas supérieure à 250 V pour les appareils monophasés et à 600 V pour tous les autres appareils.

Cette norme qui doit être publiée sous peu est extrêmement importante et nous avons pu obtenir le draft final. Ce document précise les règles de conception, d'installation, de marquage, de maintenance des équipements utilisant des fluides inflammable 2L et 3. C'est à l'heure actuelle le document le plus complet pour fixer les règles pour les charges admissibles de fluides inflammables suivant les volumes pièces dans lesquels ces produits sont installés. Nous présenterons ci-dessous les éléments les plus nouveaux et les plus importants.

Marquages : les équipements contenant des fluides inflammables (A3 ou A2L) doivent afficher les symboles suivants sur la plaque constructeur :

Fluide frigorigène A 3 :



Symbol ISO 7010- W021

Fluide frigorigène A2L :



L'annexe normative BB définit en $[\text{kg}/\text{m}^3]$ les limites inférieures d'inflammabilité en $[\text{kg}/\text{m}^3]$

Tableau 3-16 : Fluides frigorigènes et leurs caractéristiques

Numéro du fluide frigorigène	Nom du fluide frigorigène	Classe de sécurité	Température d'inflammation du fluide frigorigène [°C]	Limite inférieure d'inflammabilité du fluide frigorigène [kg/m³]
R-32	Difluoro-méthane	A2L	648	0,307
R-50	Méthane	A3	645	0,032
R-143a	1,1,1 - Trifluoroéthane	A2L	750	0,282
R-152a	1,1 - Difluoroéthane	A2	455	0,13
R-170	Ethane	A3	515	0,038
R-290	Propane	A3	470	0,038
R-600	n-Butane	A3	365	0,038
R-600a	Isobutane	A3	460	0,043
R-1150	Ethylène	A3	425	0,036
R-1270	Propylène	A3	455	0,046
R-142b	1-Chloro -1,1 - Difluoroéthane	A2L	750	0,329
R-1234yf	2,3,3,3 - Tetrafluoro - 1 - Propène	A2L	405	0,289
R-1234ze (E)	Trans - 1,3,3,3 - Tetrafluoro - 1 - Propène	A2L	368	0,303

L'annexe normative GG de 25 pages définit les limites de charge des fluides A3 et A2L et obligations pour la ventilation et les systèmes secondaires.

Cette norme permet le calcul de la charge maximale de frigorigène inflammable en fonction de la limite inférieure d'inflammabilité (cf. tableau de l'annexe BB) et le volume de la pièce. Les formules sont différentes pour les fluides A3 et A2L. Des formules spécifiques sont utilisées pour les pièces ventilées et non ventilées. Sont aussi définis des équipements munis de ventilateurs de l'équipement dédiés à la dilution des fluides A2L en cas de fuite.

Des règles sont définies pour les systèmes secondaires prenant en compte la possibilité de fuites de fluide frigorigène inflammable via le circuit secondaire en cas de rupture de tubes ou de parois des échangeurs fluide frigorigène / fluide secondaire.

D'autres règles importantes sont définies dans les annexes suivantes :

Annexe CC : sur le transport, le marquage et le stockage des équipements utilisant des fluides inflammables

Annexe DD : exigences pour le manuel de fonctionnement d'installation et de maintenance des équipements contenant des fluides inflammables

Annexe FF : Tests de simulation de fuites

Annexe HH : compétences du personnel de maintenance

Annexe JJ : mode acceptable d'ouverture des relais pour éviter l'ignition des fluides A2L

Annexe KK : méthode de test pour l'ignition de fluide A2L par des surfaces chaudes

Annexe LL : système de détection pour les fluides A2L

Annexe MM : test de confirmation de la localisation des détecteurs de fluides frigorigènes

Annexe NN : Test de vérification de l'arrêteur de flamme d'une enceinte contenant un équipement chargé d'un fluide A2L

3.3.4.3 IEC 60335-2-89 : appareils de réfrigération à usage commercial avec une unité de condensation du fluide frigorigène ou un compresseur incorporés ou à distance

Ce document traite de la sécurité des appareils de réfrigération électriques à usage commercial qui ont un compresseur incorporé ou qui sont fournis sous forme de deux unités en vue d'un assemblage en un seul appareil conformément aux instructions du fabricant (système à deux ensembles).

Les appareils dont la charge est supérieure à 150 g de fluide frigorigène inflammable dans chaque circuit de réfrigération séparé ne sont pas couverts par cette norme. Pour les appareils dont la charge est supérieure à 150 g de fluide frigorigène inflammable dans chaque circuit de réfrigération et pour l'installation, la NF EN 378 peut être appliquée.

3.3.4.3.1 Marquage et instructions

Pour les appareils qui utilisent des fluides frigorigènes inflammables, les instructions doivent inclure des informations pour la manipulation, l'entretien courant et à la mise au rebut de l'appareil.

Les appareils à compression (paragraphe 7.1) qui utilisent des fluides frigorigènes inflammables doivent porter le symbole «Attention: risque d'incendie».



Figure 3-4 : Pictogramme « Attention : risque d'incendie »

Les appareils utilisant du R-744 dans un système de réfrigération transcritique doivent porter le marquage, en substance, de la mise en garde suivante : « Le système contient un fluide frigorigène sous haute pression. Ne pas toucher au système. L'entretien doit être fait uniquement par des personnes qualifiées ».

Les instructions pour les appareils (paragraphe 7.12) qui utilisent des fluides frigorigènes inflammables doivent également comprendre en substance les mises en garde suivantes:

- MISE EN GARDE : Maintenir dégagées les ouvertures de ventilation dans l'enceinte de l'appareil ou dans la structure d'encastrement.
- MISE EN GARDE : Ne pas utiliser de dispositifs mécaniques ou autres moyens pour accélérer le processus de dégivrage, autres que ceux recommandés par le fabricant.
- MISE EN GARDE : Ne pas endommager le circuit de réfrigération.
- MISE EN GARDE : Ne pas utiliser d'appareils électriques à l'intérieur des compartiments destinés à la conservation des denrées, à moins qu'ils ne soient du type recommandé par le fabricant.

Les instructions des appareils utilisant du R-744 dans un système de réfrigération transcritique doivent comporter en substance la mise en garde suivante

- MISE EN GARDE : Le système de réfrigération est sous haute pression. Ne pas y toucher. Contacter des services d'entretien qualifiés avant la mise au rebut.

Pour les appareils destinés à être raccordés au réseau d'alimentation en eau pour des besoins de refroidissement, les instructions doivent comprendre une information sur la température maximale autorisée de l'arrivée d'eau compatible avec un fonctionnement sûr de l'appareil.

Pour les appareils (paragraphe 7.15) qui utilisent des fluides frigorigènes inflammables, le marquage du type de fluide frigorigène inflammable et de l'agent moussant de l'isolation inflammable doit être visible lorsqu'on accède aux moto-compresseurs, et, dans le cas d'appareils avec une unité de fluide frigorigène à distance, aux raccordements des tuyaux.

Le symbole «Attention : risque d'incendie» doit être placé sur la plaque signalétique de l'unité, près de la mention du type de fluide frigorigène et de l'information concernant la charge. Il doit être visible après l'installation de l'appareil.

3.3.4.3.2 Dispositions constructives

Les appareils (paragraphe 22.7), y compris les enveloppes de protection d'un système de refroidissement protégé, qui utilisent des fluides frigorigènes inflammables doivent résister à :

- une pression égale à 3,5 fois la pression de vapeur saturée du fluide frigorigène à 70 °C, ou égale à 3,5 fois la pression à la température critique si celle-ci est inférieure à 70 °C, la pression d'essai étant arrondie au 0,5 MPa (5 bar) supérieur, pour les parties situées du côté haute pression en utilisation normale;
- une pression égale à 5 fois la pression de vapeur saturée du fluide frigorigène à 20 °C, ou égale à 2,5 MPa (25 bar), suivant la valeur la plus élevée, la pression d'essai étant arrondie au 0,2 MPa (2 bar) supérieur, pour les parties situées uniquement du côté basse pression en utilisation normale.

Les appareils utilisant un système de réfrigération transcritique doivent comporter du côté haute pression du système de réfrigération une soupape de sécurité sur le compresseur ou entre le compresseur et le refroidisseur de gaz. Entre le compresseur et la soupape de sécurité, on ne doit trouver aucun autre dispositif de rupture ni d'autres éléments que la tuyauterie qui puissent entraîner une chute de pression.

Par ailleurs (paragraphe 22.105), la charge de fluide frigorigène des appareils qui utilisent des fluides frigorigènes inflammables dans leur système de réfrigération ne doit pas dépasser 150 g par circuit de réfrigération séparé.

Les appareils à système de refroidissement (paragraphe 22.106) protégé et qui utilisent des fluides frigorigènes inflammables doivent être construits de façon à éviter tout risque d'incendie ou d'explosion, en cas de fuite de fluide frigorigène du système de refroidissement.

Pour les appareils à compression (paragraphe 22.107) à systèmes de refroidissement non protégés et qui utilisent des fluides frigorigènes inflammables, les composants électriques situés à l'intérieur des compartiments conservateurs de denrées, qui, dans les conditions de fonctionnement normal ou en fonctionnement anormal, produisent des étincelles ou des arcs, et les luminaires doivent être soumis aux essais et doivent satisfaire aux exigences de l'Annexe BB pour les gaz du groupe IIA ou pour le fluide frigorigène utilisé.

Les températures des surfaces (paragraphe 22.109) qui peuvent être exposées à des fuites de fluide frigorigène inflammable ne doivent pas dépasser la température d'inflammation du fluide frigorigène spécifiée au Tableau 3-16, diminuée de 100 K.

Les systèmes à deux ensembles (paragraphe 22.114) qui utilisent un fluide frigorigène inflammable ne doivent pas pouvoir être installés en utilisant des conduites d'interconnexion de fluide frigorigène pré-chargées.

3.4 EFFICACITE ENERGETIQUE/ECO DESIGN

La politique européenne ErP (Energy related Products) vise à améliorer l'efficacité énergétique et environnementale des appareils consommant de l'énergie. L'UE cherche à atteindre l'objectif 20-20-20, qui vise, d'ici 2020, à :

- Diminuer les émissions de CO₂ de 20 %
- Réduire de 20 % l'utilisation de l'énergie primaire
- Augmenter de 20 % la part des énergies renouvelables.

Elle est déclinée en 2 Directives :

- Ecoconception (ou éco design) 2009/125/CE : Cette directive fixe un certain nombre de mesures afin de réduire l'impact environnemental sur les produits consommateurs d'énergie tout au long de leur cycle de vie. Elle vise à éliminer les produits les moins performants énergétiquement du marché.
- Etiquetage énergétique (ou éco-labelling) 2010/30/UE : Cette directive vise à informer le consommateur et l'inciter à acheter des produits résidentiels les plus performants avec la valorisation de leurs classes énergétiques (A meilleur que G). C'est l'obligation d'afficher une indication des consommations énergétiques.

La directive EcoDesign est retranscrite en des règlements d'écoconception spécifiques à chaque famille de produits décrits ci-après.

3.4.1 REFRIGERATEURS ET CONGELATEURS DOMESTIQUES

Le règlement n°643/2009 établit des exigences d'écoconception applicables aux réfrigérateurs et congélateurs domestiques.

La consommation annuelle d'électricité des produits soumis au présent règlement dans la Communauté européenne a été estimée à 122 TWh en 2005, c'est-à-dire 56 millions de tonnes d'équivalent CO₂. S'il est prévu que la consommation d'énergie des appareils de réfrigération ménagers diminuera d'ici à 2020, cette diminution devrait ralentir car les exigences et les étiquetages énergétiques sont dépassés. Il ne sera donc pas possible de réaliser des économies

d'énergie avec un bon rapport coût-efficacité si aucune mesure supplémentaire n'est introduite pour actualiser les exigences d'écoconception en vigueur.

Tableau 3-17 : Tableau des exigences et calendrier : Règlement 643/2009

Type d'Équipement	Norme d'essais	1 ^{er} juillet 2010	1 ^{er} juillet 2012	1 ^{er} juillet 2014
Appareil de réfrigération à compression de vapeur	NF EN 62552 Août 2015 Appareils de réfrigération à usage ménager - Caractéristiques et méthodes d'essai	IEE < 55	IEE < 44	IEE < 42
Appareils de réfrigération à absorption et appareils de réfrigération de type autre		IEE < 150	IEE < 125	IEE < 110

3.4.2 CLIMATISEURS ET VENTILATEURS DE CONFORT

Le règlement 206/2012 établit des exigences d'écoconception applicables aux climatiseurs et aux ventilateurs de confort.

La consommation d'électricité annuelle de climatiseurs et ventilateurs de confort a été estimée à 30 TWh, dans l'UE, en 2005. On estime qu'elle atteindra 74 TWh en 2020 si aucune mesure n'est prise.

Etant donné que les fluides frigorigènes fluorés sont visés dans le règlement F-Gaz, le présent règlement ne fixe aucune exigence spécifique les concernant. Toutefois, une compensation est prévue au titre des exigences d'écoconception afin d'inciter les acteurs du marché à utiliser des fluides frigorigènes moins nocifs pour l'environnement. La compensation aura pour effet d'alléger les exigences minimales d'efficacité énergétique pour les appareils fonctionnant à base de fluides frigorigènes à faible potentiel de réchauffement planétaire (PRP).

Le règlement définit une consommation électrique maximale en mode veille minimale ainsi qu'un paramètre permettant de mesurer l'efficacité énergétique du produit (EER, COP) et les valeurs cibles. Les mesures sont réalisées en utilisant généralement une norme harmonisée à la directive (EN 14825:2016 pour les climatiseurs).

Tableau 3-18 : Exigences relatives à la consommation électrique maximale en mode arrêt et en mode veille pour les climatiseurs à simple et à double conduit et pour les ventilateurs de confort

Mode	Exigence	1 ^{er} janvier 2013	1 ^{er} janvier 2014
Arrêt	La consommation électrique de l'équipement pour tous les états correspondant au mode « arrêt » ne doit pas dépasser :	1W	0,50W
Veille	La consommation électrique de l'équipement se trouvant dans tout état dans lequel seule une fonction de réactivation est assurée, ou bien uniquement une fonction de réactivation associée à une indication unique montrant que la fonction de réactivation est activée ne dépasse pas :	1W	0,50W
	La consommation électrique de l'équipement se trouvant dans tout état dans lequel seul l'affichage d'une information ou d'un état est assuré, ou uniquement l'affichage d'une information ou d'un état associé à une fonction de réactivation est activée ne dépasse pas :	2W	1W
Disponibilité du mode « veille » et/ou du mode « arrêt »	L'équipement est, dans la mesure où cela est compatible avec l'usage prévu, doté d'un mode « arrêt » et/ou « veille », et/ou d'un autre mode dans lequel, lorsqu'il est connecté au secteur, les exigences applicables en matière de consommation d'électricité en mode « arrêt » et/ou « veille » sont respectées.		

Tableau 3-19 : Tableau des exigences et calendrier : Règlement 206/2012.

Type d'Équipement	Puissance nominale	PPR Fluide	1 ^{er} janvier 2013		1 ^{er} janvier 2014	
			EER	COP	EER	COP
Climatiseur simple conduit	< 6 kW	PRP>150	2,40	1,80	2,60	2,04
	< 6 kW	PRP≤150	2,16	1,62	2,34	1,84
	6kW≤P≤12kW	PRP>150	2,40	1,80	2,60	2,04
	6kW≤P≤12kW	PRP≤150	2,16	1,62	2,34	1,84
Climatiseur double conduit	< 6 kW	PRP>150	2,40	2,36	2,60	2,60
	< 6 kW	PRP≤150	2,16	2,12	2,34	2,34
	6kW≤P≤12kW	PRP>150	2,40	2,36	2,60	2,60
	6kW≤P≤12kW	PRP≤150	2,16	2,12	2,34	2,34

Tableau 3-20 : Tableau des exigences et calendrier : Règlement 206/2012

Type d'Équipement	Puissance nominale	PPR Fluide	Au 1 ^{er} janvier 2014	
			SEER	SCOP
Climatiseur à l'exception des climatiseurs à simple ou double conduit	< 6 kW	PRP>150	4,60	3,80
	< 6 kW	PRP≤150	4,14	3,42
	6kW≤P≤12kW	PRP>150	4,30	3,80
	6kW≤P≤12kW	PRP≤150	3,87	3,42

3.4.3 DISPOSITIFS DE CHAUFFAGE DES LOCAUX ET CHAUFFAGE MIXTE

Le règlement n°813/2013 établit des exigences d'écoconception applicables aux dispositifs de chauffage des locaux et aux dispositifs de chauffage mixte.

La consommation annuelle d'énergie des dispositifs de chauffage des locaux et des dispositifs de chauffage mixtes a été estimée à 12089 PJ (environ 289 Mtep) dans l'Union, en 2005, soit 698 millions de tonnes d'émissions de CO₂. On estime qu'elle atteindra 10688 PJ en 2020 si aucune mesure n'est prise. L'étude préparatoire montre que la consommation d'énergie des dispositifs de chauffage des locaux et des dispositifs de chauffage mixtes en phase d'utilisation peut être nettement réduite.

L'étude préparatoire citée dans le règlement estime qu'en ce qui concerne les dispositifs de chauffage des locaux et les dispositifs de chauffage mixtes, il n'est pas nécessaire de fixer d'exigences pour les autres paramètres d'écoconception visés à l'annexe I, partie 1, de la directive 2009/125/CE. Notamment, les émissions de gaz à effet de serre dues aux fluides frigorigènes utilisés dans les pompes à chaleur pour le chauffage du parc immobilier européen actuel ne sont pas considérées comme significatives. L'opportunité de fixer des exigences d'écoconception pour lesdites émissions de gaz à effet de serre sera réévaluée lors du réexamen du règlement.

Le règlement définit une efficacité énergétique saisonnière et les valeurs cibles. Il définit également, pour les pompes à chaleur uniquement, des niveaux de puissance acoustique maximaux en fonction de la puissance thermique nominale. Les mesures sont réalisées en utilisant généralement une norme harmonisée à la directive (EN 14825 :2016 pour les pompes à chaleur).

Tableau 3-21 : Tableau (Extrait) des exigences et calendrier : Règlement 813/2013

Type d'équipement	26 sep 2015	26 sep 2017
Pompes à chaleur et dispositifs de chauffage mixtes par pompe à chaleur, à l'exception des pompes à chaleur basse température :	100%	110%
Pompes à chaleur basse température	115%	125%

3.4.4 CHAUFFE-EAU THERMODYNAMIQUE

Le règlement délégué(UE) n°814/2013 établit des exigences d'écoconception applicables aux chauffe-eaux et aux ballons d'eau chaude y compris les chauffe-eaux thermodynamiques.

Les émissions de gaz à effet de serre dues aux fluides frigorigènes utilisés dans les systèmes de chauffage par pompe à chaleur pour le chauffage du parc immobilier européen actuel ne sont pas considérées comme significatives. L'opportunité de fixer des exigences d'écoconception pour les émissions de gaz à effet de serre susmentionnées sera réévaluée lors du réexamen du règlement.

La consommation annuelle d'énergie des chauffe-eaux et des ballons d'eau chaude a été estimée à 2156 PJ (environ 51 Mtep) dans l'Union, en 2005, soit 124 millions de tonnes d'émissions de CO₂. On estime qu'elle atteindra 2243 PJ en 2020 si aucune mesure n'est prise. Les émissions annuelles d'oxydes d'azote des chauffe-eaux et des ballons d'eau chaude ont été estimées à 559 kt d'équivalent SO_x dans l'Union, en 2005. On estime qu'elles atteindront 603 kt d'équivalent SO_x en 2020 si aucune mesure n'est prise.

Le règlement définit une efficacité énergétique minimale en fonction du profil de soutirage déclaré. Le tableau suivant reprend un certain nombre de profils.

Tableau 3-22 : Tableau (Extrait) des exigences et calendrier : Règlement 814/2013

Profil de soutirage déclaré	Norme d'essais	26 sep 2015	26 sep 2017	26 sep 2018
3XS (7 litres)	EN 16147	22%	32%	32%
S (36 litres)		26%	32%	32%
L (130 litres)		30%	37%	37%
XL (210 litres)		30%	37%	37%
XXL (300 litres)		32%	37%	60%
3XL (520 litres)		32%	37%	64%
4XL (1040 litres)		32%	38%	64%

3.4.5 ARMOIRES FRIGORIFIQUES PROFESSIONNELLES, GROUPES DE CONDENSATION ET REFROIDISSEURS INDUSTRIELS DE PROCESS

Le règlement (UE) 2015/1095 établit les exigences d'écoconception applicables aux armoires frigorifiques professionnelles, aux cellules de refroidissement et de congélation rapides, aux groupes de condensation et aux refroidisseurs industriels (chillers de process). Elles sont présentées dans les tableaux ci-après.

Le règlement (UE) 2015/1094 établit quant à lui les exigences relatives à l'étiquetage et à la fourniture d'autres informations produit relatives aux armoires frigorifiques professionnelles.

La consommation annuelle d'électricité des groupes de condensation, des refroidisseurs industriels et des armoires frigorifiques professionnelles dans l'Union a été estimée à 116,5 térawattheures (TWh) en 2012, ce qui correspond à 47 millions de tonnes (Mt) d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂). Si aucune mesure spécifique n'est adoptée, la consommation annuelle d'énergie devrait grimper à 134,5 TWh en 2020 et à 154,5 TWh en 2030, soit, respectivement, 54,5 et 62,5 Mt d'émissions de CO₂. L'effet conjugué du règlement (UE) 2015/1095 et du règlement délégué (UE) 2015/1094 de la Commission devrait permettre d'économiser chaque année 6,3 TWh d'électricité d'ici à 2020 et 15,6 TWh d'ici à 2030, par rapport au scénario de statu quo.

Pour chaque produit, le règlement définit un paramètre permettant de mesurer l'efficacité énergétique du produit (IEE, COP ou SEPR) et les valeurs cibles. Les mesures sont réalisées en utilisant généralement une norme harmonisée à la directive.

Tableau 3-23 : Tableau des exigences et calendrier : Règlement 2015/1095

Type d'Équipement	Norme d'essais	1 ^{er} juillet 2016	1 ^{er} janvier 2018	1 ^{er} juillet 2019
Armoires frigorifiques professionnelles et cellule de refroidissement rapide	NF EN 16825 (armoires professionnelles) EN 17032 (cellule de refroidissement)	IEE < 115	IEE < 95	IEE < 85

Tableau 3-24 : Tableau des exigences et calendrier

Type d'Équipement	Norme d'essais	Caractéristiques	1 ^{er} juillet 2016	1 ^{er} juillet 2018
Groupes de condensation Température de fonctionnement moyenne	EN 13771-2 (Essais) EN 13215 (Déclaration de performance)	0,2 kW≤ Pnom* ≤ 1 kW	COP > 1.20	COP > 1.40
		1 kW≤ Pnom ≤ 5 kW	COP > 1.40	COP > 1.60
		5 kW≤ Pnom ≤ 20 kW	SEPR >2.25	SEPR >2.55
		20 kW≤ Pnom ≤ 50 kW	SEPR >2.35	SEPR >2.65
Groupes de condensation Température de fonctionnement basse		0,2 kW≤ Pnom ≤ 1 kW	COP > 0.75	COP > 0.80
		1 kW≤ Pnom ≤ 5 kW	COP > 0.85	COP > 0.95
		5 kW≤ Pnom ≤ 20 kW	SEPR >1.50	SEPR >1.60
		20 kW≤ Pnom ≤ 50 kW	SEPR >1.60	SEPR >1.70

P nom : Puissance frigorifique nominale

Pour les groupes de condensation destinés à être utilisés avec un fluide frigorigène ayant un PRP inférieur à 150, les valeurs du COP et du SEPR peuvent être inférieures de 15 % maximum aux exigences requises au 1^{er} juillet 2016 et de 10 % maximum à celles exigées au 1^{er} juillet 2018.

Tableau 3-25 : Tableau des exigences et calendrier

Type d'Équipement	Norme d'essais	Caractéristiques	1 ^{er} juillet 2016	1 ^{er} juillet 2018
Refroidisseurs industriels (condensation à air) Température de fonctionnement moyenne	EN 14511-3:2013 : "Climatiseurs, groupes refroidisseurs de liquide et pompes à chaleur avec compresseur entraîné par moteur électrique pour le chauffage et la réfrigération des locaux - Partie 3 : méthodes d'essai"	$P_{nom} \leq 300 \text{ kW}$	SEPR > 2.24	SEPR > 2.58
		$P_{nom} > 300 \text{ kW}$	SEPR > 2.80	SEPR > 3.22
Refroidisseurs industriels (condensation à air) Température de fonctionnement basse		$P_{nom} \leq 200 \text{ kW}$	SEPR > 1.48	SEPR > 1.70
		$P_{nom} > 200 \text{ kW}$	SEPR > 1.60	SEPR > 1.84
Refroidisseurs industriels (condensation à eau) Température de fonctionnement moyenne	EN 14825:2016 : "Climatiseurs, groupes refroidisseurs de liquide et pompes à chaleur avec compresseur entraîné par moteur électrique pour le chauffage et la réfrigération des locaux - Essais et détermination des caractéristiques à charge partielle et calcul de performance saisonnière"	$P_{nom} \leq 300 \text{ kW}$	SEPR > 2.86	SEPR > 3.29
		$P_{nom} > 300 \text{ kW}$	SEPR > 3.80	SEPR > 4.37
Refroidisseurs industriels (condensation à eau) Température de fonctionnement basse		$P_{nom} \leq 200 \text{ kW}$	SEPR > 1.82	SEPR > 2.09
		$P_{nom} > 200 \text{ kW}$	SEPR > 2.10	SEPR > 2.42

P nom : Puissance frigorifique nominale

Dans le cas des refroidisseurs industriels destinés à être utilisés avec un fluide frigorigène ayant un potentiel de réchauffement planétaire inférieur à 150, les valeurs du SEPR peuvent être inférieures de 15 % maximum aux exigences requises au 1^{er} juillet 2016 et de 10 % maximum à celles exigées au 1^{er} juillet 2018.

3.4.6 APPAREILS DE REFROIDISSEMENT, AUX REFROIDISSEURS INDUSTRIELS HAUTE TEMPERATURE

Le règlement (UE) 2016/2281 établit des exigences d'écoconception applicables aux appareils de chauffage à air, aux appareils de refroidissement, aux refroidisseurs industriels à haute température et aux ventilo-convecteurs.

La consommation d'énergie annuelle combinée des appareils de chauffage à air, des appareils de refroidissement et des refroidisseurs industriels haute température a été estimée à 2 477 PJ (59 Mtep) dans l'Union en 2010, soit 107 millions de tonnes d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂). Si aucune mesure spécifique n'est adoptée, la consommation annuelle d'énergie des appareils de chauffage à air, des appareils de refroidissement et des refroidisseurs industriels haute température devrait grimper à 2 534 PJ (60 Mtep) par an en 2030. Les exigences d'écoconception fixées dans le présent règlement devraient, selon les estimations, aboutir d'ici à 2030 à des économies d'énergie annuelles de l'ordre de 203 PJ (5 Mtep), soit 9 millions de tonnes d'émissions de dioxyde de carbone.

Etant donné que les fluides frigorigènes fluorés sont visés dans le règlement F-Gaz, le présent règlement ne fixe aucune exigence spécifique les concernant.

Le règlement définit une Efficacité énergétique saisonnière minimale pour chaque type d'équipement de chauffage et de refroidissement. Pour les refroidisseurs industriels à haute température, il définit le ratio de performance énergétique saisonnier (SEPR).

Tableau 3-26 : Tableau des exigences et calendrier : Règlement 2016/2281

Chauffage/ Refroidissement	Type d'Équipement	Norme d'essais	Puissance	Efficacité énergétique saisonnière minimale	
				ηs,h (%)	
				1 ^{er} janvier 2018	1 ^{er} janvier 2021
Chauffage	Pompes à chaleur air-air entraînées par un moteur électrique, sauf les pompes à chaleur en toiture	EN 14825:2016		133	137
	Pompes à chaleur en toiture	EN 14825:2016		115	125
	Pompes à chaleur air-air entraînées par un moteur à combustion interne	EN 16905-5:2017		120	130
Refroidissement	Refroidisseurs air-eau entraînés par un moteur électrique	EN 14825:2016	< 400 kW	149	161
			≥ 400 kW	161	179
	Refroidisseurs eau/eau glycolée-eau entraînés par un moteur électrique		< 400 kW	196	200
			400 kW ≤ P < 1500 kW	227	252
			≥ 1 500 kW	245	272
	Refroidisseurs de confort air-eau, lorsqu'ils sont entraînés par un moteur à combustion interne	EN 16905-5:2017		144	154
	Climatiseurs air-air entraînés par un moteur électrique, sauf les climatiseurs en toiture	EN 14825:2016		181	189
				117	138
	Climatiseurs en toiture				
	Climatiseurs air-air entraînés par un moteur à combustion interne	EN 16905-5:2017		157	167

Pour les climatiseurs ou pompe à chaleur multisplit, le fabricant établit la conformité avec le règlement sur la base de mesures et de calculs effectués conformément à l'annexe III du règlement.

Tableau 3-27 : Tableau des exigences et calendrier : Règlement 2016/2281

Chauffage/ Refroidissement	Type d'Équipement	Norme d'essais	Puissance	Ratio de performance énergétique saisonnier SEPR (%)	
				1 ^{er} janvier 2018	1 ^{er} janvier 2021
Refroidisseurs industriels haute température	Milieu caloporteur côté condensation à air	EN 14825:2016	< 400 kW	4,5	5,0
			≥ 400 kW	5,0	5,5
	Milieu caloporteur côté condensation à eau		< 400 kW	6,5	7,0
			400 kW≤ P < 1500 kW	7,5	8,0
			≥ 1 500 kW	8,0	8,5

La norme d'essai applicable est la norme EN 14511-3:2013. Pour chaque modèle d'unité extérieure, une liste des combinaisons recommandées avec les unités intérieures compatibles est incluse dans la documentation technique. La déclaration de conformité s'applique alors à toutes les combinaisons indiquées dans cette liste. La liste des combinaisons recommandées est mise à disposition avant l'achat/la location en bail/la location d'une unité extérieure.

3.5 PROGRAMMES DE CERTIFICATION VOLONTAIRES

La réglementation écoconception de l'UE exige des États membres qu'ils mettent en œuvre les valeurs limites prescrites et qu'ils surveillent la conformité des produits mis sur le marché. En raison du manque d'institutions possédant l'équipement et l'expertise techniques nécessaires en Europe, ces mandats de surveillance des gouvernements sont d'autant plus difficiles à exercer. Pour faire face à cette problématique un certain nombre de programmes de certification volontaire ont été mis en œuvre pour certifier, en toute transparence, les équipements devant répondre à des exigences de performances minimales. La certification volontaire permet également aux prescripteurs, installateurs, acheteurs de sélectionner des produits certifiés avec l'assurance que les caractéristiques annoncées par le fabricant sont fiables.

3.5.1 ASERCOM

L'ASERCOM, l'Association européenne des constructeurs de composants pour la réfrigération, a développé un programme de certification des compresseurs frigorifiques depuis une vingtaine d'année et a développé plus récemment un programme concernant les groupes de condensation. Le processus de certification est effectué sous la responsabilité du fabricant par rapport à un programme d'évaluation bien défini. Les dossiers techniques sont transmis au comité de certification ASERCOM, où la vraisemblance des résultats est validée en présence d'un organisme notifié indépendant. En outre, des contrôles sont mis en place à partir d'équipements achetés dans le circuit de vente puis testés par des laboratoires internes et externes. Toutes les données sur les équipements certifiés sont disponibles sur le site ASERCOM.

3.5.2 CERTICOLD

Certicold HACCP est un label européen de conformité des équipements de la chaîne du froid. Le comité de labellisation est composé de :

- Représentant des pouvoirs publics
- Exploitants ou utilisateurs
- Fabricants
- Expert de la chaîne du froid

Il existe un programme spécifique pour les meubles frigorifiques à groupe hermétiquement scellé comprenant :

- Audit annuel des sites de fabrication
- Essais réalisés par un laboratoire indépendant : Essais de performance, de consommation d'énergie, de nettoyabilité
- Pas de minimum, affichage de la consommation d'énergie par unité de volume
- Autocontrôles en continu réalisés par le fabricant
- Production de certificats individuels par équipement valable 3 ans.

3.5.3 EUROVENT

L'objectif des programmes de certification Eurovent est de créer des bases de données communes de comparaison des caractéristiques techniques d'équipements de froid et de conditionnement d'air. Eurovent certification propose des programmes de certification sur un certain nombre d'équipements listés ci-après :

- Echangeurs (évaporateur, condenseur, aéroréfrigérant, batteries)
- Climatiseurs jusqu'à 12 kW
- Centrales de traitement d'air
- Groupe de production d'eau glacée
- Meubles frigorifiques de vente

3.6 GUIDES ET RECOMMANDATIONS

3.6.1 RAPPORT INERIS, ETUDE DE SECURITE SUR LE REMPLACEMENT DES FLUIDES FRIGORIGENES

L'INERIS (Institut National de l'Environnement industriel et des RISques) est un établissement public placé sous la tutelle du ministère chargé de l'environnement. Il mène des programmes de recherche portant sur la compréhension des phénomènes susceptibles de conduire à des situations de risques ou d'atteinte de l'environnement et de la santé.

Le 20 décembre 2017, l'Ineris a publié son rapport « Etude de sécurité sur le remplacement des fluides frigorigènes ». Cette étude, commandée par le Ministère de l'intérieur, porte sur l'utilisation de fluides inflammables dans les systèmes à compression mécanique des vapeurs subvenant aux besoins des ERP en conditionnement d'air (chaud ou froid) et/ou en production d'ECS. Les systèmes thermodynamiques utilisés pour le maintien de la chaîne du froid (meubles frigorifiques de vente, chambres froides, laboratoires...) en sont donc exclus.

Le rapport est relativement succinct car le champ de l'étude est très spécifique. Nous nous efforcerons donc de ne pas le paraphraser mais de décrire les informations disponibles dans celui-ci.

Dans le chapitre 1, l’Ineris précise le champ de l’étude et rappelle quelques notions fondamentales tirées de la NF EN 378, et notamment la classification des fluides frigorigènes selon leur inflammabilité et leur toxicité (Voir Tableau 3-28).

Le chapitre 2 présente l’étude des différents accidents pouvant entraîner l’apparition de risques liés à la présence de fluides inflammables. L’Ineris étudie la presse locale et la littérature scientifique pour mieux comprendre les possibles origines d’un accident, puis propose différentes approches pour statuer sur le niveau d’acceptabilité du risque. L’approche retenue par l’Ineris est l’approche dite « déterministe ». Cette approche consiste à éloigner les enjeux (personnel de l’ERP, utilisateurs de l’ERP comme les clients d’un magasin ou les malades d’un hôpital, les riverains ou les services de secours tels que les pompiers en intervention) de telle sorte qu’ils ne soient pas exposés en cas d’accident.



Figure 3-5 : Typologie de fuite en fonction des ratios diamètre de fuite/diamètre de la tuyauterie

L’Ineris définit pour cette étude 3 types de fuites de fluide qui serviront de référence pour la suite de l’étude. Chaque type de fuite correspond à des ratios diamètre de fuite/diamètre de la tuyauterie (Figure 3-5).

L’Ineris synthétise ensuite les phénomènes redoutés d’une fuite (troisième chapitre) et les leurs effets attendus (Thermique, toxique, surpression, anoxie).

Tableau 3-28 Phénomènes dangereux et effets attendus pour chaque classe de fluide

		Classement des fluides frigorigènes			
Phénomène dangereux	Effet attendu	A3	A2	A2L	A1
Feu torche	Thermique	Oui	Oui	Non	Non
Feu de nuage	Thermique	Oui	Oui	Oui	Non
VCE	Surpression	Oui	Oui	Non	Non
Dispersion	Toxique	A voir	A voir	A voir	A voir
	Anoxie	Oui	Oui	Oui	Oui

L’inflammation d’un nuage de fluides A2L ou B2L ne peut pas engendrer de VCE du fait de leur faible vitesse laminaire de propagation de flamme. En effet, ces fluides ont des vitesses laminaires de propagation de flamme inférieures à 10cm/s, valeur en dessous de laquelle l’Ineris a l’habitude de considérer que l’explosion n’engendre pas de surpression. Ceci n’empêche pas les effets thermiques du feu de nuage.

Pour ce qui est de la toxicité des fluides classés A, ils ont une toxicité dite « faible » (pas de preuve de toxicité pour des concentrations <400ppm), ce qui ne signifie pas nécessairement qu'ils ne soient pas toxiques du tout. Il n'est donc pas possible d'exclure, selon l'Ineris, tout risque de toxicité lié à l'utilisation de ces fluides.

Fort de ces constatations, l'Ineris propose dans un quatrième chapitre des mesures supplémentaires à mettre en place pour l'utilisation des fluides inflammables. Ces mesures concernent :

- des règles d'installation pour :
 - les systèmes entiers ;
 - les parties du circuit placées à l'extérieur ;
 - les parties placées dans la salle des machines ;
- des règles d'exploitation ;
- des règles de maintenance ;
- des règles d'intervention en cas d'incident (fuite, incendie...).

En plus de l'étude elle-même, le rapport propose en annexe :

- Un inventaire des fluides frigorigènes (non chlorés) par classe ;
- Un point sur les textes réglementaires de référence ;
- Une analyse des risques générique pour les phases de vie d'une installation :
 - Installation ;
 - Utilisation ;
 - Maintenance ;
 - Intervention des pompiers.
- Une étude de quantification des effets d'une fuite avec :
 - Un rappel de la phénoménologie attendue (mécanismes physiques mis en jeu lors d'une fuite de fluide liquide ou gazeux sous pression) ;
 - Un listing des phénomènes dangereux possibles en cas de fuite ;
 - La présentation de la méthode de quantification des effets (hypothèses posées, outils informations retenues et justification du choix...) ;
 - Un détail des valeurs retenues pour les effets (seuils d'effets thermiques liés à un feu torche et un feu de nuage et effet de surpression liés à un VCE) et leur justification ;
 - La présentation des résultats de l'étude :
 - Les risques d'anoxies ;
 - Les risques liés à l'inflammation d'une fuite de fluide frigorigène.
 - Les modélisations ont été effectuées pour le pentane (R-601, classe A3), le propane (R-290, classe A3), le R-152a (A2) et le R-32 (A2L) ;
 - Les résultats sont donnés selon que le fluide soit en phase gazeuse ou diphasique, selon la température de saturation (directement liée à la pression) et selon le diamètre de la fuite ;
 - Une hiérarchisation de la nocivité des fumées toxiques selon le fluide ;
 - Les risques de formation de nappes inflammables ;
 - La comparaison des prescriptions issues de l'étude de l'Ineris avec celles du GZ ;

- Et enfin un exemple d'application des règles de conception proposées dans le rapport appliquée pour un hôtel selon que l'on utilise un système DRV, des monosplits installés directement dans les chambre ou un chiller en toiture avec échange indirect.

3.6.2 GUIDE M

La Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises (DGSCGC) a publié le 27 décembre 2017 son Guide pratique relatif à la sécurité incendie dans les magasins de vente et les centres commerciaux. Ce guide est gratuit et accessible sur le site du ministère de l'intérieur.

Cet ouvrage est destiné à toute personne ou organisme concerné par la sécurité dans les ERP, en allant du concepteur à l'utilisateur et en passant par les autorités administratives. Il clarifie notamment dans la fiche 2.8 la question des conditions d'utilisation des fluides inflammables dans des meubles frigorifiques de vente à groupes hermétiquement scellés installés dans les magasins et les centres commerciaux. En effet, il était d'usage, jusqu'à présent, de limiter la charge maximale des groupes hermétiquement scellés fonctionnant aux fluides de classe A2, A2L ou A3 à 150 g. Cette valeur faisait consensus et provient de l'article CH35 du règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (ERP). Cependant, un doute subsistait sur le fait que cet article soit applicable ou non à des systèmes frigorifiques de meubles de vente.

Le guide pratique de la DGSCGC revient sur cette question et la tranche en soulignant que : « L'article CH35 du règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (ERP) précise les conditions [...] pour la ventilation de confort ». L'article CH35 n'étant donc pas applicable au froid alimentaire, c'est la norme NF EN 378-1 qui est mise en avant par le guide pratique.

La méthode de calcul de la charge maximale admissible est détaillée dans le guide où il est dit que : « la charge maximale autorisée [...] devra respecter les deux conditions suivantes :

a/- Charge par circuit [en kg] $< 20\%$ de la Limite Inférieure d'Explosivité ou LIE [en kg/m³] x volume de la salle [en m³].

b/- Charge par circuits $< 1,5$ kg si le circuit est en RDC ou étages et 1 kg si le circuit est en sous-sol accessible au public.

Cette LIE est spécifique à chaque fluide frigorigène concerné par ce guide.

À titre d'exemple pour le propane (R-290), dans un magasin de 2000 m³ en RDC, la condition (a) donne $20\% \times 0,038 \times 2000 = 15,2$ kg. Pour respecter également la condition (b), la charge sera limitée à 1,5 kg par circuit. »

Il est important de souligner qu'aujourd'hui la limitation de la charge est imposée par circuit, ainsi le nombre de circuit par magasin n'est pas limité. Des sujets restent encore en suspens, comme la question de l'usage des fluides A2L pour la climatisation dans les ERP, ou l'utilisation de systèmes frigorifiques centralisés qui ne sont pas couverts par le guide M.

3.6.3 GUIDE NF EN 378

Ce guide a été élaboré par le Centre technique des industries mécaniques (Cetim) avec l'aide du syndicat des industries thermiques, aérauliques et frigorifiques (UNICLIMA), de l'AFCE (Alliance froid climatisation environnement), de l'AFF (Association française du froid).

Il s'agit d'un guide d'application de la norme NF EN 378 : 2017 au travers de la présentation d'analyses de risques basées sur un exemple « fil rouge ») et d'autres exemples illustratifs plus simples. Il ne se substitue pas à la norme et se focalise sur la notion d'étude de risque qui est un point fondamental de la norme NF EN 378 et des directives Européennes (Machines, Équipements sous pression...) de manière plus générale.

L'exemple fil rouge présente plusieurs typologies de systèmes de réfrigération et de climatisation. Ceux-ci se trouvent soit dans une grande surface de vente, soit dans un petit commerce de bouche ou dans des locaux tertiaires.

L'exemple fil rouge est constitué :

- D'une zone de vente :
 - Meuble Frigorifique de Vente autonome : classe d'emplacement I,
 - Meuble Frigorifique de Vente raccordé à une centrale : classe d'emplacement II.
- D'une zone de bureaux :
 - Système direct (système DRV de climatisation) : classe d'emplacement II.
- D'une salle des machines (production frigorifique) :
 - Système direct : classe d'emplacement II (centrale frigorifique),
 - Système indirect ventilé fermé : classe d'emplacement III (refroidisseur de liquide).
- D'une chambre froide :
 - Groupe de condensation : classe d'emplacement II.

Sur l'ensemble du cycle de vie de chacune de ces configurations, les auteurs ont choisis de traiter les cas suivants :

Tableau 3-29 : Cas traités

Exemples traités	Phase de vie	Fluide frigorigène
Centrale de réfrigération	Conception	R-744
Groupe de condensation	Construction	R-455A
Unité de condensation	Installation in situ	R-744
Unité de climatisation (DRV)	Installation in situ	R-32
Refroidisseur de liquide	Installation in situ	R-1234ze(E)
Refroidisseur de liquide	Fonctionnement	R-1234ze(E)
Meuble frigorifique de vente	Maintenance ou réparation	R-290
Centrale de réfrigération	Maintenance ou réparation	R-744
Unité de climatisation (DRV)	Maintenance ou réparation	R-32

4 - LES FLUIDES FRIGORIGENES DE SUBSTITUTION

Les HFC qui sont en cours de remplacement sont essentiellement le R-134a, le R-404A et le R-410A qui se sont eux-mêmes substitués dans les 20 dernières années aux CFC et aux HCFC. La substitution par les hydrocarbures (R-600a, R-290, R-1270) a d'ailleurs commencé dès les années 90, essentiellement pour le froid domestique et plus généralement pour les équipements hermétiquement scellés de petites puissances. L'ammoniac a toujours été utilisé et a élargi son utilisation en froid industriel, enfin le CO₂ se développe en froid commercial et pour les chauffe-eaux thermodynamiques. Les nouveaux fluides de substitution sont des HFO (R-1234yf et R-1234ze(E)) et des mélanges de HFO et de HFC, en particulier des mélanges utilisant le R-32.

4.1 ANALYSE GLOBALE DE LA BANQUE 2016

En 2016, la banque de HFC représente 86 % de la banque totale de fluides frigorigènes, parmi laquelle on compte seulement 1% de HFO (R-1234yf et R-1234ze(E)). Les fluides frigorigènes non fluorés (HC, R-744 et R-717) représentent 11% de la banque 2016. A noter cependant que la famille HFC inclut les mélanges HFC/HFO dont certains constituent une alternative à l'usage des HFC à fort PRP tels que le R-404A.

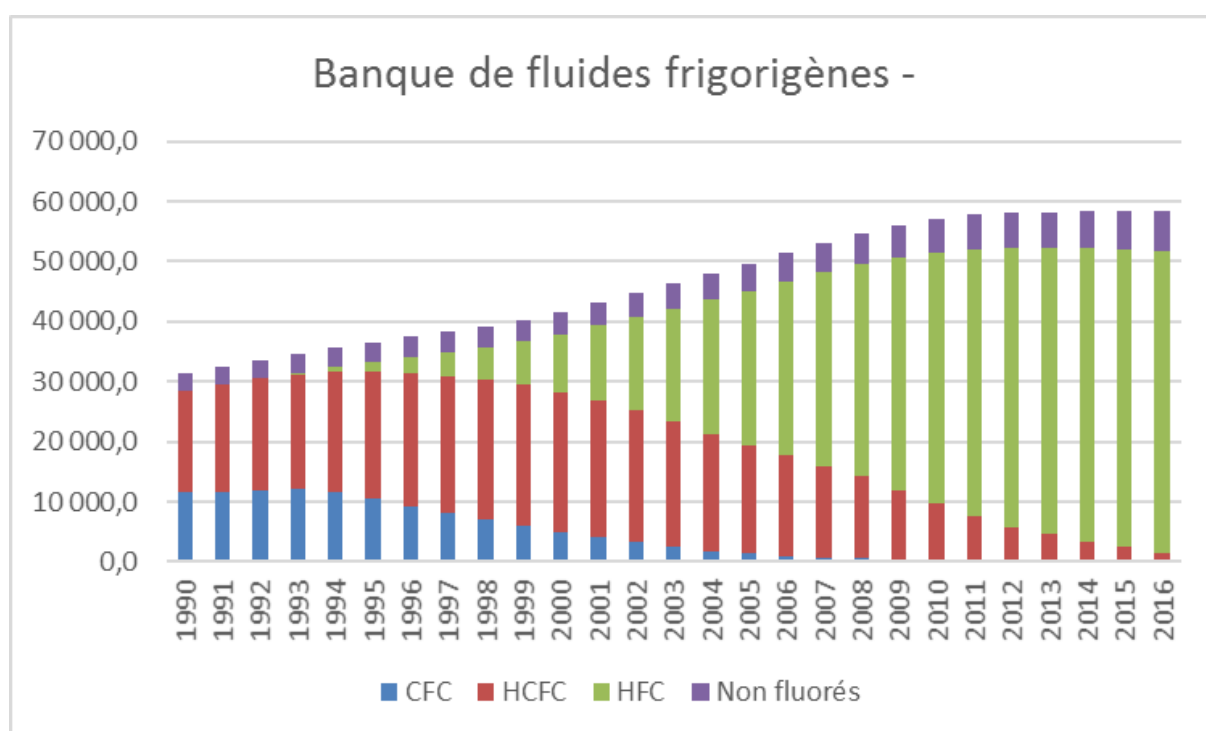


Figure 4-1 : Evolution de la banque de fluides frigorigènes de 1990 à 2016 – tous secteurs.

La Figure 4-2 montre que les HFC à fort PRP représentent plus de 80 % de la banque de fluides frigorigènes en France métropole en 2016. Sur ce graphe, les quantités de R-134a des systèmes cascades R-134a/CO₂ ainsi que le R-407A et le 407F sont inclus dans la famille « HFC fort PRP » alors qu'ils peuvent être considérés comme alternatives aux HFC à fort PRP dans certains secteurs fortement utilisateurs du R-404A.

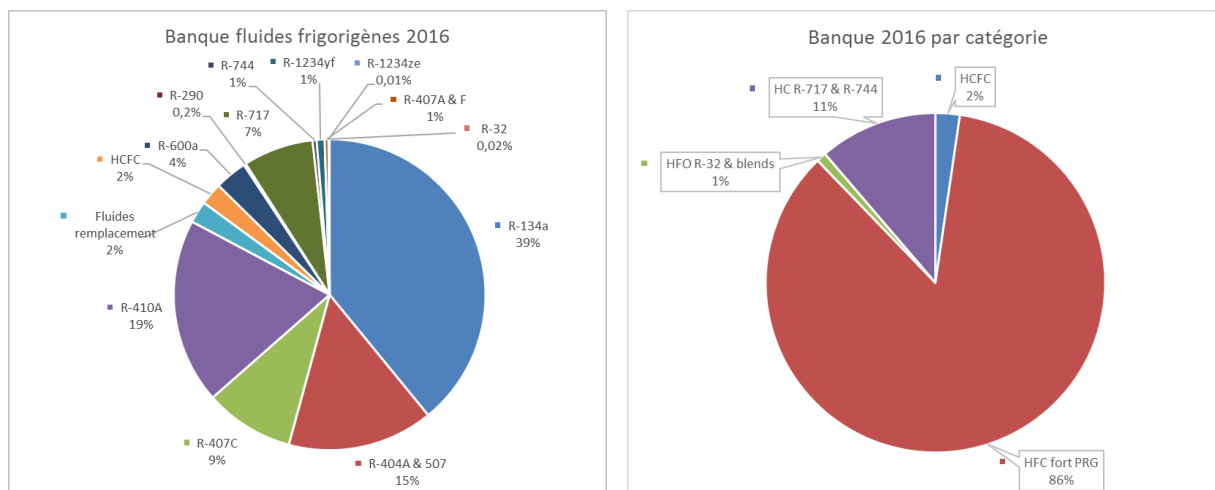


Figure 4-2 : Banque de fluides frigorigènes 2016 – tous secteurs.

Avant de mener les analyses application par application, nous allons présenter les substituts disponibles à l'heure actuelle pour chacun des 3 fluides (R-134a, R-404A et R-410A) en distinguant les substituts de retrofit et les substituts long terme pour les installations ou équipements neufs.

Pour chacun des 3 fluides de référence, dans ces sections, nous ne détaillons pas toutes les applications où ces fluides peuvent être utilisés mais seulement les applications essentielles où les choix des équipementiers sont confirmés.

4.2 R-134A ET SES SUBSTITUTS

Les substituts au R-134a sont différents selon les applications et ont pris place à des dates très différentes.

4.2.1 REMPLACEMENT PAR LE R-600A

La substitution du R-134a par l'isobutane (R-600a) s'est effectuée dès 1996 et a été extrêmement rapide, une fois que la charge maximale de 150 g et les mesures de sécurité pour le froid domestique ont été prises. Les développements technologiques ont été réalisés avec ce fluide pour respecter les seuils d'efficacité énergétique de la directive labelling 94/76/EC et suivante. A noter que ce remplacement s'est effectué à la fois par un lobbying de groupe comme Green Peace et par la décision rapide des grands fabricants européens.

4.2.2 REMPLACEMENT PAR LE R-1234YF

L'application principale du R-1234yf pour remplacer le R-134a est en climatisation automobile. De 2005 à 2015, de nombreux essais, de nombreuses controverses ont entouré l'introduction du R-1234yf en remplacement du R-134a. Les essais comparatifs avec le CO₂ (R-744) ont mobilisé toutes les firmes automobiles et leurs fournisseurs de rang 1. Compte-tenu des très hautes pressions du CO₂, la mise en œuvre en climatisation automobile s'est heurtée aux questions d'étanchéité pour des tuyauteries qui doivent supporter non seulement des vibrations mais aussi des déplacements du moteur vis-à-vis de la carrosserie. Ces difficultés techniques associées à l'augmentation des coûts et l'incertitude des possibilités de maintenance sur un marché mondial, ont amené au choix du R-1234yf qui, du point de vue de la mise en œuvre, demandait des adaptations mineures sans changement de coût des composants. Par ailleurs, pour les applications de froid commercial positif, le R-1234yf est un fluide frigorigène qui

présente des caractéristiques thermodynamiques et des performances énergétiques très proches voire légèrement supérieures au R-134a.

4.2.3 REMPLACEMENT PAR LE R-1234ZE(E)

Pour les groupes de refroidissement centrifuges plusieurs fabricants commercialisent déjà des groupes centrifuges avec du R-1234ze(E) en remplacement du R-134a. Ce remplacement suppose des développements spécifiques puisque la puissance frigorifique volumétrique du R-1234ze(E) est inférieure d'un peu plus de 10% à celle du R-134a. Ce n'est donc pas un fluide deetrofit même s'il est possible de retrofiter un groupe centrifuge en acceptant de perdre de 10 à 15% en puissance. Les constructeurs ayant développé les groupes centrifuges annoncent des gains en performance énergétique de 7 à 10%.

Tableau 4-1 : Données des fluides frigorigènes de remplacement du R-134a

Dénomination normalisée	Compositions	PRP	Classe Sécurité	T critique et T normale d'ébullition (glissement)	Puiss. vol. relative au R-134a	COP relatif au COP R-134a
R-134a	-	1 430	A1	TC = 101°C TNe = -26 °C	1	1
R-600a	-	3	A3	TC= 134,6°C TNe = -11°C	1	1,1
R-1234yf	-	4	A2L	Tc = 94,7°C TNe= -29,5°C	0,98	1
R-1234ze(E)	-	7	A2L	TC = 109,6 °C TNe= -19°C	0,89	1
R-451A et B	R-1234yf / R-134a 89,8 /10,2 et 88,8/11,2	149 164	A2L	TC = 95,3 °C TNe=-30,8/-30,5°C TNe= -31/-30,6°C	-	-

4.2.4 REMPLACEMENT PAR LE R-513A OU LE R-450A

Dans les applications où la valeur de l'équipement est élevée et sa durée de vie longue (typiquement de 10 à 20 ans), le retrofit du R-134a peut être intéressant. C'est en particulier le cas des chillers volumétriques. Le R-513A et le R-450A sont deux fluides dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 4-2 qui sont tous les deux A1 et dont le PRP sont respectivement de 631 et de 603. Des publications à comité de lecture montrent que ce sont bien des fluides « Drop-in » et que les performances énergétiques sont supérieures à celles du R-134a.

Tableau 4-2 : Caractéristiques de deux frigorigènes pour la conversion d'installations au R-134a

Dénomination normalisée	Compositions	PRP	Classe Sécurité	T critique et T normale d'ébullition (<i>glissement</i>)	Puissance vol. relative au R-134a	COP relatif au COP R-134a
R-134a	-	1430	A1	TC = 101°C TNe = -26 °C	1	1
R-450A	R-134a/1234ze(E) 42/58	603	A1	TC = 102 °C TNe= -23,4/-22,6°C	0,91	1,05
R-513A	R--134a /R-1234yf 44/56	631	A1	TC = 97,35°C TNe= --29°C	1,05	1,05

4.3 R-404A ET SES SUBSTITUTS

Plusieurs fluides de remplacement du R-404A sont déjà commercialisés. Nous distinguons dans ce premier tableau les fluides de remplacement à long terme, c'est-à-dire avec un PRP < 150. Des fluides de transition, conçus pour le rétrofit, sont présentés dans un deuxième temps.

- Le propane (R-290) est utilisé par plusieurs constructeurs de meubles frigorifiques de vente autonomes, c'est-à-dire des meubles dont le circuit est entièrement soudé. Cette tendance s'est développée avec l'accroissement autorisé des charges de fluide A3 tel que défini dans la norme NF EN 378. Les essais menés par le Cemafruid (cf. section 13) montrent une très nette amélioration de l'efficacité énergétique du R-290 comparativement au R-404A
- Les mélanges R-454C et le R-455A dont le PRP est inférieur à 150 sont des remplaçants long terme du R-404A proposés par les fabricants de fluides de synthèse. Ces fluides montrent des retours d'essais avec des performances énergétiques supérieures de 10 % au R-404A sur des armoires frigorifiques. C'est à confirmer pour d'autres applications.

Tableau 4-3 : Données de fluides frigorigènes de remplacement du R-404A

Dénomination normalisée	Compositions	PRP	Classe Sécurité	T critique et T normale d'ébullition (glissement)	Puiss. vol. relative au R-404A	COP relatif au COP R-404A
R-404A	R-125/R-143a/R-134a 44 /52/4	3 922	A1	TC = 72 CTNe = -46,2 °C	1	1
R-290	-	3	A3	TC = 96,7 °C TNe = -42,4 °C	0,98	1,05
R-1270	-	2	A3	TC = 91 °C TNe = -47,9 °C	1,03	1,07
R-744	-	1	A1	TC = 31 °C	-	-
R-454C	R-32/R-1234yf 21,5/78,5	148	A2L	Tc = 90,2 °C TNe = -39 °C (-50,8/-36 °C)	0,9	1,08
R-455A	R-744 / R-32/R-1234yf 3/21,5/75,5	148	A2L	TC = 89,2 °C TNe = -40,7 °C (-60,9/-38,4 °C)	1	1,1

- Le CO₂ (R-744) remplace le R-404A
 - soit uniquement à la basse température où il alimente les meubles frigorifiques de vente ou les chambres froides de surgélation (T < -38°C) ; sa condensation est alors assurée entre -15 et -20°C sur un échangeur qui est lui-même refroidi par un fluide frigorigène utilisé pour la moyenne température. C'est une configuration utilisée sur les installations de froid commercial en hypermarché.
 - soit aux deux niveaux de températures (surgélation et produits frais) ; le fonctionnement est alors en cycle transcritique. En effet, au-delà de 31°C, le CO₂ est au-dessus de son point critique, la haute pression de situe entre 90 et 100 bar et le refroidissement du CO₂ dans la zone supercritique amène à des pertes énergétiques significatives lors de la détente à la basse pression. Ces systèmes transcritiques sont utilisés de manière significative dans les pays nordiques et en Allemagne, mais aussi en France mais dans des supermarchés ou de supérettes, là où la puissance frigorifique requise est inférieure généralement à 200 kW froid.

4.3.1 FLUIDES DE TRANSITION POUR LA CONVERSION D'INSTALLATIONS FONCTIONNANT AU R-404A

Les fluides de remplacement du R-404A en rétrofit sont tous des fluides non inflammables (A1). En effet, il n'est pas possible de passer en rétrofit à un fluide inflammable A3 ou A2L car l'équipement n'est pas conçu pour. En conséquence, tous les fluides intermédiaires comprennent du R-125 pour neutraliser l'inflammabilité des composants A2L. Le PRP du R-125 étant de 3500, tous ces fluides ont PRP supérieur ou égal à 1400, ce qui est objectivement un gain en PRP de plus d'un facteur 2 vis-à-vis du R-404A mais qui n'en fait qu'une solution transitoire pour prolonger la vie des équipements, en froid commercial, en froid industriel et dans les transports frigorifiques.

Tableau 4-4 : Données de fluides frigorigènes pour la conversion d'installation au R-404A

Dénomination normalisée	Compositions	PRP	Classe Sécurité	T critique et T normale d'ébullition (glissement)	Puiss. vol. relative au R-404A	COP relatif au COP R-404A
R-404A	R-125/143a/134a (44 /52/4)	3 922	A1	Tc = 72 °C TNe = -46,6/-45,8 °C	1	1
R-407A	R-32/125/134a (20/40/40)	2 107	A1	Tc = 90,1°C TNe = -45,2/-38,7°C	0,81	0,89
R-407F	R-32/125/134a (30/30/40)	1825	A1	Tc = 89,2 °C TNe = -46,1/-39,7°C	1,02	1,07
R-407H	R-32/125/134a (32,5/15/52,5)	1495	A1	TC=86,5°C TNe= -44,6 /-37,6°C	1,01	1,06
R-442A	R-32/ R-125/ R-134a/ R-152a/ R-227ca 31/31/30/3/5	1 888	A1	TC=82°C TNe= -46,5/-39,9°C	1,1	1,1
R-448A	R-32/ R-125/ R-1234yf/ R-134a/ R- 1234ze(E) 26/26/20/21/7	1 387	A1	TC = 86,4 °C TNe = -45,9/-39,8 °C	1	1,08
R-449A	R-32/ R-125/ R-1234yf/ R-134a (24/25/25/26)	1397	A1	TC = 87,4 °C TNe = -46/-39,9 °C	0,88	1,05
R-452A	R-32/ R-125/ R-1234yf 11/59/30	2140	A1	TC=76,5°C TNe=-47/-43,2°C	1.02	-
R-452C	R-32/ R-125/ R-1234yf 12,5/61/26,5	2220	A1	TC=75°C TNe=-47,5/-44,2°C	1,02	-

Le tableau ci-dessus présente les fluides de transition proposés sur le marché pour le rétrofit des installations au R-404A. La pénétration de chaque fluide dépend non seulement des performances énergétiques, de la force commerciale de chaque entreprise de production de fluides de synthèse mais aussi de la gestion des quotas attribués chaque année par l'Europe. Avant d'opter pour l'un de ces fluides, il est tout de même conseillé de demander l'avis du constructeur de l'application ou des composants.

4.4 R-410A ET SES SUBSTITUTS

Pour le remplacement du R-410A en conditionnement d'air, les fluides de remplacement doivent remplir des critères très stricts à la fois pour la puissance frigorifique volumétrique et pour l'efficacité énergétique. Les équipements de conditionnement d'air sont vendus mondialement, le marché de la climatisation individuelle se situe entre 50 et 60 millions d'unités par an. Les choix des fluides de remplacement sont des choix qui ont des impacts industriels lourds et qui sont pris pour de nombreuses années

4.4.1 R-32 ET MELANGES A BASE DE R-32

La tendance actuelle pour les grandes firmes est clairement d'utiliser des fluides de remplacement qui ont des performances énergétiques et une puissance frigorifique volumétrique égale ou supérieure au R-410A. Comme le montre le tableau ci-dessous, il s'agit du R-32 et des mélanges contenant plus de 65 % de R-32 (R-452B et R-454B). Les premières unités au R-32 sont actuellement commercialisées en Europe et depuis 2016 au Japon et en Asie du sud-est.

4.4.2 R-290

Du point de vue thermodynamique, le R-290 est plutôt un remplaçant du R-22 que du R-410A, avec une puissance frigorifique volumétrique inférieure de 10 %. Du point de vue énergétique, le R-290 correctement mis en œuvre présente une efficacité énergétique égale ou légèrement supérieure au R-410A. Il est commercialisé en Europe dans de petits équipements « stand-alone » et dans des systèmes de climatisation de type « splits » individuels en Chine et en Inde ; cependant, il n'est pas adopté comme une solution par les grands constructeurs internationaux.

Tableau 4-5 : Données de fluides frigorigènes de remplacement du R-410A

Dénomination normalisée	Compositions	PRP	Classe Sécurité	T critique et T normale d'ébullition (glissement)	Puiss. vol. relative au R-410A	COP relatif au COP R-410A
R-410A	R-32/ R-125 50 /50	2 088	A1	TC = 71,4 °C, TNe = -51,4 °C	1	1
R-290	-	3	A3	TC = 96,7 °C, TNe = -42,4°C	0,9	-
R-452B	R-32/ R-125/ R- 1234yf 67/7/26	698	A2L	TC = 86,9 °C TNe= -59,8/-58,5 °C	0,95	1
R-454B	R-32/ R-1234yf 68,9/31,1	466	A2L	TC = 83,2 °C TNe = - -59,6,6/- 58,5 °C	1	1
R-32	-	675	A2L	TC = 86,9 °C TNe = -51,7 °C	1,12	1,05

4.4.3 AU-DELA DE 2030

Le remplacement du R-410A par le R-32 ou par des mélanges à forte teneur en R-32 pose des questions sur le long terme du fait du PRP de 675 kg eq. CO₂ du R-32. La publication de Pham, (Pham, 2016) pose bien les pistes possibles ou non.

La substitution globale du R-32 par le R-290 n'apparaît pas comme plausible pour des raisons de sécurité pour les équipements split-systèmes et encore plus pour les systèmes multi-splits.

La substitution par le CO₂ pose des questions de développements technologiques et de coûts qui semblent insurmontables compte-tenu de la pénalité énergétique que constitue le cycle transcritique pour les conditions d'usage typiques des climatiseurs, c'est-à-dire pour des températures extérieures supérieures à 25 °C et jusqu'à 50 °C. A noter qu'aussi bien en climatisation automobile (Cf. section 9) que pour les chauffe-eaux thermodynamiques, l'industrie européenne et surtout l'industrie japonaise ont effectué depuis 20 ans des efforts de R&D qui ont abouti en climatisation automobile à des équipements dont les performances énergétiques sont connues et qui sont beaucoup plus faibles que le minimum requis par le règlement sur l'Ecodesign (UE) 2016/2281. L'industrie japonaise a bien identifié quels sont les usages efficaces du CO₂, en particulier pour les chauffe-eaux thermodynamiques (cf. section 5). Les développements ont amené à la conception et à la réalisation de nouveaux compresseurs adaptés au CO₂, au remplacement des détendeurs par des éjecteurs, à la conception de systèmes d'injection bi-étagés. Malgré tous ces développements, le CO₂ n'apparaît pas sur le marché.

La substitution par des fluides frigorigènes de synthèse à PRP < 150. Les HFO connus (R-1234yf et R-1234ze(E)) ne peuvent pas être utilisés actuellement compte tenu d'une puissance frigorifique volumétrique de 40 % inférieure à celle du R-410A. Les mélanges à PRP < 150 limitent à environ 20 % la teneur en R-32. Il faut des développements de nouveaux compresseurs et de nouveaux circuits pour de tels mélanges.

Il faudra suivre attentivement les publications et les développements technologiques pour identifier ce que seront les nouvelles voies pour l'utilisation de fluides à PRP<150 adaptés à la climatisation fixe.

5 - EQUIPEMENTS DOMESTIQUES (REFRIGERATEURS, CONGELATEURS, CET)

5.1 REFRIGERATEURS ET CONGELATEURS DOMESTIQUES

Le R-600a (isobutane) s'est imposé comme le fluide frigorigène et 95% des réfrigérateurs et congélateurs commercialisés en Europe le sont avec ce fluide frigorigène. Seuls des réfrigérateurs-congélateurs de grande taille et importés contiennent encore du R-134a. Le remplacement du R-134a soit par du R-1234yf (Aprea 2016-a) soit par du R-1234ze(E) (Aprea 2016-b) est étudié et des essais montrent déjà une efficacité supérieure du R-1234ze comparativement au R-134a. Ces efforts de R&D vont s'effectuer vraisemblablement hors Europe, aux USA, Japon, Corée là où l'usage du R-134a était encore significatif.

5.1.1 ETUDE DE LA BANQUE 2016

Selon l'étude d'inventaires de fluides frigorigènes 2016 (*Barrault, 2016*), la banque du froid domestique s'élève à environ 2 600 tonnes en 2016 composée à 75 % d'hydrocarbures. La banque de CFC est estimée avoir été éradiquée en 2013 selon les hypothèses de durée de vie prises dans l'étude.

En froid domestique, le R-134a n'est plus mis sur le marché européen depuis le 1^{er} Janvier 2015. Le HC-600a étant déjà largement utilisé en France depuis les années 2000 le R-134a est devenu marginal, aussi bien pour les réfrigérateurs que les congélateurs depuis 2010. En considérant une durée de vie moyenne de 15 ans, le parc est donc très majoritairement dominé par le R-600a. Etant donné que le ratio de charge volumique du R-600a est deux à trois fois plus faible que celui du R-134a, la banque du froid domestique est encore constituée d'environ un quart de R-134a.

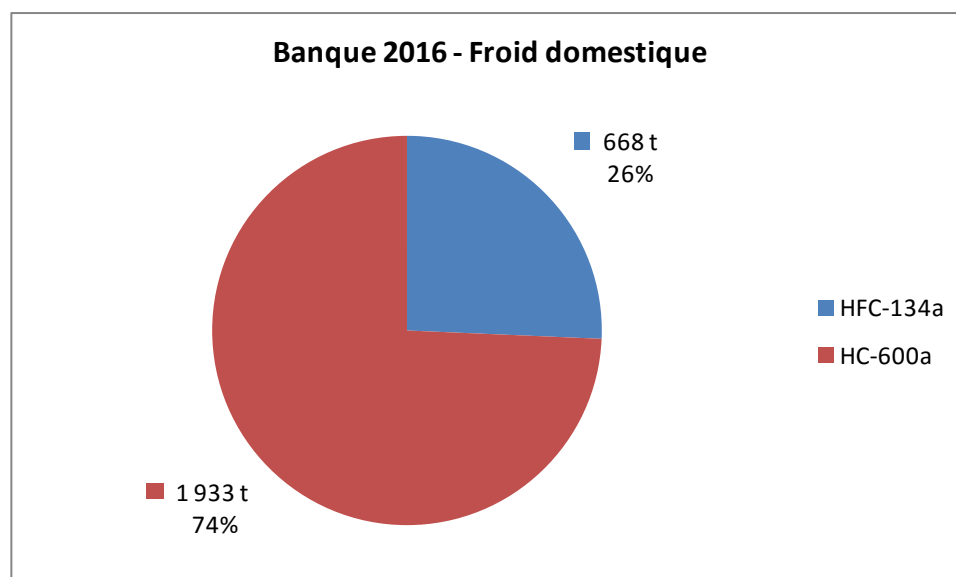


Figure 5-1 : Répartition des fluides frigorigènes utilisés sur la banque 2016 du froid domestique (*Barrault 2016*)

5.1.2 CONCLUSIONS

Le passage du R-134a à un fluide frigorigène à bas PRP, l'isobutane, est déjà réalisé en froid domestique en Europe. Les systèmes au R-600a choisis par toutes les grandes marques ont fait l'objet de développements continus en vue d'améliorer l'efficacité énergétique des réfrigérateurs et congélateurs. Les performances énergétiques sont très bonnes et aucune compagnie en Europe ne cherche à revenir vers des fluides frigorigènes A2L en remplacement du R-600a car ce fluide frigorigène et les développements technologiques permettent d'atteindre le label A++++ soit le label le plus élevé de la labellisation européenne. Le R-600a correspond aux exigences de la réglementation. De plus, les risques liés à son inflammabilité sont limités par la petite taille des systèmes frigorifiques des systèmes domestiques qui ont des charges de fluide frigorigène de quelques dizaines de grammes. Les nouveaux développements possibles où des HFO vont se substituer au R-134a ne devraient changer que modérément la répartition des frigorigènes sur ce marché.

Tableau 5-1 - Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour le froid domestique

Fluide frigorigènes de référence	Solutions alternatives	+	-
R-134a	HC R-1234yf	Meilleure efficacité Efficacité énergétique équivalente au R-134a	A3 A2L

5.2 LES CHAUFFE-EAUX THERMODYNAMIQUES (CET) SUR AIR NEUF OU AIR EXTRAIT

5.2.1 FLUIDES FRIGORIGENES DE REFERENCE

Les premiers chauffe-eaux thermodynamiques sont apparus sur le marché français vers 2007-2008. Le fluide frigorigène utilisé dans ce type d'équipement jusqu'en 2016 en France est le R-134a. La banque est évaluée à moins de 200 tonnes. Il existe cependant un marché émergeant pour le CO₂ depuis 2014.

La réglementation thermique 2012 amène à l'arrêt de l'installation de chauffe-eaux à résistance électrique dans les nouveaux bâtiments. Pour faire face à cette modification radicale du marché des chauffe-eaux, de nombreux constructeurs développent des chauffe-eaux thermodynamiques fonctionnant au R-134a. La norme de mesures des performances NF EN 16147 mesure le coefficient de performance de ces pompes à chaleur air / eau à 45°C. Même dans ces conditions favorables, le COP moyen annuel se situe au mieux entre 2,4 et 3 (cf. documentation constructeurs) pour ces chauffe-eaux fonctionnant au R-134a.

5.2.2 ALTERNATIVES

Au Japon, le programme EcoCute (*Hashimoto, 2006*) a permis le développement de chauffe-eaux thermodynamiques fonctionnant au CO₂ et pouvant produire de l'eau chaude sanitaire entre 55 et 70 °C. Les COP annuels mesurés sur des installations in situ montrent des valeurs annuelles supérieures à 4, ce qui est tout à fait remarquable. Une marque, au moins,

produit de tels chauffe-eaux adaptés aux besoins européens avec un COP de même niveau mais un prix bien supérieur à celui des chauffe-eaux développés avec du R-134a.

Les communications sur le remplacement du R-134a par du R-1234yf ou du R-1234ze(E) n'apparaissent pas encore mais, du point de vue thermodynamique, ce sont les deux fluides frigorigènes qui sont facilement adaptables aux chauffe-eaux développés avec du R-134a. Le remplacement du R-134a par de l'isobutane n'est pas annoncé actuellement car la charge fluide frigorigène nécessaire à la puissance calorifique du chauffe-eau est bien supérieure à 150 g.

On note toutefois la commercialisation en France de chauffe-eaux de capacité comprise entre 100 à 300 litres fonctionnant au R-290.

Pour cette application, comme pour les appareils de froid domestique, les circuits frigorifiques sont entièrement hermétiques et le retrofit ne fait pas sens. Seuls les fluides frigorigènes de remplacement dans les équipements neufs doivent donc être considérés.

5.2.3 CONCLUSIONS

Le CO₂ a l'avenir devant lui mais le coût des chauffe-eaux fonctionnant au CO₂ limite à l'heure actuelle le développement de son marché. Le programme EcoCute a permis le développement de ce marché à plusieurs millions d'exemplaires, pas moins de 17 marques japonaises sont entrées sur ce marché, ce qui a permis un extraordinaire travail de R&D pour le développement de tous les composants nécessaires à la gestion du CO₂ à haute pression. Une des leçons à tirer de ces développements est que les compagnies japonaises qui développent aussi bien des pompes à chaleur que des systèmes de climatisation ou de réfrigération connaissent parfaitement quels sont les usages efficaces du CO₂, qu'il s'agisse du froid commercial ou des chauffe-eaux thermodynamiques, et ont conçu et réalisé les composants clés de mise en œuvre du CO₂. Si les usages du CO₂ sont à l'heure actuelle limités c'est en connaissance de cause.

Tableau 5-2 - Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les CET

Fluides frigorigènes de référence	Solutions alternatives	+	-
R-134a	CO ₂	Meilleure efficacité Retour d'expérience Japon	Couteux
	R-290	Efficacité	Couteux

6 - FROID COMMERCIAL

6.1 GROUPE AUTONOME POUR MEUBLE FRIGORIFIQUE DE VENTE

6.1.1 FLUIDES FRIGORIGENES DE REFERENCE

Les groupes hermétiques équipant les meubles frigorifiques (vitrines réfrigérées, armoires, congélateurs, distributeurs de glace, etc.) des petits commerces utilisent historiquement le R-134a et le R-404A et, dans le cas des distributeurs automatiques seulement le R-134a.

6.1.2 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LES EQUIPEMENTS NEUFS

Depuis les années 2010, les hydrocarbures ont été mis sur le marché, via quelques constructeurs qui proposent des vitrines frigorifiques, des congélateurs et des distributeurs de crème glacée fonctionnant avec du propane (HC-290).

Le CO₂ apparaît également à cette période dans les distributeurs automatiques avec l'engagement de compagnies multinationales. Les publications établissant des comparaisons énergétiques entre différentes solutions concernent principalement, pour ce secteur, le remplacement du R-134a par un HFO pur et le remplacement du R-404A par un mélange HFC-HFO. Les tendances sont que le R-1234yf assure une puissance frigorifique et un rendement énergétique comparable au R-134a (*Sethi, 2016*). Le R-1234ze(E) nécessite des compresseurs de volume balayé plus important pour atteindre la capacité frigorifique du R-134a, ce qui n'a pas d'effet sur la performance énergétique. Pour le remplacement du R-404A plusieurs mélanges HFC-HFO sont développés. Selon (*Sethi, 2016-b*), les mesures sur des équipements de type congélateur ou chambre froide utilisant le R-448A (PRP 1387) ou le R-455A (PRP 148) montrent une amélioration de l'efficacité énergétique de 4 à 9 % par rapport au R-404A selon les cas. Selon (*Minor, 2016*), le R-454C (PRP =148) est une alternative A2L énergétiquement crédible pour les équipements de petite charge, en remplacement du R-404A. Les tests font apparaître une surconsommation d'énergie faible et une bonne compatibilité des matériaux et huile utilisés.

6.1.3 ETUDE DE LA BANQUE SECTORIELLE 2016

Le fluide frigorigène historiquement le plus utilisé dans les groupes hermétiques est le R-134a et, pour les puissances plus élevées, le R-404A avec des équipements en nombre moindre mais en charges plus importantes. La part des hydrocarbures (R-290 et R-600a) progresse mais ils sont apparus récemment sur le marché français et, du fait de la durée de vie des équipements et des faibles charges en jeu, leur pénétration sur la banque est estimée à moins de 10 % en 2016.

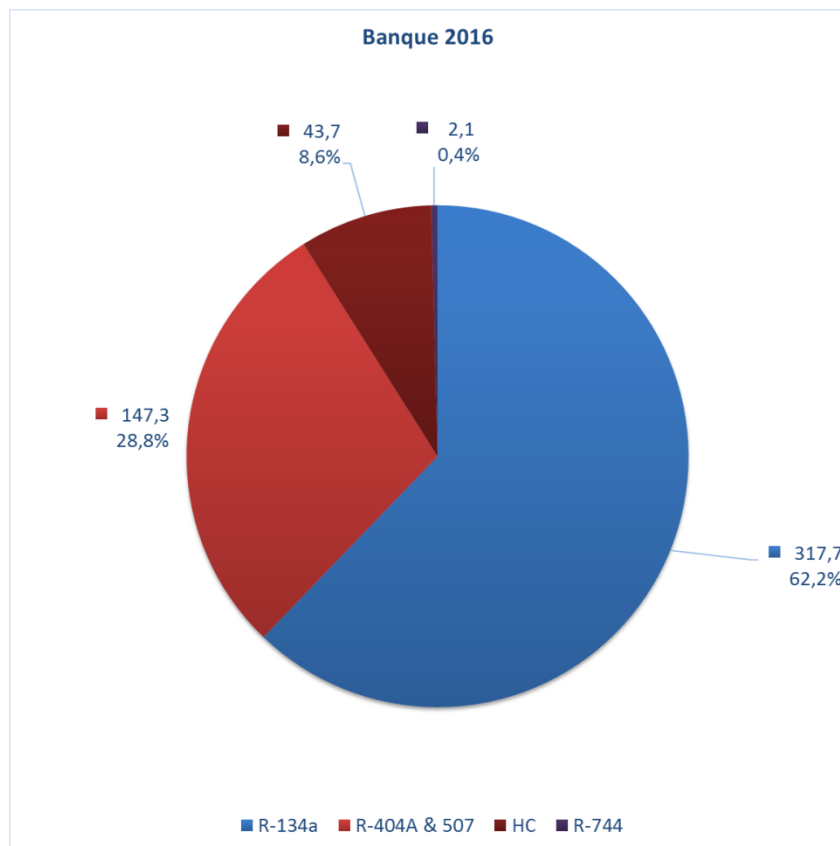


Figure 6-1 – Groupes hermétiques (petits commerces) - Banque 2016

6.1.4 CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Pour le segment des groupes hermétiques pour équipements des petits commerces, la transition du R-134a vers des alternatives hydrocarbures a commencé et le R-1234yf est aussi une solution énergétiquement envisageable pour ce type d'équipement. Concernant le remplacement du R-404A, des mélanges A2L (R-454C ou R-455A) sont proposés, d'efficacité énergétique supérieure ou comparable à celle du R-404A selon les articles étudiés.

Tableau 6-1 – Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les groupes autonomes des petits commerces

Fluides frigorigènes de référence	Solutions alternatives	+	-
R-134a	HC R-1234yf CO ₂ (distributeurs automatiques)	Meilleure efficacité Efficacité énergétique équivalente au R-134a À démontrer	A3 A2L Mise en œuvre
R-404A	R-455A Ou R-454C	Efficacité énergétique supérieure ou comparable à celle du R-404A selon les articles étudiés	A2L

6.2 GROUPE DE CONDENSATION

Le terme de « groupe de condensation » désigne un montage de composants assemblés, formant un ensemble permettant de comprimer les gaz à basse pression, de les refroidir dans un flux d'air afin de les condenser et ainsi fournir du liquide à haute pression à un ou plusieurs évaporateurs. Cet ensemble (a minima formé d'un compresseur, un condenseur et un ventilateur) est adapté aux établissements ayants de faibles besoins en puissance frigorifique tels que des restaurants, des bars, des hôtels, ainsi que des petites surfaces de vente comme des magasins d'alimentation spécialisé et les supérettes. L'architecture retenue pour ces établissements consiste à alimenter des meubles frigorifiques et/ou des petites chambres froides avec un groupe de condensation. Ces groupes évacuent leur énergie dans l'air ambiant (extérieur) :

- soit directement s'ils sont placés en extérieur,
- soit par l'intermédiaire d'un système de gaine d'air couplé à un ventilateur apportant l'air extérieur au condenseur et le rejetant après qu'il soit réchauffé.

Les températures de conservation des denrées sont positives (entre 0°C et 10°C selon les produits) ou négatives (<-18°C).

Il faut souligner que c'est un marché mondial, les choix de fluides frigorigènes intègrent donc une contrainte de banalisation du fluide frigorigène. Plusieurs choix peuvent cependant coexister. C'est un marché qui présente un grand intérêt pour les fabricants de compresseurs hermétiques.

6.2.1 FLUIDES FRIGORIGENES DE REFERENCE

Les fluides frigorigènes les plus répandus jusqu'à présent pour ces applications sont le R-134a pour les températures positives et le R-404A pour les températures positives et/ou négatives.

6.2.2 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LES EQUIPEMENTS NEUFS

Aujourd'hui, les fluides frigorigènes alternatifs sont le R-290, le R-744, pour les basses températures et le R-1234yf ou le R-1234ze(E) pour les températures positives.

Pour le R-290, des fabricants proposent des unités de condensation de petite puissance dédiées aux basses températures en remplacement du R-404A. Monter une installation sur site nécessite un savoir-faire, et donc une formation (du fait de la haute inflammabilité du propane) qui peut manquer aujourd'hui.

Le R-1234yf est proposé par les fabricants pour des groupes de condensation fonctionnant auparavant au R-134a et donc pour des températures positives.

Le CO₂ est proposé dans des groupes de condensation de plus grande puissance et par des fabricants (*Leong, 2017*) leaders mondiaux ou de plus petite taille.

La question du manque de la formation des installateurs pour la conception, l'installation et l'utilisation des installations fonctionnant avec ces fluides frigorigènes est revenue plusieurs fois lors des entretiens. Les solutions sont déjà disponibles ou sont en cours de développement, mais l'étape suivante est la présence de personnel compétent pour les manipuler.

6.2.3 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LE RETROFIT DES INSTALLATIONS

Plusieurs fluides frigorigènes peuvent théoriquement remplacer le R-404A et le R-134a lors d'un retrofit. Les fabricants d'unité de condensation en valident certains par des essais. Il est nécessaire de vérifier qu'un fluide est bien validé par le fabricant de l'équipement avant de procéder à un retrofit.

Pour le R-404A, les fabricants d'unités de condensation mettent en avant :

- le R-407A,
- le R-407F,
- le R-448A,
- le R-449A,
- et le R-452A.

Tous ces fluides frigorigènes appartiennent à la classe de sécurité A1, comme le R-404A. Avant de procéder au remplacement du R-404A il faut prendre en compte les points suivants :

- La puissance et le rendement obtenus avec les fluides frigorigènes de remplacement peuvent varier ; les logiciels des fabricants permettent d'estimer ces performances.
- La présence de R-32 dans ces mélanges entraîne une augmentation des températures de refoulement (excepté le R-452A). La plage d'utilisation de ces fluides frigorigènes peut s'en trouver limitée.
- Les importants glissements de température de ces fluides frigorigènes.

Il n'y a aujourd'hui pas d'obligation de remplacer le R-134a car son PRP de 1430 est inférieur à la limite de 2500. Il existe cependant des fluides frigorigènes de remplacement qui sont :

- le R-450A
- et le R-513A

Ces fluides frigorigènes, mélanges de R-134a et de R-1234yf, n'ont pas ou peu de glissement, permettent les mêmes plages de fonctionnement et ont l'avantage d'avoir des PRP plus faibles que le R-134a pur.

6.2.4 ETUDE DE LA BANQUE SECTORIELLE 2016

Historiquement, le R-404Aa été largement utilisé dans les groupes de condensation équipant les meubles frigorifiques des petits commerces et supérettes. Les charges peuvent être importantes, notamment dans les supérettes et magasins de type « drive » qui sont également pris en compte dans ce secteur depuis quelques années dans le cadre des études d'inventaire (charge moyenne = 200 kg).

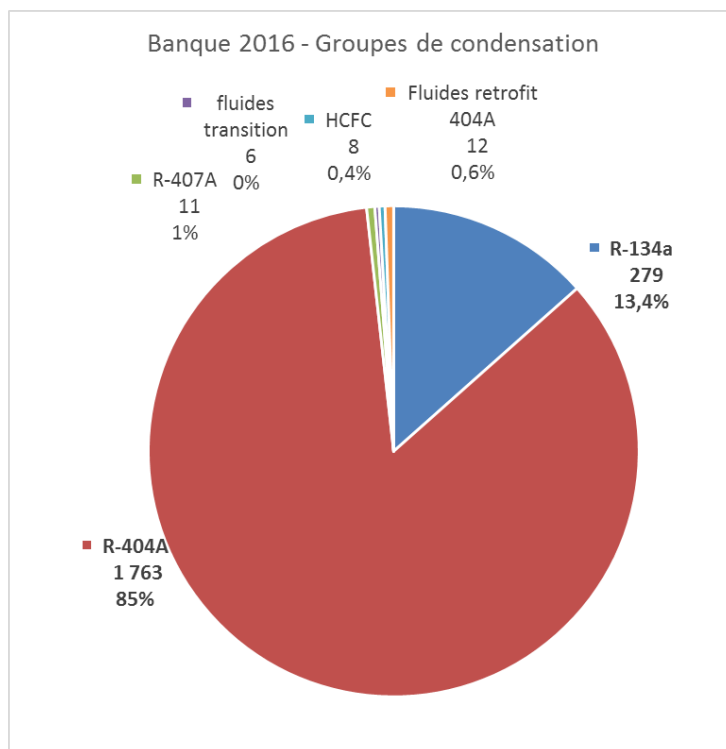


Figure 6-2 – Banque 2016 des groupes de condensation utilisés dans les petits commerces.

En 2016, les alternatives au R-404A et R-134a sont donc peu représentatives de la banque.

6.2.5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Des alternatives aux fluides frigorigènes à fort PRP existent pour les groupes de condensation. Cependant, les produits ne sont pas tous matures et le personnel formé à l'utilisation des fluides frigorigènes présentant des risques d'inflammabilité est encore insuffisant. Ces constats poussent certains fabricants à miser sur des HFO (le R-1234yf ou le R-1234ze). Le CO₂ commence à être proposé y compris par des majors.

Pour ce qui est de l'efficacité énergétique, les fabricants de groupes de condensation doivent répondre, depuis juillet 2018, aux exigences de l'Eco-Design rappelées au paragraphe 3.4.5. Pour les fluides frigorigènes de remplacement intermédiaires, les performances varient avec la puissance volumétrique de -10 à + 10% et pour les COP compresseurs on trouve la même dispersion. Pour les solutions à plus long terme pour le R-134a, les HFOs ou le propane permettent d'atteindre au moins les mêmes performances énergétiques comme les rapports

AHRTI l'ont fait voir. Pour les remplaçants long terme du R-404A, on manque encore de résultats systématiques.

Tableau 6-2 - Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les groupes de condensation des petits commerces

Fluides frigorigènes de référence	Solutions alternatives	+	-
R-134a Pour T° positives	R-1234yf et R-1234ze	Efficacité énergétique équivalente au R-134a	Maturité technique A2L
R-404A Pour T° positives et négatives	R-290 R-744 R-448A, R-449A R-450A, R-513A R-455A, R-454C	Meilleure efficacité énergétique (+++) A démontrer Efficacité équivalente au R-404A	A3 – formation installateurs Maturité technique Maturité technique Court terme, PRP

A plus court terme, certains fabricants ont fait le choix de développer des gammes de produits conçues pour les fluides frigorigènes de transition tels que le R-448A ou le R-449A, le marché de tels produits est limité à quelques années du fait de leur PRP proche de 1400.

6.3 SYSTEME CENTRALISE A DETENTE DIRECTE OU INDIRECTE EN FROID POSITIF ET NEGATIF

Les hypermarchés et les supermarchés disposent d'installations centralisées, avec une salle des machines où deux séries de centrales frigorifiques fonctionnent, l'une entre -10 et -15 °C pour la conservation des produits frais (froid positif) et l'autre aux environs de -35 à -38 °C pour les produits surgelés (froid négatif). Sur la puissance frigorifique totale installée, le froid positif représente typiquement 75 % et le froid négatif environ 25 %.

Dans ce secteur, on trouve deux types d'applications :

- les systèmes à détente directe ou indirecte en froid positif seul,
- les systèmes à détente directe ou indirecte en froid positif & négatif.

Dans le cadre du règlement F-Gaz, ce secteur est visé spécifiquement par :

- l'interdiction d'usage de fluides frigorigènes de PRP supérieur à 2500 à partir de 2020 et supérieur à 150 à partir de 2022, une exception étant accordée aux systèmes de type cascade dont le circuit primaire utilise un fluide frigorigène de PRP inférieur à 1500. Attention, comme il l'est souligné ci-dessous dans la note 21 du rapport de la Commission Européenne du 4 Août 2017 (*European Commission, 2017*), **la définition du circuit primaire est ambiguë.**

“It is important to point out that the 2022 requirement does not allow a simple cascade with e.g. HFC R134a in the primary circuit that also serves the whole medium-temperature cooling requirements while absorbing the heat from a CO₂ circuit for the low temperature. The requirement demands instead that the medium-temperature itself is split into two circuits, where only the primary circuit would be allowed to use HFCs < 1500, such as R134a.”

- l'interdiction d'usage de fluides frigorigènes vierges de PRP supérieur à 2500 pour la maintenance des installations existantes à compter du 1^{er} Janvier 2020.

Ce secteur est donc particulièrement visé par la réglementation, du fait du très large usage d'un HFC à fort PRP et de l'existence éprouvée d'alternatives pour les nouvelles installations.

De ce fait, qu'il s'agisse de technologies pour les équipements neufs ou de possibilités de retrofits, les propositions offertes à ce secteur sont foisonnantes et il est difficile d'être exhaustif et de pouvoir comparer toutes les solutions entre elles en termes d'émissions totales de gaz à effet de serre. Comme le montre le graphe suivant, certaines analyses de type LCCP (Life Cycle Climate Performance) existent dans la littérature mais elles sont basées sur un grand nombre d'hypothèses, dont la totalité n'est pas toujours explicitée, et dont certaines, telles que le taux d'émission de l'installation qui peut avoir un impact prépondérant sur les conclusions. Pour mémoire, le LCCP (IIR, 2015) distingue les émissions directes (liées à l'usage du fluide frigorigène au cours de la vie de l'équipement) des émissions indirectes liées à la fois à la consommation d'énergie de l'équipement mais aussi celles liées à la fabrication de l'équipement, à la production du fluide frigorigène et au démantèlement de l'équipement.

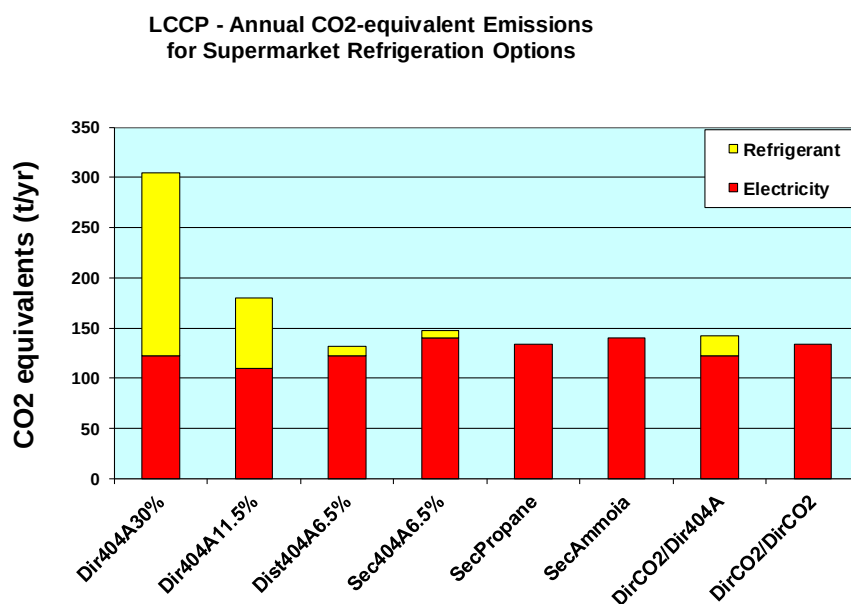


Figure 6-3 – Comparaison des émissions totales CO₂ équivalentes annuelles de plusieurs types d'installations de froid commercial (Bivens, 2002).

La Figure 6-3 montre un exemple de comparaison de plusieurs options utilisées en froid commercial. On vérifie sur cette figure qu'il faut un fluide frigorigène comme le R-404A dont le PRP est très élevé et un taux d'émission aussi élevé pour une forte différenciation vis-à-vis des autres options pour lesquelles la consommation d'énergie est à la fois prépondérante et du même ordre de grandeur.

6.3.1 FLUIDES FRIGORIGENES DE REFERENCE

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** ou froid positif seul.

Le R-404A (PRP 3922) et le R-507 (PRP 3985) constituent la quasi-totalité du marché neuf de fluides frigorigènes pour les installations de froid commercial centralisé entre 2000 et 2009-2010. Selon le besoin en froid positif et en froid négatif, le supermarché ou l'hypermarché dispose d'une ou plusieurs centrales au R-404A. Les charges nominales des installations varient entre 200 kg pour les petits supermarchés et près de 3 tonnes pour les plus grands hypermarchés.

L'un des avantages du R-404A en froid commercial était d'être à la fois adapté au froid positif et au froid négatif et de pouvoir être utilisé sur l'ensemble de l'installation à un coût compétitif.

6.3.2 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LES EQUIPEMENTS NEUFS

6.3.2.1 Alternatives mises en œuvre

En froid commercial centralisé les alternatives aux systèmes à détente directe utilisant du R-404A sont, pour les installations neuves :

1 - Les installations « cascade » R-134a/CO₂ : ce sont des systèmes utilisant le R-744 en détente directe pour le froid négatif et un système indirect au R-134a (R-134a/eau glycolée) en froid positif. Le système cascade R-134a/CO₂ reste aujourd'hui l'une des principales alternatives aux systèmes à détente directe ou indirecte en froid positif et négatif utilisant le R-404A. Cette alternative présente les avantages :

- d'une faible charge de HFC, celui-ci n'étant utilisé que dans le circuit primaire (150 à 500 kg) ;
- d'un coût devenu compétitif par rapport aux installations de référence au R-404A (solution mise sur le marché depuis plusieurs années) ;
- d'être une solution efficace énergétiquement ;
- d'être une solution acceptée par la réglementation F-Gaz II même après 2022 ;
- d'être une solution à long terme en offrant *a priori* des possibilités de conversions vers des HFO (R-1234ze(E) ou R-1234yf).

A noter : d'autres HFC sont proposés en alternative au R-134a pour les systèmes cascade, avec des PRP compris entre 1200 et 1500 tels que le R-448A.

2 - Les systèmes « R-744 transcritique » dits « boosters » qui utilisent le R-744 (CO₂) à la fois dans les systèmes Basse Température (BT) et Moyenne Température (MT). Les compresseurs BT agissent comme des boosters pour remonter de l'étage BT vers l'étage MT. Ces systèmes présentaient le désavantage d'être coûteux et moins efficaces énergétiquement que les autres options en climat chaud. Comme le montre le graphe de la Figure 6-4 issu d'une étude de la Commission Européenne (*European Commission, 2017*), la tendance observée est à la réduction des coûts et à l'amélioration de l'efficacité énergétique.

3 - Les systèmes à cascade utilisant un mélange HFC-HFO de PRP au voisinage de 600 : Le R-450A et le R-513A par exemple, tous deux non inflammables peuvent être

utilisés dans le circuit primaire d'un système cascade. Ce type d'installation a déjà été mis en œuvre dans des hypermarchés en France et répond aux contraintes post 2022 de la réglementation F-Gaz (PRP < 1500 pour le fluide frigorigène utilisé dans le circuit primaire d'une installation de type cascade) tout en limitant les quantités CO₂ équivalentes installées par rapport au R-134a. Sans glissement de température ou très faible (1K pour le R-450A), ces fluides frigorigènes pourraient également être envisageables pour le retrofit des installations de froid commercial de type cascade R-134a/CO₂ existantes.

4 – Les systèmes utilisant un mélange HFC-HFO de PRP inférieur à 150, tels que le R-455A et le R-454C, tous deux A2L, pouvant être utilisés dans une installation **indirecte ou de type « cascade »**. Il existe des magasins pilotes, notamment en Allemagne. Certains de ces mélanges avaient été identifiés lors de la précédente étude *Alternatives aux HFC à fort PRP*, ils ont été améliorés, en termes de PRP et récemment mis sur le marché après avoir reçu la codification ASHRAE 34. Ces fluides frigorigènes possèdent cependant un glissement de température marqué qui peut poser problème lors de la maintenance des installations.

5 - Installations indirectes ou de type « cascade » utilisant le R 717 (ammoniac) en fluide frigorigène primaire. Ce type de solution alternative est très rare en France mais utilisée dans certains pays tels qu'en Hongrie (*Winter, 2012*). L'ammoniac, du fait de sa toxicité (B2L), ne peut être exploité que s'il est confiné en salle des machines et présente de fortes contraintes d'utilisation en termes de sécurité et d'installation.

Il convient de noter que les systèmes à détente directe ou indirecte utilisant le R-134a ou un mélange A1 de PRP autour de 600 sont adaptés aux supermarchés et autorisés dans les installations neuves jusqu'en 2022 tout en permettant de respecter l'échéance post 2020 pour la maintenance.

D'autres systèmes à détente directe utilisant des fluides frigorigènes de PRP entre 1800 et 2500 tels que le R-407A ou R-407F sont techniquement et réglementairement possibles comme alternatives au R-404A mais ne sont pas proposés comme alternative crédible dans le cadre de cette étude car ces solutions paraissent inadaptées du point de vue du *phasedown* et des quotas disponibles.

A noter également que dans certains pays des magasins commencent à utiliser des systèmes chillers au propane/ Eau glycolée associés à des équipements de type « stand alone » (groupes hermétiques).

6.3.2.2 Retours d'expérience

Conformément au chapitre 3 de l'article 21 du règlement F-Gaz (UE) N° 517/2014 concernant le réexamen de l'interdiction d'usage des HFC à PRP > 150 dans les équipements neufs de réfrigération centralisée (excepté dans les systèmes « cascade » pour lesquels le seuil de PRP est fixé à 1500), la Commission Européenne a publié en Août 2017 un rapport « évaluant l'interdiction prévue à l'annexe III, point 13, et examinant en particulier l'existence de solutions techniquement possibles et présentant un bon rapport coût- efficacité, économes en énergie et fiables, susceptibles de remplacer les systèmes de réfrigération centralisés multipostes visés dans ladite disposition. » (European Commission, 2017). L'objectif est de vérifier que la situation du secteur de la réfrigération commerciale est en adéquation avec l'échéance de 2022.

Ce rapport est basé sur différentes études préliminaires tels que celle d'Oko-Recherche (Oko, 2016) ayant enquêté auprès de 150 entreprises européennes (taux de réponse 27 %) sur

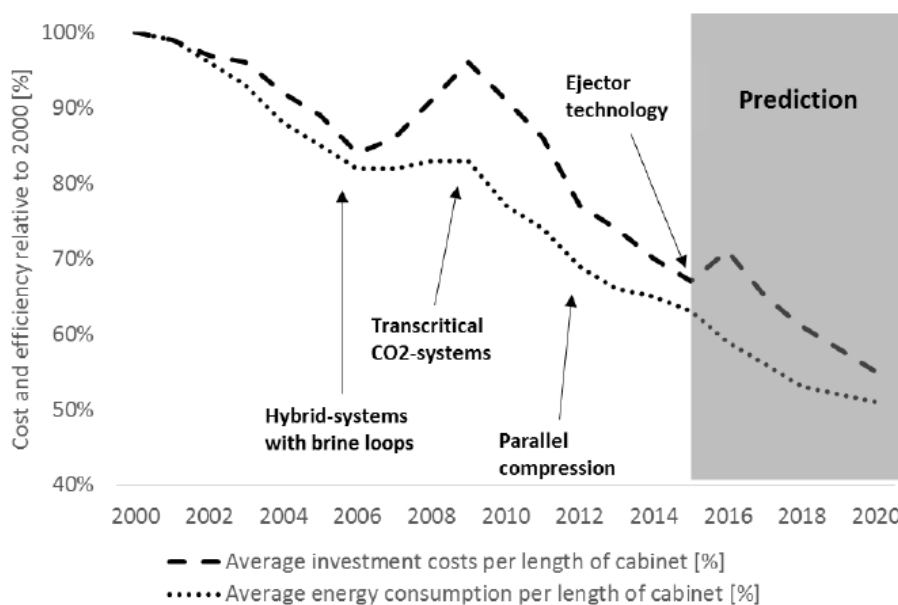
leur usage et connaissances en termes de coût et d'efficacité énergétique des alternatives aux HFC à fort PRP en froid commercial centralisé.

Les conclusions du rapport de la Commission Européenne sont que :

- Plusieurs technologies alternatives au R-404A sont largement utilisées en Europe dans ce secteur ;
- Celles-ci peuvent être structurées en 3 grandes catégories : les installations CO₂ transcritiques, les installations centralisées indirectes (appellation englobant dans ce cas les systèmes « cascade ») et les systèmes composés d'unités autonomes associées à un chiller utilisant des fluides frigorigènes à faible PRP ;
 - Ces solutions sont jugées fiables et efficaces d'un point de vue énergétique ;
 - Les résultats des études « suggèrent » que beaucoup de ces alternatives sont ou seront compétitives du point de vue du coût en 2022 ;
- Il n'est donc pas nécessaire d'assouplir l'échéance réglementaire de 2022.

Dans le cas particulier de la catégorie « CO₂ transcritique », le rapport met en avant la réduction des coûts et consommations d'énergie de ce type d'installations (Figure 6-4) ainsi que celle des taux d'émissions qui sont désormais du même ordre que ceux des installations aux HFCs. Même si le rapport souligne que les installations CO₂ transcritiques sont plus adaptées aux climats froids ou modérés, il mentionne que :

- Selon plusieurs cas d'étude cités dans (*Oko-Recherche, 2016*), les améliorations technologiques successives apportées aux systèmes boosters (compression parallèle, éjecteurs, refroidisseurs secondaires) ont permis d'améliorer considérablement l'efficacité des systèmes CO₂ transcritiques par rapport aux systèmes cascade directs HFC/CO₂ et aux systèmes HFC ;
- Leur usage est en nombre croissant même dans les pays du sud de l'Europe tels que l'Italie, l'Espagne, le Portugal et la Roumanie.



En termes de coût, le rapport souligne le surcoût initial de la technologie CO₂ (particulièrement élevé dans le cas de systèmes adaptés aux pays chauds) est, selon les retours d'enquête de l'étude Oko-Recherche, compensé par les économies d'énergie au bout de quelques années.

Dans le cas des climats chauds et des magasins de taille importante, le rapport souligne l'intérêt des systèmes indirects cascade R-717/R-744 qui affichent de bonnes performances dans ce type de conditions.

En France, la solution CO₂ transcritique est en effet utilisée par les grandes chaînes et clairement affichée par certains groupes [1] mais sans préciser la taille des magasins pour laquelle les systèmes CO₂ transcritique sont adaptés. Certains installateurs, spécialisés dans la maîtrise des consommations énergétiques des installations frigorifiques, ne proposent que cette option depuis plusieurs années sur le marché français [2].

Depuis quelques années, avec la révision de la réglementation F-Gaz puis la mise en place de la nouvelle réglementation, les chaînes commerciales ont testé et mis en œuvre plusieurs solutions alternatives au R-404A, qu'ils s'agissent d'installations neuves ou de retrofits. Les opérateurs mettent en avant les avantages propres à chaque solution.

- Les systèmes cascade R-448A/CO₂ présentent l'avantage d'un encombrement moindre par rapport aux installations R-134a/CO₂ (plus faible capacité volumétrique du R-448A) et, de ce fait, d'un coût plus faible d'installation [3] ;
- Les premiers tests de terrain menés par le groupe Auchan sur des systèmes cascade R-450A/CO₂ font apparaître une amélioration de l'efficacité énergétique par rapport au R-134a/CO₂ [4] ;

[1] Positionnement du groupe Carrefour, <http://www.carrefour.com/fr/content/du-co2-pour-un-froid-plus-propre>

[2] Entretien téléphonique Matthieu Auclerc, EO2S, pour le CITEPA, septembre 2017.

[3] <http://larpf.fr/Archives-article/Fiche/7554/Un-Intermarche-marseillais-s%2592equipe-d%2592une-cascade-R-448A%252FCO2>

[4] <https://www.hvac-intelligence.fr/actualites-marches/r450a-remplace-r134a-systeme-cascade-co2/> Auchan, 2015, Le R-450A remplace le R-134a dans le système de cascade CO₂, communication de HVAC intelligence.

6.3.2.3 Données bibliographiques

De nombreux articles comparent les performances des installations CO₂ transcritiques aux systèmes HFC centralisés utilisés traditionnellement en super et hypermarchés. Confortant les conclusions du rapport européen, les études montrent que l'efficacité énergétique des technologies CO₂ transcritiques récentes est améliorée.

- Les publications de Sawhala & al. (*Sawalha, 2017 et 2015*) comparant 5 installations de froid commercial en supermarchés en Suède à partir de mesures de terrain associées à une modélisation permettant de rendre les situations expérimentales comparables et d'évaluer les consommations d'énergie annuelles montrent que :
 - Les systèmes CO₂ transcritiques actuels sont significativement plus performants que les premiers systèmes (écarts de COP allant jusqu'à 40%) et assurent des COP supérieurs aux installations centralisées à détente directe utilisant des HFC pour les températures extérieures inférieures à 24°C ;
 - Les consommations d'énergie des installations CO₂ transcritiques récentes en supermarchés sont d'environ 20 % inférieures à celles des installations HFC traditionnelles (R-404A et R-407C) ;
 - Les récentes améliorations de type compression parallèle ou éjecteur tendent à réduire les écarts de performance des systèmes CO₂ transcritiques entre climat chaud et climat froid et à rendre l'utilisation des systèmes CO₂ transcritiques en climat chaud envisageable.
- Selon (*Tsamos, 2017*), où sont comparées 4 configurations CO₂ pour le froid commercial, le système à compression parallèle est le plus performant à la fois dans les climats chauds et modérés et permet une amélioration de l'efficacité énergétique de 5% en climat chaud et de 3,6% en climat modéré par rapport au système booster de référence.

Des études récentes sont également menées pour améliorer les performances des systèmes cascade R-134a/CO₂. Selon (*Llopis, 2016-b*), l'introduction d'un échangeur de chaleur interne (Internal Heat Exchanger, IHX) sur le circuit CO₂ BT d'une installation cascade R-134a/CO₂ permet d'augmenter le COP global de 3,7% tout en réduisant cependant légèrement la capacité frigorifique.

Des articles tentent de mener des analyses comparatives globales de type LCCP à l'aide d'outils open access tels que l'outil créé par l'Oak Ridge National Laboratory et l'University of Maryland College Park (<http://lccp.umd.edu/ornllccp/>) pour les systèmes de froid commercial des supermarchés et les pompes à chaleur. Dans (*Beshr, 2014*) sont comparés, à l'aide de cet outil, l'impact environnemental de 4 supermarchés utilisant des systèmes à détente directe ou cascade, et en termes de fluides frigorigènes, du R-404A, du R-448A ou du R-455A (alors L-40 de PRP 285) avec un système CO₂ transcritique. Cet outil est couplé au logiciel EnergyPlus pour simuler les performances horaires des systèmes. Un grand nombre d'hypothèses est associé au modèle, avec des sources variées, ce qui rend difficile l'analyse de l'article, cependant, il ressort qu'en termes de consommation énergétique, le système le plus performant est alors une installation composée d'un système indirect avec du R-455A en fluide primaire pour la moyenne température, associé à un système à détente directe utilisant du R-448A. A contrario, dans tous les cas c'est l'installation CO₂ transcritique, (précisons qu'il s'agit dans cet article du modèle booster « traditionnel » de 2014) dont les consommations sont les plus élevées, significativement dans les climats chauds. Cet article montre que les HFC à bas PRP sont envisageables dans le circuit primaire d'une installation de type cascade afin de réduire les consommations d'énergie.

6.3.3 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LE RETROFIT DES INSTALLATIONS

6.3.3.1 Alternatives mises en œuvre

Pour le retrofit des installations existantes au R-404A, le R-407A et F ont été les fluides frigorigènes les plus utilisés jusqu'en 2015-16.

Depuis 2015, alors qu'ils n'étaient pas encore disponibles lors du bilan réalisé pour l'étude *Alternatives de 2014*, plusieurs mélanges dont le PRP avoisine entre 1250 et 1500 ont été

mis sur le marché (R-448A, R-449A, R-407H notamment) pour convertir les installations utilisant le R-404A.

6.3.3.2 Retour d'expériences

Des grands groupes privilégient les retrofits du R-404A vers le R-448A ou R-449A dans le cas d'installations trop récentes, n'ayant pu encore être amorties.

En Espagne, à la suite de la mise en place d'une taxe sur les HFCs, de nombreux retrofits d'installations au R-404A ont été réalisés. Le retour d'expérience de la chaîne de grossistes Makro indique un gain de consommation d'énergie des installations ayant été converties du R-404A vers le R-448A [6].

Plusieurs publications comparent les performances des fluides frigorigènes de retrofit à celles du R-404A. On citera notamment (*Sethi, 2016-b*) s'intéressant à la conversion d'un supermarché utilisant du R-404A vers le R-448A. L'analyse montre une réduction de la consommation énergétique de 9 à 20 % selon la température extérieure. Dans (*Llopis, 2017*) le R-407H est testé en drop-in dans un système à détente directe basse température dans différentes conditions de fonctionnement et pour des drop-in partiels et complet. En comparaison avec le R-404A, la consommation d'énergie est réduite de 7,7 % au compresseur et de 4,0 % sur l'ensemble du système.

Ces retours d'expérience tendent à montrer que les solutions de retrofit, à court terme, peuvent constituer des alternatives énergétiquement efficaces au R-404A et une solution aux conséquences du phasedown observées en 2017-2018.

[5] Entretien de Makro pour la RPF, Février 2018. Fin du R-404A : des installations espagnoles converties au R-448A.

6.3.4 ETUDE DE LA BANQUE SECTORIELLE 2016

Les installations de type « cascade » R-134a/CO₂ sont déjà largement utilisées en France en hyper et supermarchés. Dès 2010-2011, les études d'inventaires en mentionnent l'introduction sur le marché français. La part de ces installations sur le marché neuf des installations centralisées a progressé, leur coût étant devenu rapidement compétitif. Selon le rapport 2017 de la Commission Européenne, 9 000 magasins utilisent des installations CO₂ transcritiques en Europe en 2016 et le nombre de ces installations a récemment fortement progressé également en France.

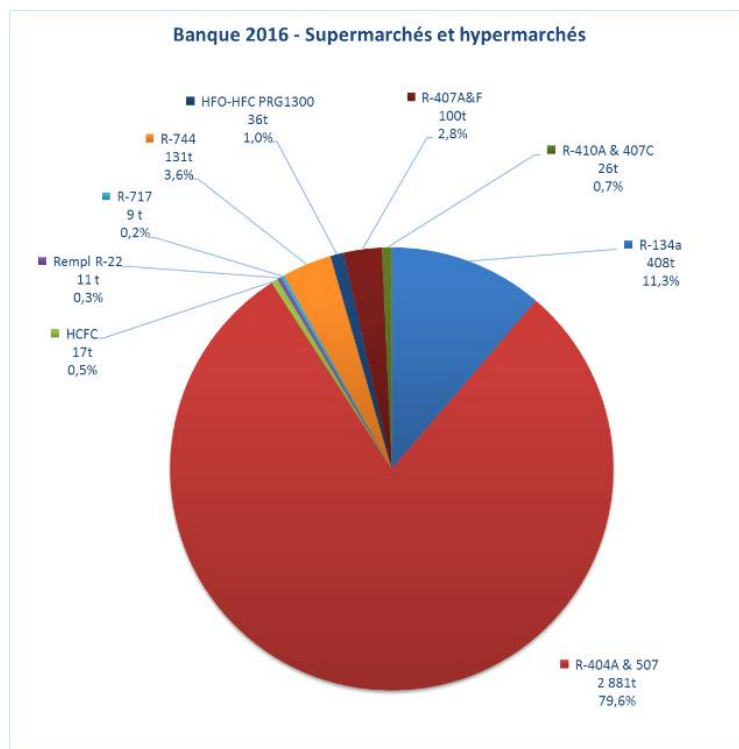


Figure 6-5 : Banque de fluides frigorigènes utilisés en Froid commercial – systèmes centralisés des super et hypermarchés. (Barrault, 2016)

Il faut noter que les quantités moyennes de R-744 installées dans les systèmes cascade HFC/CO₂ ou CO₂ transcritique sont connues de façon moins précise que celles de HFC et, dans le cadre des études d'inventaires, la banque de CO₂ est marquée d'une plus grande incertitude.

La banque 2016 est donc encore nettement dominée par le R-404A, à près de 80 %, mais la tendance décroissante, de 8 % entre 2015 et 2016, va s'accroître et progressivement réduire la banque. Il est possible que la banque de CO₂ soit légèrement sous-estimée.

6.3.5 CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Différentes solutions alternatives au système à détente directe utilisant du R-404A sont actuellement disponibles.

Tableau 6-3- Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les installations centralisés des supermarchés et hypermarchés

Fluides de référence	Solutions alternatives	+	-
R-404A	Cascade R-134a/CO ₂	Coût compétitif Efficace ++ Long terme (EU517/2014 & conversion HFO)	Disponibilité R-134a
	Cascade HFC/CO ₂ avec HFC de PRP autour 600	Efficacité équivalente cascade R-134a/CO ₂ , A1 Adapté post 2022 et phasedown	
	Cascade NH ₃ / CO ₂ Ou indirect NH ₃	Efficacité +++ Long terme Efficacité ++ Long terme	B2L - sécurité Maintenance & installation Coût Peu de retour d'exp en froid comm
	Systèmes indirects ou cascade HFC de PRP < 150	Long terme post 2022 Efficace +	A2L Maturité technique Glissement T°
	Système CO ₂ transcritique booster amélioré	Développements techniques récents pour adaptation climat chaud Amélioration efficacité éner et coût	Reste couteux Techno froid + à éprouver
Retrofits: R-448A & R-449A alternatives efficaces au R-404A (4 à 20% gain conso)			

Si de nombreux articles comparent des systèmes utilisant les systèmes de type cascade HFC/CO₂ aux systèmes CO₂ transcritiques, ils sont peu nombreux à concerner les systèmes indirects. Des développements technologiques ont été et sont encore menés de façon à améliorer l'efficacité énergétique des systèmes CO₂ transcritiques qui jusqu'à présent ne permettaient pas d'atteindre les performances des installations à détente directe au R-404A pour des températures extérieures supérieures à 24°C. Il convient de souligner que d'une part, il faut s'assurer de la robustesse des progrès mis en place en froid positif sur les installations CO₂ et, d'autre part, que certains de ces progrès techniques pourraient être adaptés aux installations cascade R-134a/CO₂ ou HFC-à-bas-PRP/CO₂ et en améliorer encore l'efficacité déjà supérieure aux installations de référence. Parallèlement, le coût de ces solutions tend à diminuer. Les échéances réglementaires à venir concernant les nouveaux équipements mis sur le marché devraient donc pouvoir être honorées. Soulignons une nouvelle fois que, ce qui n'était pas évident à la première lecture de la réglementation (EU) n° 517/2014 est mis en avant dans le rapport d'Août 2017 de la Commission Européenne : les circuits primaires des systèmes cascades autorisés à être mis sur le marché après 2022 doivent utiliser un fluide frigorigène de PRP < 1500.

Enfin, avec plus de 2 500 tonnes de R-404A encore présentes dans les installations centralisées de froid commercial, c'est l'échéance de 2020 concernant l'interdiction d'usage de fluides frigorigènes neufs de PRP > 2500 pour la maintenance des installations qui risque de poser problème au secteur du froid commercial. Il est probable que des solutions court terme de retrofits vers des fluides de PRP < 2500 doivent être mises en œuvre. Les fluides de remplacement proposés de PRP autour de 1300 permettent de réduire les consommations d'énergie de 4 à 20 % selon les configurations, dans les cas étudiés dans la littérature.

7 - CLIMATISATION A 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. Le Tableau 7-1, extrait du rapport inventaires 2015 (Barrault, 2015), présente les données des marchés des différentes catégories d'équipements en 2015.

Tableau 7-1: Marchés d'équipements de climatisation en France en 2015

Marchés	Climatisation individuelle				Climatisation autonome				
	Mobile**	Clim. fenêtre	Split system	Multi split system	DRV	Split et multi split	Roof top	Armoire spéciale	Armoires verticales
2017	70 000*	350*	365 000	120 000	23 000	5 000	1 500*	1 000*	1 000*

* valeurs estimées.

**données marchés ayant une incertitude élevée.

On constate au Tableau 7-1 des différences d'ordres de grandeur :

- entre la climatisation individuelle, avec des équipements vendus annuellement à plusieurs centaines de milliers d'exemplaires, et la climatisation autonome, avec un marché de l'ordre de 20 000 unités ;

- à l'intérieur de la climatisation individuelle le marché de plusieurs centaines de milliers d'unités est celui des split systèmes et les mobiles de plusieurs dizaines de milliers ;

D'autre part les DRV se distinguent des multisplits par la puissance mais présentent une conception proche.

Ces constats sur les ordres de grandeur ont pour conséquence que le fluide frigorigène ultra-dominant est le R-410A car les splits, multisplits, DRV sont fabriqués par des firmes internationales qui font des choix pour l'ensemble des marchés mondiaux.

Le R-290 même s'il est installé dans des centaines de milliers de « mobiles » reste une niche de marché comme le montre le Tableau 7-2.

Tableau 7-2 : Fluides utilisés en climatisation à air (Barrault, 2015)

Fluides	2010	2015
Climatiseurs mobiles	100 % R-410A	90 % R-410A, 10 % R-290
Climatisation de fenêtre ou « windows »	100 % R-410A	100 % R-410A
Mono split	2 % R-407C, 98 % R-410A	1 % R-407C, 94 % R-410A, 5 % R-32
Multi split	14 % R-407C, 86 % R-410A	1 % R-407C, 94 % R-410A, 5 % R-32
Armoires spéciales	26 % R-407C, 55 % R-410A, 19 % R-134a	1 % R-407C, 99 % R-410A
DRV	25 % R-407C, 57 % R-410A, 18 % R-134a	18 % R-407C, 65 % R-410A, 17 % R-134a
Split et Multi split	5 % R-407C, 95 % R-410A	5 % R-407C, 95 % R-410A
Roof top	27 % R-407C, 73 % R-410A	15 % R-407C, 85 % R-410A
Armoires verticales	1 % R-134a 99 % R-410A	1 % R-134a 99 % R-410A

Dans le présent rapport, le segment des climatiseurs à circuit hermétique se distingue car il présente la particularité de pouvoir se convertir au propane (R-290).

7.1 CLIMATISATION A SYSTEMES HERMETIQUES

7.1.1 FLUIDES FRIGORIGENES DE REFERENCE

Ce segment de la climatisation à circuit frigorifique hermétique est identifié en tant que tel car il correspond, a priori, à celui qui peut utiliser le plus facilement des hydrocarbures. Ce segment est cependant dominé par le R-410A car l'utilisation du R-290 est à l'heure actuelle limitée, en Europe, aux climatiseurs mobiles avec une charge de plusieurs centaines de grammes. Plusieurs fabricants européens proposent de tels climatiseurs mobiles qui disposent d'un circuit complet entièrement fabriqué en usine sans raccordement entre l'unité extérieure et l'unité intérieure. Le choix du R-290 ne s'est pas étendu aux « windows », dont le marché français est extrêmement réduit, qui sont des produits qui suivent les standards américains et utilisent donc le R-410A. Pour les consoles, les puissances sont de plusieurs kW et la charge de fluide frigorigène est rapidement au-delà des limites normalisées (NF EN 378 et EN 335-2-40), d'où là encore l'utilisation du R-410A.

7.1.2 BANQUE SECTORIELLE 2016

Le R-290 a été introduit dans les équipements de type mobile à partir de 2005. La banque d'hydrocarbures se constitue lentement et représente environ 3 % de la banque de ce secteur.

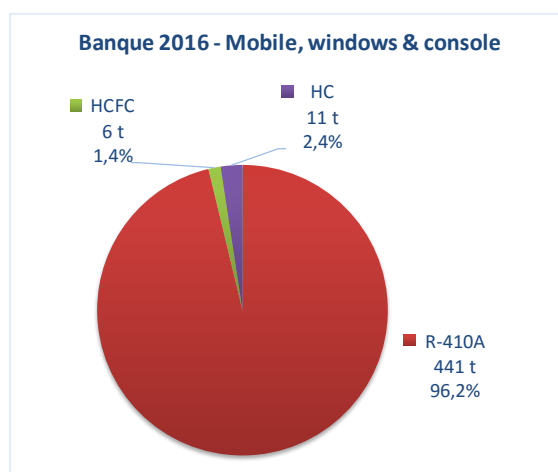


Figure 7-1 : Banque 2016 – Systèmes de climatisation avec groupes hermétiques

7.2 SYSTEME SPLIT OU MULTISPLITS (P<17.5 kW)

Les split et multisplit sont fabriqués en grandes séries et le retrofit ne fait pas sens, ni du R-410A vers le R-32, ni vers le R-290, pour des raisons évidentes de sécurité et aussi pour des raisons thermodynamiques sur les niveaux de pression, la température de refoulement ou la puissance volumétrique. La substitution du R-410A ne se pose que pour équipements neufs avec un système qui intègre les propriétés thermodynamiques et de sécurité du fluide de remplacement. Pour les unités fonctionnant au R-407C l'intérêt des fluides de remplacement A1 n'a pas d'intérêt car les PRP sont très peu différents et, pour les remplaçants long terme on trouvera des mélanges A2L qui ne seront donc pas proposés en retrofit pour des conditions de sécurité.

7.2.1 FLUIDES FRIGORIGENES DE REFERENCE

Le Tableau 7-2 montre la domination du R-410A pour les split et les multi split, le R-407C représentant une très faible part et n'étant utilisé que par des fabricants positionnés sur des marchés très spécifiques et de tailles relativement modestes. Tous les grands fabricants internationaux commercialisent des équipements fonctionnant au R-410A.

7.2.2 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LES EQUIPEMENTS NEUFS

A l'heure actuelle, le fluide frigorigène alternatif au R-410A utilisé dans des split systèmes ou de multi split commercialisés en Europe est le R-32. On note l'introduction par au moins trois firmes japonaises bien implantées en Europe de split systèmes et de multi split fonctionnant au R-32. Selon (Mota-Babiloni, 2017), le R-32 présente trois avantages par rapport au R-410A : à la réduction du PRP s'ajoute la réduction de la charge et l'amélioration de l'efficacité énergétique. Cependant, sa température de refoulement nécessite des optimisations techniques des systèmes.

L'usage du R-290 dans des split systèmes apparaît en Inde et en Chine mais ces split systèmes ne sont pas commercialisés en Europe et devront suivre la norme produit EN 60335-2-40 dont le résumé de la version 2017 est présenté en section 3.3.4.2. Dans (Lee, 2016), une analyse LCCP de 4 mélanges à bas PRP est comparée à celles du R-32, R-290 et R-410A. Il est montré que le R-32 et le R-290 permettent d'obtenir la meilleure réduction d'émissions totales CO₂ équivalentes comparativement aux mélanges.

Les fluides de remplacement long terme du R-407C ne font pas l'objet d'une communication spécifique, car le R-407C a été utilisé pour utiliser des lignes de produits conçues pour le R-22. On peut cependant indiquer que ces lignes de produits peuvent fonctionner avec les mélanges à PRP < 150 que sont le R-454C ou le R-455A conçus pour remplacer le R-404A.

7.2.3 ETUDE DE LA BANQUE SECTORIELLE 2016

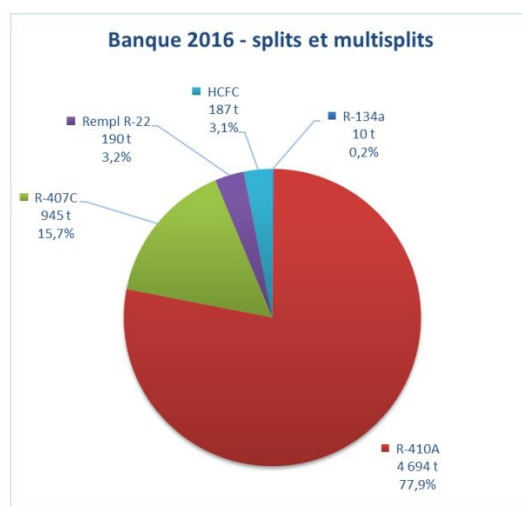


Figure 7-2 : Banque 2016 – Systèmes split et multisplit

La banque sectorielle extraite du rapport inventaires 2016 montre la dominance du R-410A à près de 80 % sur le parc d'équipements.

7.3 MULTISPLITS P>17.5 kW, SYSTÈMES DRV ET ROOFTOPS

7.3.1 FLUIDES FRIGORIGENES DE REFERENCE

Les systèmes multi split de puissance supérieure à 17,5 kW, ainsi que les DRV, fonctionnent très majoritairement au R-410A. Comme dit précédemment, on trouve du R-407C dans les équipements qui avaient été conçus pour du R-22. Pour les rooftops, la compacité des équipements est un peu moins importante, d'où une présence du R-407C de l'ordre de 15 %. On remarque cependant que les développements techniques réalisés pour le R-410A amènent à une efficacité énergétique qui peut être supérieure à celle des unités au R-407C d'où la domination du R-410A aussi dans le segment des rooftops.

7.3.2 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LES EQUIPEMENTS NEUFS

Les alternatives long terme pour ces équipements de puissance frigorifique significative sont des alternatives A2L, on ne trouve pas de référence à l'utilisation du R-290 pour de telles puissances. De même que pour les unités de puissance inférieure, on trouve déjà des multi split ou des DRV commercialisés avec du R-32. Les fluides de remplacement de type R-452B ou R-454B ne sont pas actuellement annoncés dans ces segments de marché. Le rapport ORNL (Abdelaziz, 2016) sur les alternatives bas PRP pour les rooftops montre que les alternatives proposées, de PRP compris entre 450 et 750, permettent d'obtenir des meilleures performances que le R-410A. Cependant les substituts étudiés ont un PRP supérieur à 250.

7.3.3 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LE RETROFIT DES INSTALLATIONS

Comme indiqué dans la section précédente, le retrofit de multi split au R-410A ne se fera pas avec des fluides A2L. Pour les rooftops au R-407C là aussi le retrofit vers des fluides A2L ne semble pas plausible et les alternatives non inflammables (A1) ne présentent pas de PRP attractif comparativement au R-407C.

7.3.4 ETUDE DE LA BANQUE SECTORIELLE 2016

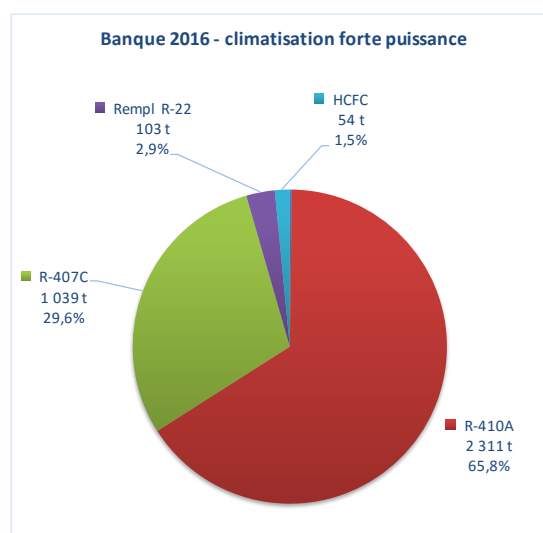


Figure 7-3 : Banque 2016 – Equipements multisplits, DRV et rooftops.

La banque du parc de ces équipements reflète l'utilisation dominante du R-410A et une banque de R-407C non négligeable.

7.4 CONCLUSION CLIMATISATION A AIR

Le remplacement du R-410A par le R-32 a fait l'objet de travaux de développement très significatifs des constructeurs japonais de systèmes split ou multi-split à la fois sur la fiabilité par le contrôle de la température de refoulement et pour l'efficacité énergétique qui est améliorée de 7 à 10%.

Comme pour les autres applications où les hydrocarbures sont utilisés, le propane correctement mis en œuvre présente une efficacité énergétique au moins égale au R-410A, à noter cependant que sa puissance frigorifique volumétrique est au moins 15% inférieure à celle du R-410A.

Tableau 7-3 : Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les équipements de climatisation à air

Fluides de référence	Solutions alternatives	+	-
R-410A (hermétique)	HC	Meilleure efficacité	A3
R-410A (split ou multi split de P<17.5 KW)	R-32	Meilleure efficacité	A2L
R-407C (split ou multi split de P<17.5 KW)	R-454C ou le R-455A	Équivalent en termes d'efficacité	A2L
R-410A (multi split de P>17.5 KW, VRV et Rooftop)	R-32	Équivalent en termes d'efficacité	A2L

8 - POMPES A CHALEUR

Les pompes à chaleur (PAC) peuvent être regroupées en quatre 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-eaux thermodynamiques qui sont traités dans les équipements domestiques (section 5.2) ;
- Les climatiseurs réversibles (split ou multi split ou DRV) qui sont traités à la section des équipements de climatisation de forte puissance et qui constituent un nombre très important de systèmes fonctionnant en pompes à chaleur pendant la saison de chauffe.

Les PAC prises en compte dans cette section sont les pompes à chaleur qui vont délivrer leur chaleur sur un circuit à eau ce qui évite le double comptage des climatiseurs réversibles. Les PAC sol/sol, sol/eau, eau/eau et eau glycolée/eau constituent les PAC géothermales.

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, ce qui permet d'utiliser plus facilement des fluides inflammables ou modérément inflammables. Là aussi les règles de sécurité sont explicitées dans la norme IEC 60 335-2-40 (cf. section 3.3.4.1).

Tableau 8-1 : Marché des PAC résidentielles

PAC	2010	2017
Air/ eau	53 854	79617
Eau/Eau, Sol/sol et sol/eau	8957	2005

Les données du marché des pompes à chaleur sont reprises des données UNICLIMA. On constate que plus de 95 % du marché est composé de PAC Air/ eau plus faciles à installer et moins coûteuses et de moins de 5 % de PAC eau/eau ou sol /eau.

8.1 FLUIDES DE REFERENCE

Selon l'étude d'inventaires 2016 (*Barrault, 2016*), le fluide majoritairement utilisé dans les différents types de PAC est le R-410A, le R-407C occupe 50 % du secteur des PAC eau/eau et Sol /eau. Le propane (R-290) commence à être utilisé mais ne représente, à l'heure actuelle, qu'environ 10 % du marché.

8.2 ALTERNATIVES POUR LES EQUIPEMENTS NEUFS

Comme explicité précédemment, les alternatives pour le R-410A sont principalement :

- Le R-32 qui est déjà proposé par plusieurs marques japonaises (les entretiens menés pour cette étude le confirment), ce qui est bien sûr facilité par le fait que la chaleur est distribuée par un circuit à eau. Certains fabricants projettent de ne produire que des PAC au R-32 dans les années à venir;
- Le R-290 est déjà sur le marché et verra vraisemblablement son usage s'élargir, porté par des firmes européennes. Le positionnement de constructeurs de taille moyenne n'est pas encore explicite. Lors des entretiens menés pour cette étude, des fabricants ont annoncé vouloir développer des systèmes fonctionnant avec ce fluide, et certains proposent déjà ce type de produits.

Plusieurs études comparent les performances des PAC en fonction du fluide frigorigène utilisé. On peut citer notamment (*Makhnatcha, 2014*), qui s'intéresse au cas d'une PAC air/eau de

30 kW. Les résultats affichés montrent que le R-290 et le R-1270 permettent d'obtenir une meilleure efficacité énergétique qu'avec le R-410A.

Pour ce qui est du R-407C, le passage à des fluides de type R-454C ou R-455A fait sens pour les équipementiers fabriquant ces pompes à chaleur car leur PRP est inférieur à 150, mais il est encore trop tôt pour constater une telle évolution. Le R-290 peut aussi constituer aussi une option.

Note sur les pompes à chaleur industrielles

Suivant le niveau de températures, les fluides candidats pour le futur sont le R-1234ze(E) et le R-1233zd(E). 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.

8.3 ETUDE DE LA BANQUE SECTORIELLE 2016

Les PAC air/eau dominant largement le marché des PAC résidentielles et utilisent majoritairement le R-410A, ce qui explique qu'il domine la banque de ce secteur. L'alternative présente sur le parc en 2016 est le propane, il représente moins de 3 %.

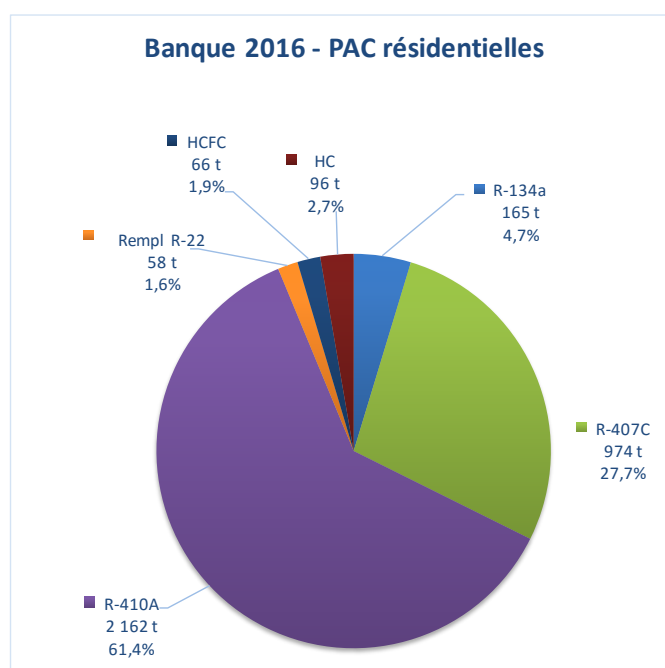


Figure 8-1 : Répartition des fluides frigorigènes utilisés sur la banque 2016 des PAC (air/eau, eau/eau, sol/eau et sol/sol)

8.4 CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Ce secteur des pompes à chaleur sur eau suit a priori les mêmes tendances que le secteur de la climatisation. Les inconnues sont tout aussi fortes sur le moyen terme sauf pour le remplacement du R-407C où des mélanges A2L de PRP inférieur à 150 existent et où le propane peut trouver des développements plus aisés qu'en climatisation air/air. Selon les publications référencées, les hydrocarbures (A3) sont des alternatives énergétiquement efficaces pour le remplacement du R-410A.

Tableau 8-2 - Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les PAC

Fluides de référence	Solutions alternatives	+	-
R-410A	R32 R-290 et R-1270	Bonne efficacité Meilleure efficacité	A2L A3
R-407C	R-454C ou le R-455A	Équivalent en termes d'efficacité	A2L
R-410A (PAC industrielle)	R-1234ze R-1233zd	Bonne efficacité Meilleure efficacité, A1	Puissance frigorifique volumétrique plus faible HCFO

9 - CLIMATISATION MOBILE (BOUCLE DE CLIMATISATION AUTOMOBILE)

9.1.1 FLUIDES FRIGORIGENES DE REFERENCE

Depuis 1994, le R-134a a été le seul fluide frigorigène utilisé en climatisation automobile pour les véhicules particuliers, utilitaires légers et véhicules industriels. La climatisation des trains, bus et tramways a d'abord utilisé des systèmes au R-22 puis des groupes au R-407C ou R-134a.

9.1.2 ALTERNATIVES POUR LES EQUIPEMENTS NEUFS

9.1.2.1 10 ans d'évaluation du R-1234yf et du CO₂

Les fabricants automobiles ont un intérêt stratégique à ce que fluide frigorigène utilisé dans les boucles de climatisation des véhicules soit unique et mondial. Cette banalisation permet de maintenir une pression forte sur les prix des boucles de climatisation proposées par les équipementiers de rang 1.

La controverse technique pour le choix du fluide de remplacement au R-134a entre le R-1234yf et le CO₂ a mobilisé pendant 10 ans la R&D de tous les groupes automobiles. Sous l'égide de l'association SAE (Society of Automotive Engineers), des essais annuels ont été menés dans les conditions climatiques extrêmes de Phoenix en Arizona pour le rafraîchissement et en hiver à Salfelden en Autriche pour évaluer les performances en mode pompe à chaleur. Du point de vue des performances, les essais ont montré que les performances du CO₂ pouvaient être équivalentes en mode climatisation et, tendanciellement meilleures, en mode pompe à chaleur. Les constructeurs japonais ayant à la fois développé des systèmes CO₂ et R-1234yf très performants, ils ont montré que, du point de vue de la fiabilité et des fuites au joint tournant, le CO₂ pouvait difficilement devenir un choix mondial. De là, le R-1234yf est devenu le fluide de référence en climatisation automobile malgré une forte résistance des firmes allemandes. Les constructeurs européens ont retardé autant que possible le passage au R-1234yf pour les questions de prix de vente de ce fluide.

Des études telles que (*Papasavva, 2014*), ont montré que, placé dans un contexte mondial, le R-1234yf était une meilleure alternative que le CO₂, (Figure 9-1) en considérant l'ensemble des émissions directes et indirectes au cours du cycle de vie (LCCP) du véhicule et du fluide frigorigène, même si le CO₂ montrait de légèrement meilleures performances en climat froid ou tempéré.

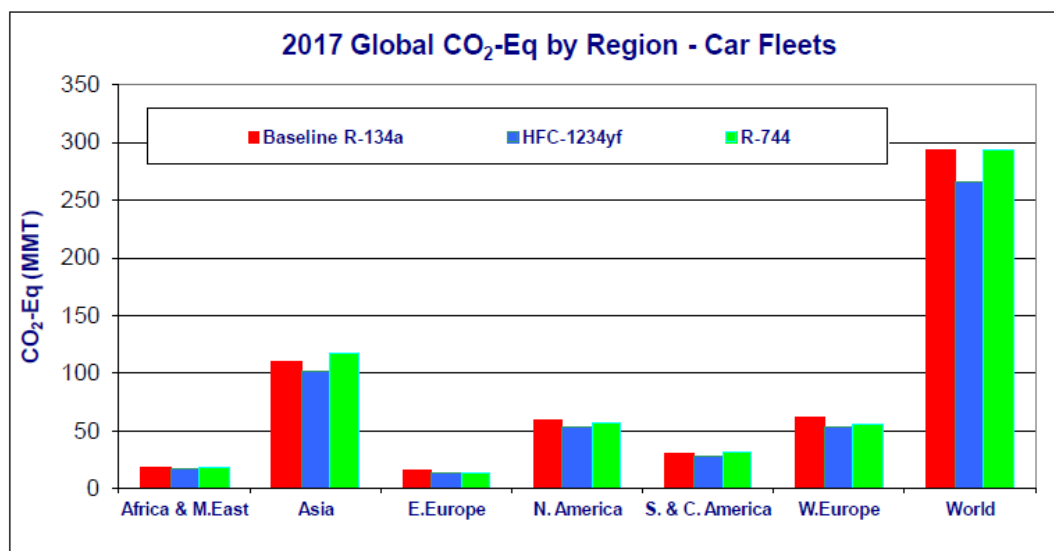


Figure 9-1 : Evaluation des émissions CO₂ équivalentes totales (directes + indirectes au sens LCCP) des flottes de climatisations automobiles en supposant la mise en œuvre des alternatives sur l'ensemble des véhicules neufs à partir de 2011 (Source : Papasavva, 2014).

9.1.2.2 Alternative mise en œuvre

La Directive 2006/40/CE dite Directive MAC interdit depuis le 1^{er} Janvier 2017 la mise sur le marché européenne de véhicules particuliers dont le système de climatisation utilise un fluide frigorigène de PRP > 150. La directive prévoyait une introduction progressive de l'alternative au R-134a, de 2011 à 2017. Des rapprochements ont été faits, dans les cadre de l'études d'inventaire 2016 (*Barrault, 2016*), entre les marchés déclarés à l'Observatoire de l'ADEME et les demandes en fluides reconstituées par les inventaires en se basant sur une pénétration progressive du R-1234yf sur le marché européen. Des écarts significatifs ont montré que l'introduction du R-1234yf a été beaucoup plus lente que prévu et initialement communiquée. L'échéance de 2017 a été respectée et, actuellement, les véhicules particuliers mis sur le marché français utilisent tous du R-1234yf. Cependant, étant donné l'écart de prix entre le R-1234yf et le R-134a, la majorité des constructeurs ont privilégié l'usage du R-134a à celui du R-1234yf sur la période 2011-2016, en limitant le nombre de nouvelles plateformes.

Il convient de rappeler que les véhicules utilitaires, camions, bus et trains ne sont actuellement pas concernés par la directive MAC. L'inconvénient du R-1234yf pour ces autres applications est actuellement le coût du fluide.

9.1.3 ETUDE DE LA BANQUE SECTORIELLE 2016

Etant donné la lente introduction du R-1234yf sur le marché automobile sur la période 2011-2016, la part de la banque qu'il représente en 2016 est faible, estimée à seulement 3%.

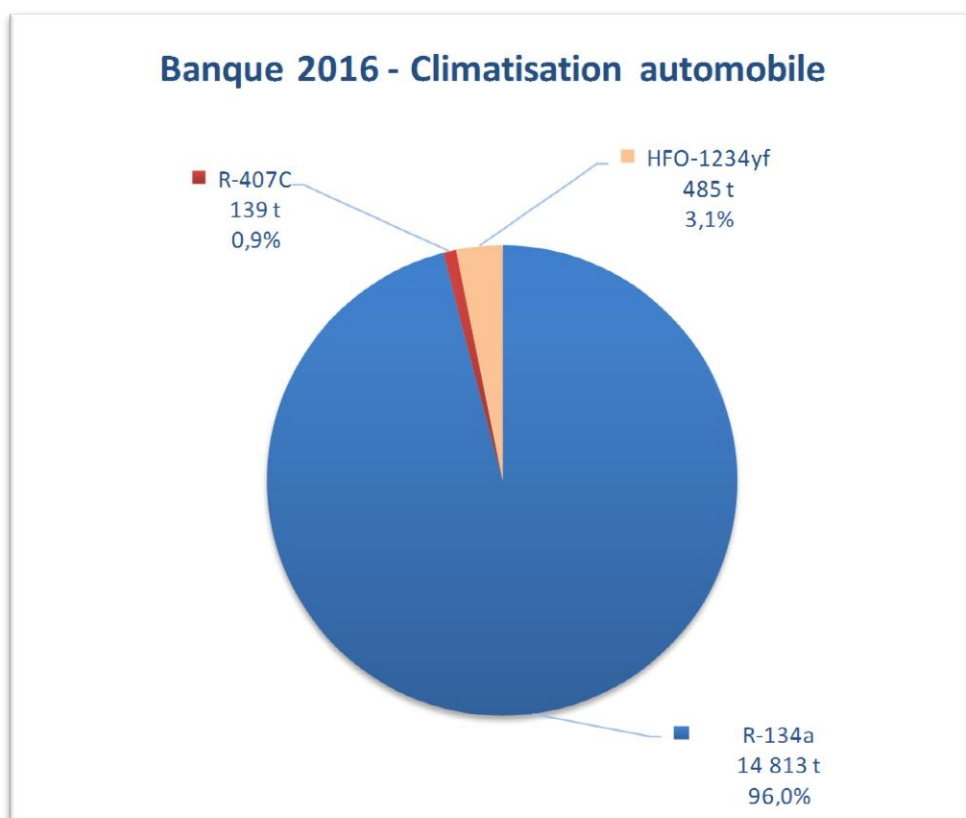


Figure 9-2 : Répartition des fluides frigorigènes sur la banque 2016 du secteur climatisation mobile.

9.1.4 CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Une fois le choix stratégique effectué, il est peu vraisemblable qu'il y ait un retour en arrière sans oublier que, mondialement, c'est encore le R-134a qui est largement dominant, la réglementation européenne constituant une exception au niveau mondial.

Tableau 9-1 - Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP pour la climatisation automobile

Fluides de référence	Solutions alternatives	+	-
R-134a	R-1234yf	Efficacité équivalente	A2L
	CO2	PRP de 1 Efficacité équivalente	Fiabilité Haute pression, risque de fuite accrue sur joint tournant

10 - GROUPE REFROIDISSEURS D'EAU (GRE)

Selon les études d'inventaire, les GRE à compresseur centrifuge de grande puissance constituent un marché de petite taille comparativement aux GRE à compresseurs volumétriques (Tableau 10-1). Dans les années qui viennent, il faudra tenir compte de la « révolution » Turbocor avec la commercialisation de groupes centrifuges de puissance moyenne (250 à 700 kW).

Tableau 10-1 : marchés des GRE en France (Barrault, 2015)

Marchés	2000	2005	2010	2015
GRE toutes puissances	9 830	13 510	7 380	6 424
GRE avec compresseurs centrifuges	49	53	56	50

Comme le fait voir le Tableau 10-2, les fluides utilisés dépendent de la technologie des compresseurs, centrifuge ou volumétrique, et des puissances mise en jeu. Les GRE centrifuges constituent un marché mondial de même que les GRE à compresseurs à vis, les GRE de petite taille sont fabriqués par un grand nombre d'entreprises, de toutes tailles, et des marchés plus locaux.

Tableau 10-2 : Fluides utilisés sur le marché neuf des GRE 2010-2015 (Barrault, 2015)

Fluides utilisés	2010	2015
GRE P < 50 kW	R-407C (31 %) R-410A (69%)	R-407C (5 %) R-410A (95 %)
GRE 50 < P < 350 kW	R-407C (45 %) R-410A (53 %) R-717 (2 %)	R-407C (5 %) R-410A (94 %) R-717 (1 %)
GRE P > 350 kW	R-407C (22,5 %) R-410A (25,5 %) R-134a (50 %) R-717 (2 %)	R-407C (10 %) R-410A (49 %) R-134a (40 %) R-717 (1 %)
Compresseurs centrifuges	R-134a (100 %)	R-134a (95 %) R-1234ze(E) (5 %)

10.1 GRE CENTRIFUGE

10.1.1 FLUIDES FRIGORIGENES DE REFERENCE

En Europe, le marché des groupes centrifuges fonctionne essentiellement avec du R-134a. Dans le reste du monde on trouve une répartition du marché entre le R-134a et le R-123 ; le R-123 permettant de réaliser des équipements qui ne relèvent pas de la Directive appareils à pression ou de réglementations équivalentes hors Europe.

10.1.2 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LES GRE CENTRIFUGES NEUFS

Alternatives mises en œuvre

Le **R-1234ze(E)** a été mis sur le marché des GRE centrifuges en France en 2015 [1]. Les essais ont été effectués rapidement par les constructeurs et les performances énergétiques du R-1234ze(E) comparativement au R-134a sont supérieures de 5 à 10 % (*Kasai, 2013*). On est dans un cas typique où l'alternative présente de nombreux avantages : PRP de l'ordre de 1, prix équivalent au R-134a, performance énergétique supérieure et inflammabilité très faible.

De même le **R-1233zd(E)** qui est un HCFO (il reste un chlore mais son effet sur l'ozone est extrêmement faible ODP = 0,00034) s'est aussi imposé très rapidement sur le marché des équipements neufs du fait d'un COP supérieur à celui du R-123, d'une absence d'inflammabilité et d'un prix tout à fait acceptable [2]. A noter cependant que l'agence allemande de l'environnement UBA a demandé en Août 2017 à la commission européenne que ce fluide soit interdit d'usage au motif que c'est un HCFO même si son ODP est insignifiant.

[1] Carrier sees future in R-1234ze <https://www.coolingpost.com/world-news/carrier-sees-future-in-r1234ze/>

[2] York chiller heralds adoption of R-1233zd <https://www.coolingpost.com/world-news/york-chiller-heralds-adoption-r1233zd/>

10.1.3 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LE RETROFIT DES GRE

Les GRE centrifuges sont généralement des équipements de puissance supérieure à 1 MW, jusqu'à 10 MW et plus, et leur durée de vie se compte en plusieurs dizaines d'années du fait d'une maintenance régulière. La question du retrofit se pose donc. Des essais ont été réalisés en particulier dans le cadre des études AHRI, pour remplacer en retrofit le R-134a par du R-1234ze(E). On peut conclure qu'il faut changer le lubrifiant, vérifier les conditions d'utilisation d'un fluide A2L même si l'inflammabilité de ce fluide est extrêmement faible et accepter une perte de puissance frigorifique de l'ordre de 10% pour une efficacité énergétique améliorée de l'ordre de 5%.

Le R-513A (R-1234yf/134a ; 56/44) dont le PRP est de 631 et le R-450A (R-134a/1234ze(E) ; 42/58) dont le PRP est de 603 sont des fluides présentés comme drop-in mais avec des résultats présentés dans le cas de GRE volumétriques (cf. ci-dessous).

10.1.4 ETUDE DE LA BANQUE SECTORIELLE 2016

Les premiers GRE centrifuges utilisant le R-1234ze(E) venant d'être mis sur le marché, la banque de ce secteur est principalement constituée du fluide de référence, le R-134a, à plus de 90 %. A noter, la banque de HCFC n'est pas encore complètement éradiquée et une part est constituée par les fluides de transition pour remplacer le R-22 (R-422D notamment).

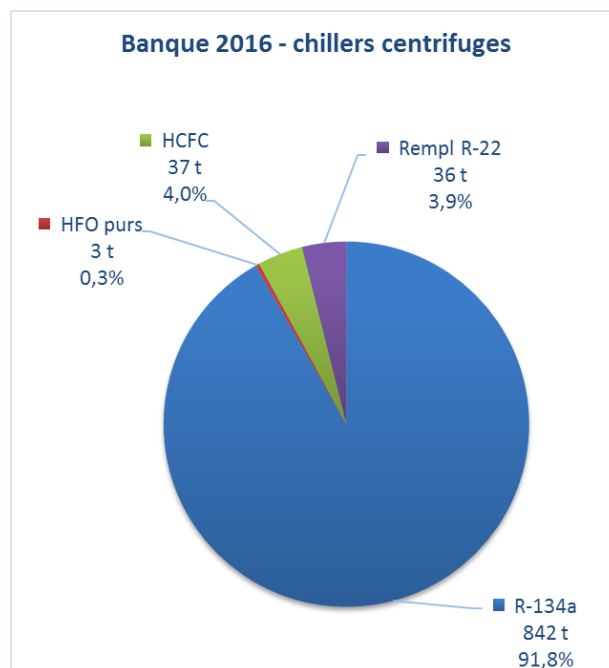


Figure 10-1 : Banque 2016 des GRE à compresseur centrifuge

CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Dans le cas des GRE centrifuges, les solutions long terme existent, le rythme du changement du R-134a vers les HFO va dépendre de la répartition des quotas attribués aux fabricants de fluides frigorigènes, de la qualité du confinement des GRE centrifuges, de la disponibilité de R-134a recyclé. L'ensemble de ces conditions devrait amener à un programme de passage hors R-134a progressif et sans trop d'à-coups.

Tableau 10-3 - Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les GRE centrifuges

Fluides de référence	Solutions alternatives	+	-
R-134a	R-1234ze	Efficacité supérieure de 5 à 10 % au R-134a	A2L
R-123	R-1233zd	Bonne efficacité, A1	HCFO

10.2 GRE VOLUMETRIQUES

Comme le montre le Tableau 10-1, le marché annuel des GRE volumétriques varie de 6 000 à 13 000 unités selon les années. Les puissances sont extrêmement variables et les applications aussi bien en froid industriel, en froid commercial et en climatisation tertiaire.

10.2.1 FLUIDES FRIGORIGENES DE REFERENCE

Le Tableau 10-4, extrait des inventaires 2015, montre une évolution forte vers le R-410A ; historiquement le R-407C a été utilisé par les équipementiers car les GRE volumétriques fonctionnaient précédemment au R-22. On note aussi qu'avec l'élévation de puissance, le R-134a, qui n'est pas utilisé pour les puissances frigorifiques inférieures à 350 kW, apparaît de manière significative dans les GRE volumétriques à vis, ce qui indique qu'à partir de ce seuil de puissance, le surcoût associé à la taille du compresseur s'annule.

Tableau 10-4 - Fluides utilisés sur le marché neuf des GRE volumétriques en 2010 et 2016 selon (Barrault, 2015)

Fluides utilisés	2010	2016
GRE P < 50 kW	R-407C (31 %) R-410A (69%)	R-407C (5 %) R-410A (95 %)
GRE 50 < P < 350 kW	R-407C (45 %) R-410A (53 %) R-717 (2 %)	R-407C (5 %) R-410A (94 %) R-717 (1 %)
GRE P > 350 kW	R-407C (22,5 %) R-410A (25,5 %) R-134a (50 %) R-717 (2 %)	R-407C (10 %) R-410A (49 %) R-134a (40 %) R-717 (1 %)

10.2.2 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LES GRE VOLUMETRIQUES NEUFS

Les GRE, compte-tenu de la distribution du froid par un circuit frigoporteur présentent des limites d'utilisation des fluides A2L, de l'ammoniac ou des A3, fortement élargies, d'où une très grande variété d'options techniques et une difficulté d'obtenir une vision claire sur ce que sera la répartition des fluides à bas PRP sur le marché du futur.

On trouve déjà sur le marché pour les petites tailles (quelques kW frigorifiques) des GRE fonctionnant au **R-290** et commercialisés par des marques internationales [1]. Comme déjà indiqué pour le propane, son efficacité énergétique est généralement supérieure voire bien supérieure à celle du HFC remplacé.

Pour les GRE de puissance de plusieurs dizaines de kW frigorifiques utilisant du R-410A, on trouve déjà sur le marché européen des GRE fonctionnant avec du **R-32** à efficacité énergétique améliorée [2].

Dans la même gamme de puissance, des GRE à **l'ammoniac** (R-717) fonctionnent avec des compresseurs chemisés spécialement conçus pour l'ammoniac, là aussi pas de problème pour obtenir une efficacité énergétique élevée.

Pour les GRE de puissance supérieure à 250 kW frigorifiques, et souvent avec des compresseurs à vis, on trouvera la même solution que pour les GRE à compresseurs centrifuges à savoir le remplacement du R-134a par du **R-1234ze** ; l'offre est déjà disponible sur le marché par plusieurs grandes marques internationales.

Selon un grand fabricant du secteur, l'évolution post-R-410A pourrait s'effectuer en deux phases : tout d'abord avec des mélanges à base de R-32 puis, à moyen terme avec du R-32 ou du R-452B (PRP 698).

Est-ce que le remplacement du R-407C se fera par des fluides comme le R-455A ou le R-454C ? C'est plausible mais il en reste trop tôt pour l'affirmer.

[1] Tecumseh. Technical Bulletin Hydrocarbons.

[2] Daikin applied launches first R-32 chiller series. <http://www.acrjournal.uk/uk/daikin-applied-launches-first-r32-chiller-series>

[3] York chillers compatible with R-513A <https://www.coolingpost.com/world-news/york-chillers-compatible-with-r513a/>

10.2.3 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LE RETROFIT DES GRE VOLUMETRIQUES

Le retrofit de GRE volumétriques fonctionnant au R-134a par les deux frigorigènes R-513A ou R-450A, qui sont tous les deux des fluides de sécurité A1 et dont le PRP est respectivement de 631 et de 603, est déjà revendiqué par des grands équipementiers de GRE volumétriques à vis comme un fluide drop-in [4].

Sinon le passage du R-134a au R-1234ze(E) en retrofit est aussi possible à la fois du fait de la très faible inflammabilité du R-1234ze(E) et au fait que la perte d'environ 10 % de la puissance frigorifique à COP supérieur peut être considéré comme acceptable par l'utilisateur final.

4.2.4 ETUDE DE LA BANQUE SECTORIELLE 2016

Comme le montre l'allure de la banque 2016, c'est le R-410A qui est majoritairement utilisé dans le secteur des GRE volumétriques, toutes puissances confondues. Cependant, même s'il est progressivement remplacé par le R-410A, le R-407C a été également fortement utilisé, sa banque est donc significative.

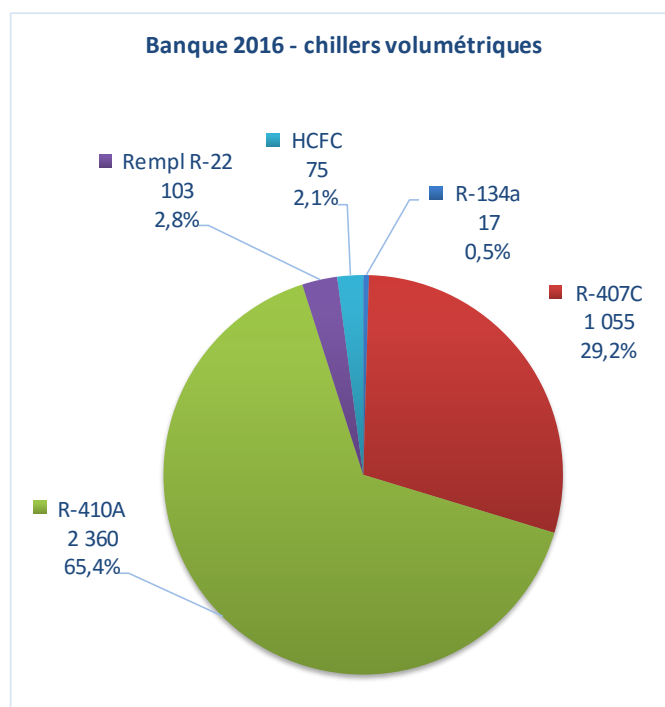


Figure 10-2 – Banque 2016 – GRE à compresseurs volumétriques

10.2.4 CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Pour les équipements neufs, les GRE volumétriques à vis fonctionnant au R-134a suivront vraisemblablement la même évolution que les GRE à compresseur centrifuge, c'est-à-dire un passage du R-134a au R-1234ze(E), dont les performances sont meilleures.

L'évaluation est plus complexe pour les GRE fonctionnant avec des compresseurs alternatifs à piston ou des compresseurs Scroll. Le besoin d'un fluide à forte puissance frigorifique volumétrique est avéré mais avec une plus grande souplesse que pour les climatiseurs air/air. Les fluides A2L purs (R-32) et en mélanges (R-455A, R-454C, entre autres) seront utilisés dans les équipements neufs. Le propane sera utilisé pour les petites puissances sans qu'on sache quelle part de marché sera prise. L'ammoniac pourra aussi être utilisé aussi mais il n'est pas adopté à l'heure actuelle par des entreprises internationales.

Tableau 10-5 : Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour les GRE volumétriques

Fluides de référence	Solutions alternatives	+	-
R-410A P < 50kW	R-290	Meilleure efficacité énergétique	A3
R-410A 50 < P < 350kW	R-32 NH ₃	Meilleure efficacité Meilleure efficacité	A2L B2L
R-410A P > 350kW	R-1234ze	Bonne efficacité	A2L

Le retrofit du R-134a vers le R-513A ou le R-450A est prouvé comme efficace, l'incertitude sur l'ampleur de ces retrofits dépend de l'allocation des quotas associés à la réglementation F -gaz.

11 - FROID DANS LES INDUSTRIES AGROALIMENTAIRES

Le froid dit « industriel » regroupe des systèmes frigorifiques très divers dont les caractéristiques doivent être rappelées, nous reprenons ci-dessous l'introduction du précédent rapport sur les alternatives, rédigé en 2014 pour l'AFCE.

En agroalimentaire et dans les procédés industriels, 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 frigoporteur, le système thermodynamique contenant le fluide frigorigène refroidissant lui-même ce frigoporteur ;
- des systèmes en cascade qui comportent deux fluides distincts, l'un adapté à la haute température par exemple le R-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 requérant des fluides purs ou des quasi-azéotropes ;
- des systèmes à évaporateurs noyés comme les tanks à lait ;
- des groupes refroidisseurs d'eau (ou 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.

11.1 ETUDE DE LA BANQUE SECTORIELLE 2016

Comme le montre la figure suivante, le froid agroalimentaire est fortement utilisateur de R-404A et de R-717 (ammoniac). Un assouplissement de la réglementation française concernant

les installations utilisant l'ammoniac puis la mise en application du règlement F-Gaz ont renforcé la tendance déjà forte d'utilisation de l'ammoniac dans ce type d'installation.

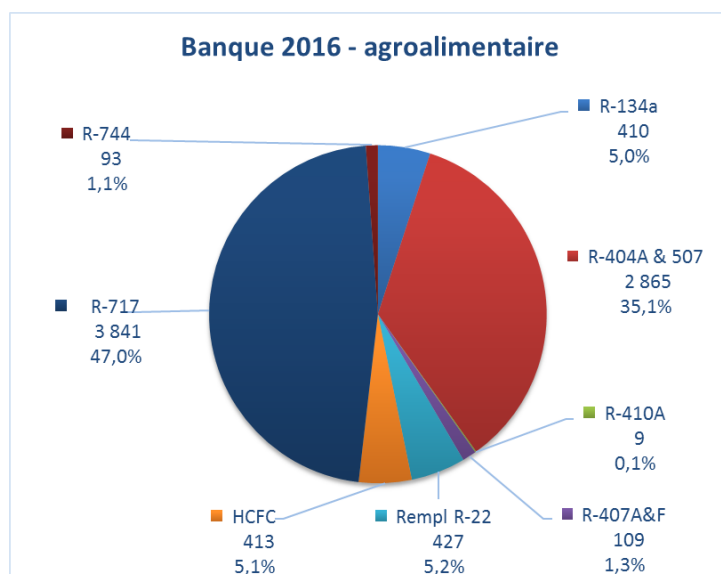


Figure 11-1 : Répartition des fluides frigorigènes utilisés sur la banque du froid agroalimentaire en 2016

La vision de la banque va permettre de simplifier l'analyse devant le foisonnement technique décrit ci-dessus et que nous allons analyser par type de structure : détente directe ou alimentation par pompe..

11.2 SYSTEME A DETENTE DIRECTE FROID NEGATIF OU POSITIF ET NEGATIF

Ces systèmes s'approchent des systèmes installés dans les grands hypermarchés. Les puissances frigorifiques typiques vont de 100 kW à 1 MW frigorifique. Les circuits sont relativement courts, les détendeurs sont thermostatiques. Si le besoin frigorifique est essentiellement en froid positif comme pour les laiteries et fromageries, on trouvera souvent des systèmes au R-134a ou R-404A. Cependant les entreprises ont des politiques environnementales qui leur sont propres et peuvent choisir l'ammoniac aussi en froid positif seul.

Lorsque les besoins de froid sont à la fois en froid positif et en froid basse température et qu'on est toujours en centrale frigorifique en détente directe, les mêmes options qu'en froid commercial d'hypermarchés seront envisageables.

Cas des systèmes de refroidissement des tanks à lait : L'analyse documentaire de l'offre technique (par exemple celle de Charriau [1]) montre que les évaporateurs des tanks à lait sont des évaporateurs à détente directe au R-404A contrôlés par des détendeurs thermostatiques . Ce sont donc des évaporateurs non noyés qui relèvent des mêmes solutions en neuf ou en retrofit que celles présentées dans cette section.

[1] <http://charriau.com/en/new-bulk-milk-coolers/new-elliptical-tanks>

11.2.1 FLUIDES FRIGORIGENES DE REFERENCE

Les fluides de référence sont l'ammoniac, le R-404A, le R-134a. Plus les puissances frigorifiques sont faibles, plus ce sont le R-134a et le R-404A qui sont les fluides de travail. L'ammoniac demande des circuits en acier ou en acier inoxydable car ce fluide est non

compatible avec le cuivre. Les évaporateurs Air / ammoniac sont plus chers car non fabriqués en grande série, par contre pour la condensation les condenseurs évaporatifs sont à coûts acceptables à partir d'une certaine taille.

Lorsque les besoins de froid existent aux deux niveaux de température et en détente directe on peut trouver des architectures en cascade : CO₂ à la basse température et ammoniac ou R-134a pour le froid positif.

11.2.2 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LES EQUIPEMENTS NEUFS A DETENTE DIRECTE

Pour les installations neuves les choix dépendent de la puissance frigorifique requise et des niveaux de température : froid positif seul ou froid positif et froid négatif.

Pour les installations fonctionnant au R-134a, selon les choix de sécurité faits par l'entreprise, les options de long terme disponibles sont :

- 1) l'ammoniac,
- 2) le R-1234yf ou le 1234ze(E).

Tous ces fluides de remplacement correctement mis en œuvre présentent une efficacité énergétique égale ou supérieure au R-134a.

Pour les installations fonctionnant au R-404A où *a priori* on peut penser qu'il y a des besoins à la basse température, les options long terme sont connues :

- 3) soit ammoniac pour tous les niveaux de température ;
- 4) soit ammoniac pour le froid positif et CO₂ pour le froid négatif. Là aussi on aura des gains énergétiques significatifs lorsqu'on met en œuvre un système en cascade CO₂ à la basse température et ammoniac en température positive ;
- 5) soit remplacement du R-404A par du R-455A ou du R-454C dont les efficacités énergétiques mesurées sont supérieures au R-404A selon les premiers retours d'expérience.

11.2.3 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LE RETROFIT DES INSTALLATIONS A DETENTE DIRECTE

Pour le retrofit d'installations au R-134a, les fluides frigorigènes R-513A ou R-450A sont des options possibles sans changement majeur mais avec des PRP autour de 600, avec une efficacité énergétique améliorée et soit une puissance volumétrique légèrement supérieure dans le cas du R-513A, soit inférieure de l'ordre de 10 % pour le R-450A. Le retrofit au R-1234yf ou R-1234ze(E) est aussi techniquement possible mais n'est pas présenté à l'heure actuelle.

Les fluides de retrofit pour le R-404A sont très nombreux avec des PRP allant de 1 400 à 2 200, il en a été recensé 8 dans la section 4.3. A noter que ces fluides de transition peuvent aussi être utilisés pour des installations fonctionnant encore au R-22.

La disponibilité effective de ces fluides de transition dépend de la politique commerciale des entreprises qui les produisent mais aussi de leurs quotas exprimés en mise sur le marché en équivalent CO₂. D'où la crainte de pénurie possible de tels fluides pour le retrofit d'installations fonctionnant au R-404A. On note que l'utilisation du R-404A recyclé ou régénéré, qui est autorisé hors de son système frigorifique initial, donne une souplesse pour l'exploitation de systèmes au R-404A. D'autant que le R-404A recyclé ou régénéré est hors quota.

11.2.4 CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Les solutions long terme existent pour tous les systèmes de froid industriel à détente directe et sont aussi diverses que les solutions actuellement en place. Cette diversité est fondée sur les politiques de sécurité et d'environnement définies par chaque entreprise utilisatrice.

Les solutions de retrofit existent pour le R-134a et le R-404A. Compte-tenu du PRP assez élevé des fluides de transition de remplacement du R-404A il existe une incertitude sur la disponibilité effective des fluides en quantité suffisante pour les retrofits.

Tableau 11-1 : Bilan des alternatives aux HFCs à fort PRP disponibles pour le secteur des Industries agroalimentaires

Fluides de référence	Solutions alternatives	+	-
R-134a	HFO purs NH ₃	Plus efficace Plus efficace	A2L B2L, compatibilité matériaux, sécurité
R-404A	NH ₃ NH ₃ /CO ₂ Mélanges HFC-HFO PRP < 150 (R-454C, R-455A)	Retour d'exp ++ efficacité + efficace	B2L B2L A2L

11.3 SYSTEME A EVAPORATEUR NOYE FROID POSITIF OU FROID NEGATIF ET POSITIF

Les évaporateurs noyés sont des évaporateurs alimentés par pompe et correspondent à des installations de grandes tailles typiques des grands entrepôts frigorifiques et des procédés agro-alimentaires avec une salle des machines centralisée. Le recours à l'alimentation par pompe est adapté aux très grandes installations avec des lignes d'alimentation de fluide frigorigène liquide sur des distances importantes pour disposer d'un échange efficace dans les évaporateurs.

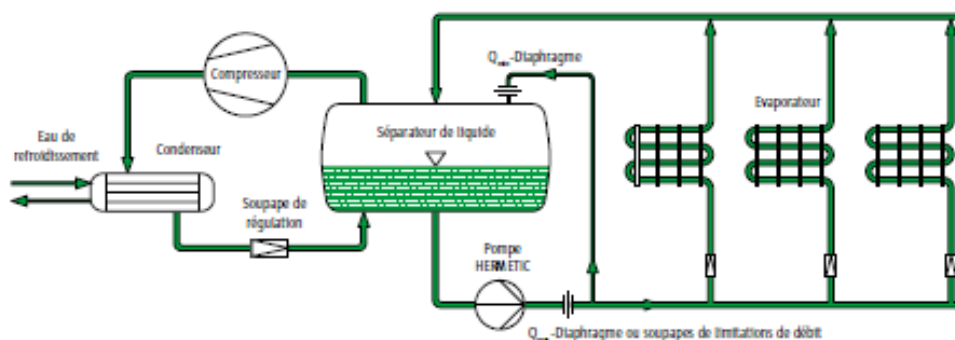


Figure 11-2 : Schéma de principe de l'alimentation d'évaporateurs noyés (documentation Hermetic)

Comme on le vérifie sur la Figure 11-2, la pompe est reliée à un réservoir qui lui garantit l'alimentation en fluide frigorigène liquide ; ce réservoir sert aussi de séparateur liquide-vapeur, pour que ne retourne que de la vapeur au système de compression. Le taux de recirculation, c'est à dire la masse de liquide évaporée sur la masse de liquide totale, varie typiquement de 4 à 8 c'est-à-dire que seulement 12 à 25 % de fluide est évaporé, ce qui garantit un excellent échange au niveau de l'évaporateur, qui est ainsi appelé noyé.

Le réservoir pose un problème aux mélanges à glissement de température car la composition de la vapeur est différente de la composition du liquide et, à la longue, deux fluides différents circulent dans le système de compression et dans les évaporateurs. D'où la nécessité d'utiliser des fluides purs ou des mélanges azéotropes ou très faiblement zéotropes comme le R-404A.

11.3.1 FLUIDES FRIGORIGENES DE REFERENCE POUR LES SYSTEMES ALIMENTES PAR POMPE

Les fluides de référence pour de tels systèmes sont l'ammoniac, le R-404A, et historiquement le R-22. Le CO₂ peut aussi être utilisé de cette manière pour la basse température mais la pression est beaucoup plus élevée. De tels systèmes contiennent généralement des charges de fluides frigorigènes de plusieurs tonnes.

11.3.2 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LES EQUIPEMENTS NEUFS

Pour les équipements neufs, et c'est déjà en place depuis plus d'une dizaine d'années, on trouve des installations en cascade avec le CO₂ à la basse température et l'ammoniac en température intermédiaire. On trouve aussi des installations entièrement à l'ammoniac mais les quantités de fluide peuvent être considérées comme trop importantes d'où l'intérêt de l'utilisation du CO₂ à la basse température.

A l'heure actuelle il n'existe pas de mélange à faible PRP et faible glissement de température adapté à ce type d'installation. L'utilisation de frigoporteur adapté, qui présente une perte de charge acceptable même à -40°C, peut devenir une manière d'utiliser des mélanges à glissement de température dans des systèmes indirects en froid positif et négatif dans l'industrie.

11.3.3 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LE RETROFIT DES INSTALLATIONS

Comme pour le remplacement du R-22, les rétrofits 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.

11.3.4 CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Les solutions long terme utilisant l'ammoniac ou l'ammoniac en cascade avec le CO₂ sont disponibles, énergétiquement efficaces, et validées par le marché. Les solutions à base de HFO manquent pour la basse température.

12 - TRANSPORT FRIGORIFIQUE

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).

12.1 CARACTERISTIQUES DES GROUPES

La plupart des engins de transport sous température dirigée en France, 89 %, utilisent un groupe frigorifique à compression de vapeur et évaporateur ventilé. Les groupes eutectiques, utilisés principalement pour la distribution de surgelés en colis par des véhicules légers à portillons représentent moins de 2,5 % du parc français. La cryogénie représente moins de 0,2% du parc.

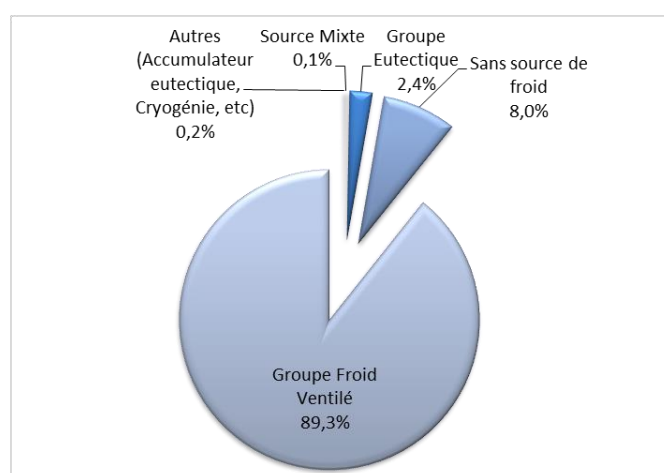


Figure 12-1 : La typologie des technologies du froid du parc d'engins sous température dirigée, France 2017

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.

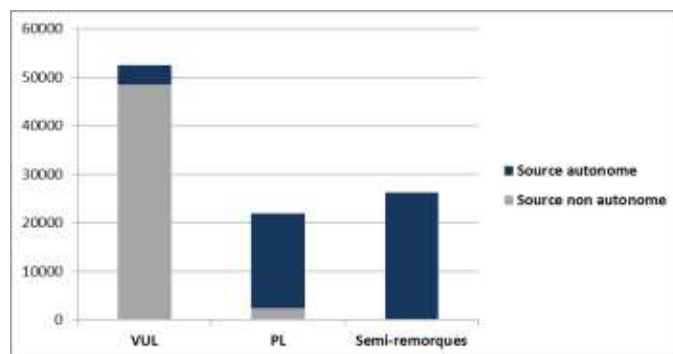


Figure 12-2 : L'autonomie du groupe de froid, France 2015

12.2 FLUIDES FRIGORIGENES DE REFERENCE

12.2.1.1 Nature de fluide

Actuellement, pour les puissances inférieures à 3 500 W, le R-134a est le fluide utilisé. Au-delà, le R-404A 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 conditions d'usage assez difficiles de ces équipements impliquent un taux de fuite de fluide frigorigène assez élevé.

12.2.1.2 Charge en fluide

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

Tableau 12-1 : Charges moyennes par type de véhicule

Technologie	Puissance frigorifique (à -20°C)	Charges moyennes (kg)
Poulie-moteur	500 à 3000W	1,6
Splits	2500 à 5500W	4
Groupe Autonome	6000 à 10000W	7

12.2.2 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LES EQUIPEMENTS NEUFS

12.2.2.1 Alternatives mises en œuvre

A court terme, tous les fabricants proposent des groupes à compression avec du R-452A comme fluide alternatif au R-404A.

Des essais comparatifs menés par le Cemafruid ont permis de valider les performances des groupes au R-452A. (Cf étude de cas chapitre 0,

Transport à température dirigée, p120).

Mais ces HFC sont, eux aussi, concernés par la réduction des utilisations imposée par la F-Gaz. Il existe différentes technologies de production de froid ne faisant pas appel aux groupes à compression de HFC à fort PRP. Elles sont brièvement présentées ci-dessous.

- 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 quinzaine d'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 ou CO₂ liquide. 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 est désormais disponible sur le marché. 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. Le poids du groupe est également un frein à son développement.

12.2.3 ANALYSE DES ALTERNATIVES EXISTANTES POUR LE RETROFIT DES INSTALLATIONS

12.2.3.1 Alternatives mises en œuvre

Les solutions alternatives pour les retrofit sont les mêmes que pour les engins neufs, à savoir le R-452A majoritairement.

12.2.4 ETUDE DE LA BANQUE SECTORIELLE 2016

Comme évoqué plus haut, l'illustration suivante démontre que le marché est en train de basculer du R-404A au R-452A depuis janvier 2018 pour les engins neufs.

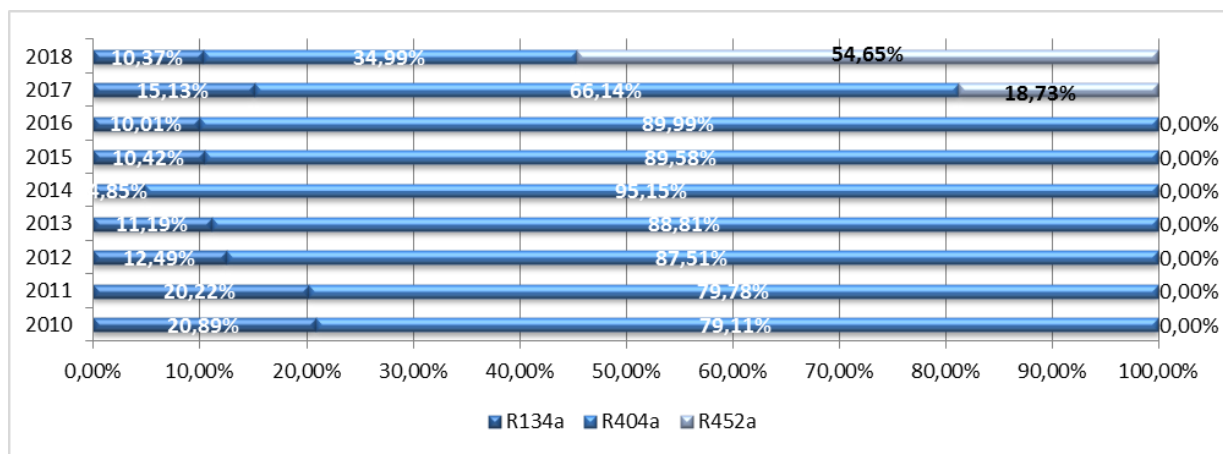


Figure 12-3 : Bilan des attestations ATP délivrées pour des engins neufs par type de fluide

Par contre, il y a encore très peu de rétrofit du R-404A vers du R-452A. Seuls 2,15% des engins en service sont rétrofités.

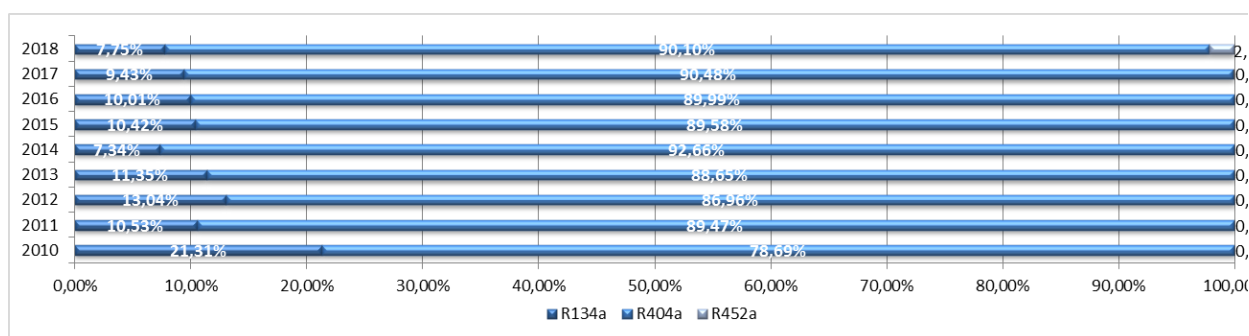


Figure 12-4 : Bilan des attestations ATP délivrées pour des engins en service par type de fluide

Au global, la banque de fluide est toujours dominée par le R-404A. Le R-452A, inexistant en 2016, prend rapidement du poids dans la banque globale. Les illustrations ci-dessous présentent la banque de fluide dans les groupes de transport frigorifiques en 2017 et 2018 (Données Cemafruid).

Tableau 12-2 : Quantité de fluide par année et par nature de fluide

Fluides frigorigènes	Quantité de fluide en (Kg) 2017	Quantité de fluide en (Kg) 2018
R-134a	11 417	11 160
R-404A	356 183	338 391
R-452A	13 990	381 68
Autres (R-410A et R-507A)	9 958	103 40
Total	391 548	398 059

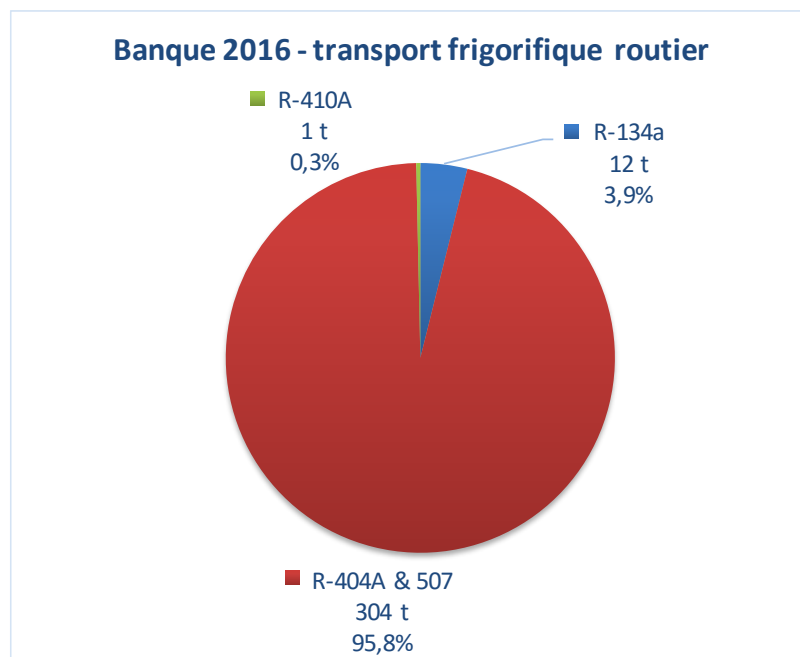


Figure 12-5 : Répartition des banques de fluide dans le transport en 2016 (*Barrault, 2016*), avant l'introduction du R-452A).

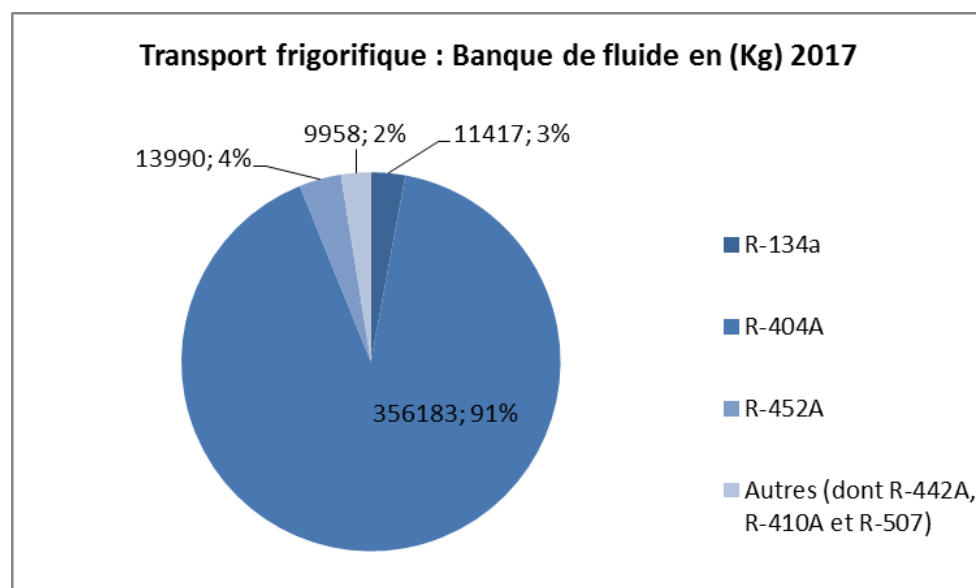


Figure 12-6 : Répartition des banques de fluide dans le transport en 2017 (source Cemafroid) et en 2016 (source Inventaires 2016, avant l'introduction du R-452A).

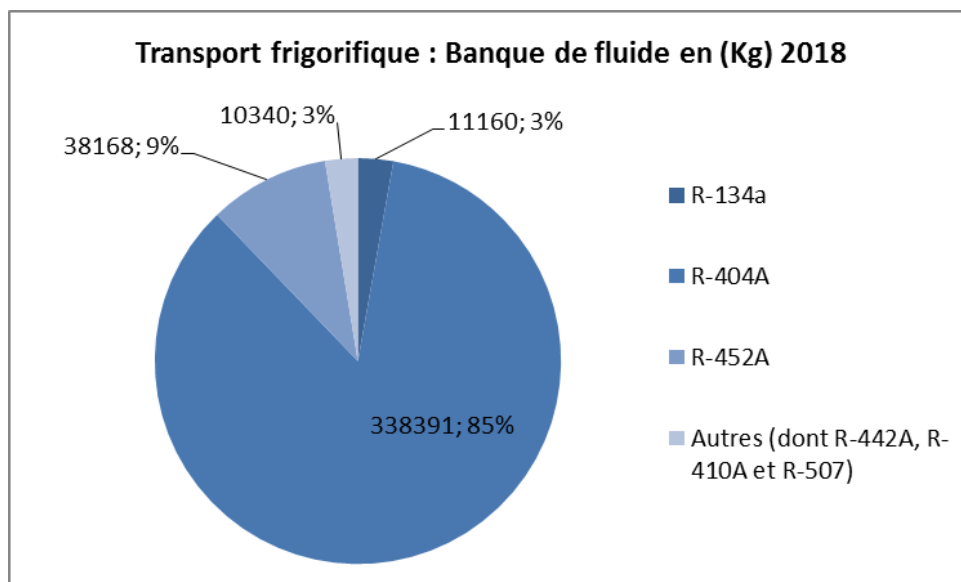


Figure 12-7 : Répartition des banques de fluide dans le transport en 2018

12.2.5 CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Les groupes frigorifiques au R-404A ne sont plus pertinents aujourd'hui. Les solutions au R-452A sont des alternatives à très court terme en attendant des solutions vertueuses et durables.

Dans la perspective d'une réduction de l'impact environnemental du transport frigorifique, le choix du CO₂ (R-744) comme fluide frigorigène semble intéressant. L'essayer serait pertinent même si le coût d'une telle solution reste 30 à 50% plus onéreuse qu'un groupe au R-404A, car le marché n'est pas suffisamment mature.

Tableau 12-3 – Bilan des alternatives aux HFC à fort PRP disponibles pour le transport routier

Fluides de référence	Solutions alternatives	+	-
R-404A	R-452A CO ₂	Efficacité similaire Faible PRP	PRP toujours élevé Toujours en développement, coût élevé et poids important Maintenance (transport à l'international)

13 - BILAN DES ETUDES DE CAS MIS EN ŒUVRE DE NOUVELLES OPTIONS ET RETOUR D'EXPERIENCE

13.1 RETROFIT DANS LA GRANDE DISTRIBUTION

Ce cas pratique porte sur une opération de retrofit de la centrale positive d'un hypermarché de 5300m² implanté dans l'Aude (11) où le R-442A est choisi en substitut du R-404A. L'objectif de cette étude est de mesurer l'impact du retrofit sur le fonctionnement et sur les émissions de GES de l'installation de froid positif de ce magasin. Les équipements frigorifiques sont instrumentés une semaine avant les travaux de retrofit et désinstrumentés une semaine après.

Aucun élément physique n'a été modifié lors des opérations de remplacement de fluide. Cependant, après l'étude, les buses des détendeurs ont été remplacées. C'est pour cette raison que dans ce chapitre les opérations de substitution du R-404A sont désignées par le terme de « retrofit » et non de « Drop-in ».

13.1.1 INSTRUMENTATION

Pour l'expertise, des moyens mobiles de mesure et d'enregistrement de données sont utilisés. Trois types d'instruments de mesure ont été utilisés :

- Des enregistreurs de température étalonnés programmés pour enregistrer la température mesurée toutes les 4 minutes.



Figure 13-1 : Enregistreur de température

- Des enregistreurs d'hygrométrie et de température programmés pour enregistrer l'humidité relative et la température mesurée toutes les 4 minutes.
- Analyseur de puissance, qui permet de mesurer et d'enregistrer les différentes propriétés du réseau électrique triphasé (tension, intensité et déphasage). Cet appareil permet de mesurer, grâce aux pinces ampère-métrique et à la mesures de tension, la puissance active et l'énergie absorbée par l'ensemble du système.



Figure 13-2 : Enregistreur de température et d'hygrométrie



Figure 13-3 : Analyseur de puissance

13.1.2 FIABILITE DE LA COMPARAISON

Le système étudié ne fonctionne jamais en régime continu ce qui empêche de comparer la puissance pré/post rétrofit. Le paramètre étudié est donc la consommation énergétique qui intègre les puissances et permet de comparer directement deux périodes identiques (par exemple plusieurs jours de fonctionnement). Cette consommation totale dépend également de la demande en énergie frigorifique.

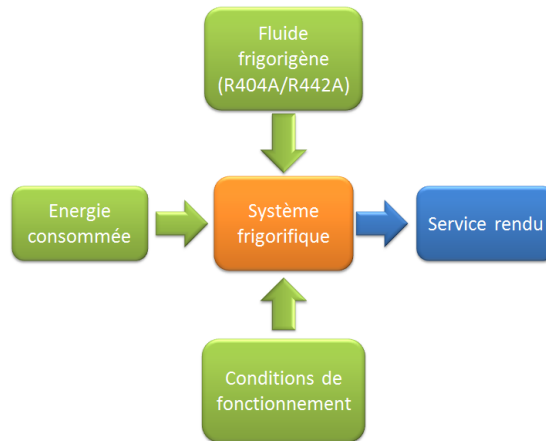
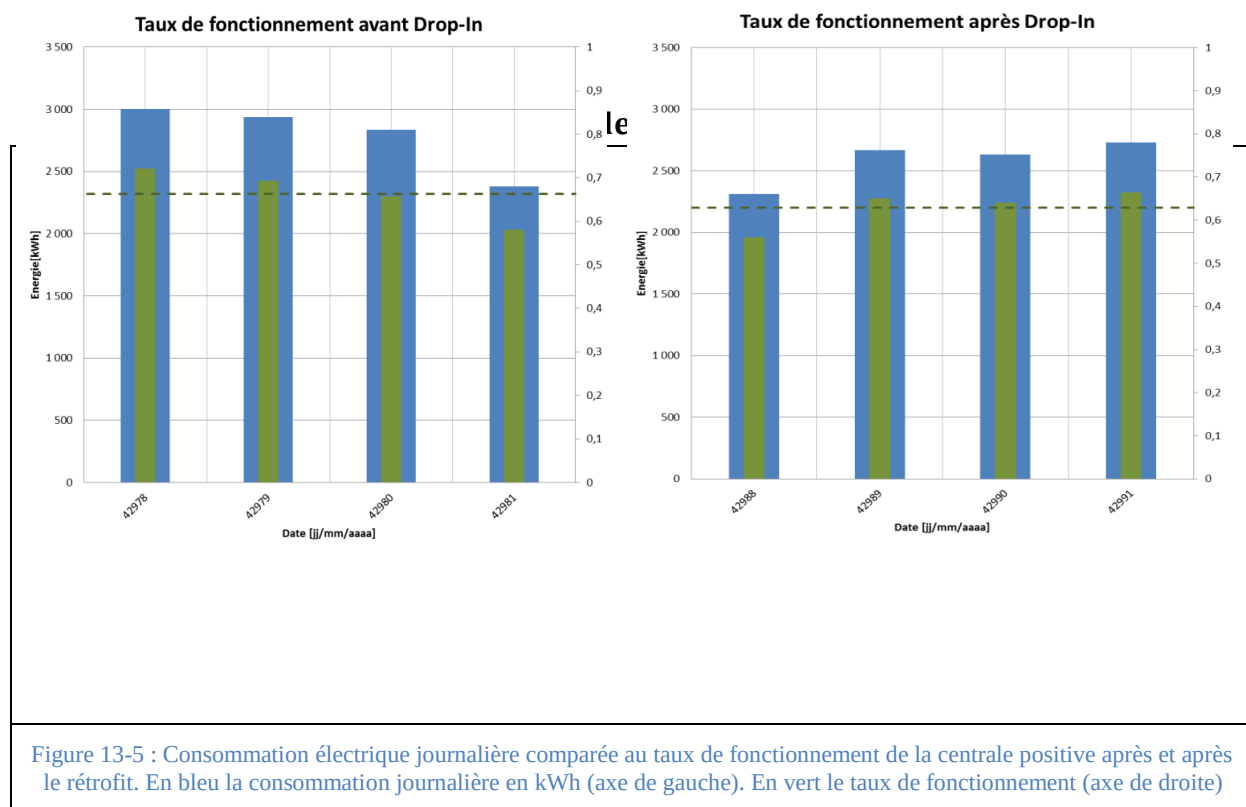


Figure 13-4 : Entrées/sorties du système frigorifique



Il ressort de cette comparaison une diminution du taux de fonctionnement journalier de la centrale de 66% à 63% au moment du rétrofit.

13.1.3.2 Analyse de la consommation de l'installation

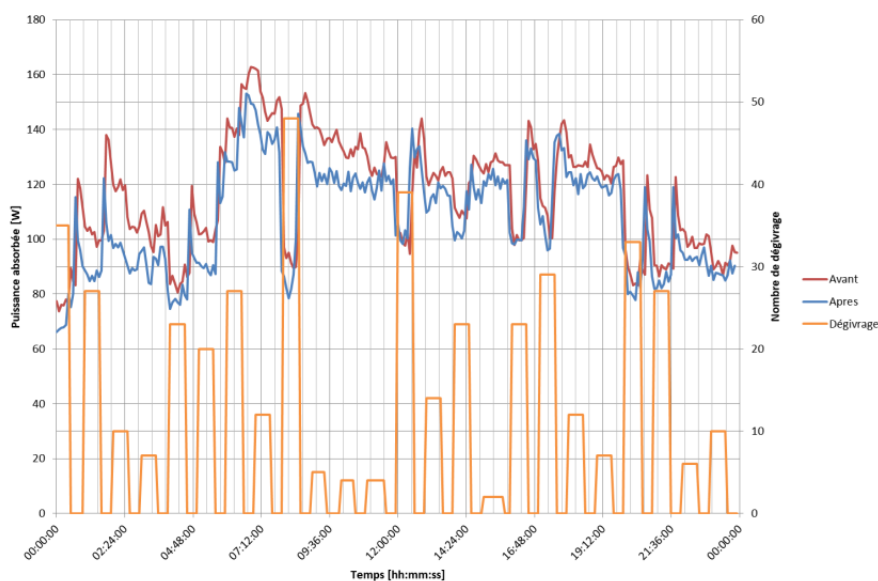


Figure 13-6 : Evolution de la puissance absorbée comparée aux horaires de dégivrage des centrales positive et négative

Les courbes sont relativement similaires car étroitement liées aux cycles de dégivrage et aux moments de la journée. L'analyse de la consommation journalière moyenne indique une diminution de 6,5% de la consommation journalière.

13.1.4 CONCLUSION DE D'ETUDE DE CAS

Il ressort de la comparaison avant/après retrofit que :

- Le temps de fonctionnement de l'installation est diminué de 3% par rapport à la situation initiale
- La consommation énergétique baisse de 6,5% par rapport à la situation initiale

Cette étude de cas a permis de valider qu'avec des moyens relativement simples, il est possible de comparer les performances d'une installation après changement de fluide.

13.2 TRANSPORT A TEMPERATURE DIRIGEE

13.2.1 INTRODUCTION

Le Cemafrroid a comparé les rapports d'essais de plusieurs groupes de transport pour déterminer l'impact du changement de fluide (R-404A / R-452A) en termes de puissance frigorifique délivrée et de COP.

13.2.2 LA NORME D'ESSAI

L'Accord International sur le Transport des denrées Périssable (ATP) définit la méthode d'essais pour mesurer les puissances frigorifiques des groupes de production de froid dans différents régimes de fonctionnement. Les consommations énergétiques associées sont également mesurées à ces régimes de fonctionnement, que ce soient des consommations électriques, de carburant (diesel), de dispositifs cryogéniques ou du couple fourni par un dispositif hydraulique. La mesure des débits d'air peut être réalisée simultanément. Ces essais nécessitent une ambiance contrôlée généralement à + 30 °C pour les essais répondant à l'ATP mais aussi à + 38 °C ou + 43 °C pour les conteneurs maritimes par exemple.

La puissance de chauffage maximale acceptable par le groupe en ajoutant les déperditions thermique du banc d'essais donne sa puissance à une température donnée. Des mesures peuvent également être réalisées à charge partielle par exemple suivant la norme européenne d'essai des groupes EN 16440-1.

13.2.3 LES MOYENS D'ESSAIS

La station d'essais officielle ATP du Cemafrroid, reconnue par les Nations Unies, réalise les essais d'engins de transport à températures dirigées neufs et en service. Les « tunnels climatiques » permettent en particulier de déterminer l'isothermie des enveloppes, les puissances et consommations des groupes frigorifiques de transport et l'efficacité des engins réfrigérants ou frigorifiques.

Le Tunnel climatique dans lequel sont réalisés les essais doit répondre aux exigences de l'ATP :

- Soufflage de l'air horizontal
- Vitesse d'air comprise entre 1 et 2 m/s à 10cm des parois de la caisse
- Régulation de la température (homogénéité spatiale et stabilité temporelle)



Figure 13-7 : Tunnel climatique d'essai pour groupe frigorifique de transport

13.2.4 RESULTATS

Les essais sont classés en 3 catégories selon le type de groupe :

- les groupes « Poulie-moteur »
- les groupes destinés aux porteurs
- les groupes destinés aux semi-remorques

Au total, les résultats de 70 essais sont compilés afin de connaître l'impact sur la puissance frigorifique et le COP du remplacement du fluide R-404A par du R-452A.

Les figures suivantes représentent l'évolution des performances de groupes lors du remplacement du fluide R-404A par du R-452A.

Les valeurs représentées sont les valeurs min et max de variation COP et de la puissance frigorifique par niveau de température par rapport au R-404A.

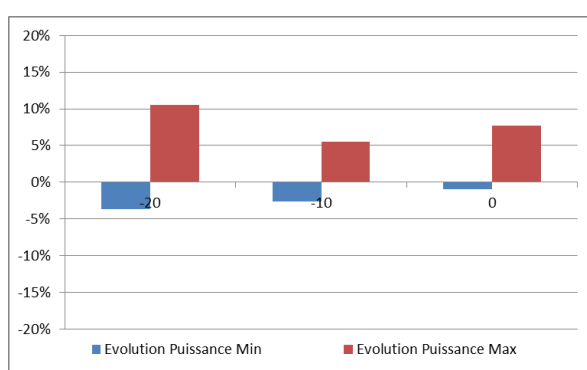


Figure 13-8 : Evolution des puissances frigorifiques des groupes lors du remplacement du fluide R-404A par du R-452A.

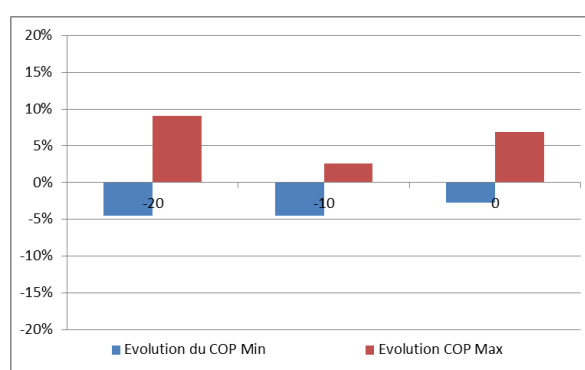


Figure 13-9 : Evolution des performances (COP) des groupes lors du remplacement du fluide R-404A par du R-452A.

Il ressort que l'utilisation du fluide R-452A est une alternative ayant des performances légèrement supérieure au R-404A à 0°C et légèrement inférieure au R404-A à basse température.

13.3 PERFORMANCE DES MEUBLES A GROUPE HERMETIQUEMENT SCHELLES

13.3.1 INTRODUCTION

Deux séries de meubles frigorifiques de vente à groupe hermétiquement scellés ont été testées au laboratoire du Cemafrroid pour comparer les performances des meubles au R-404A et au R-290. Les meubles étaient sensiblement identiques, avec les mêmes dimensions, la même surface d'exposition.

13.3.2 LA NORME D'ESSAI

La performance des meubles frigorifiques de vente est mesurée selon la norme internationale EN ISO 23953. Cette norme spécifie les exigences de construction, les caractéristiques et les performances des meubles frigorifiques de vente utilisés pour la vente et l'exposition de denrées alimentaires. Elle spécifie également les conditions d'essai et les méthodes pour contrôler que les exigences ont été satisfaites, ainsi que la classification des meubles frigorifiques, leur marquage et la liste de leurs caractéristiques devant être déclarées par le fabricant.

Les essais doivent respecter la procédure suivante :

- Instrumentation par thermocouple au cœur des paquets tests
- Mesure de la puissance absorbée par le meuble
- Fonctionnement pendant 24 heures stabilisé
- Ouverture de porte pendant 12 heures, chaque porte est ouverte:
 - 6 fois par heure pour les applications surgelées
 - 10 fois par heure pour les applications réfrigérées
- Extinction de l'éclairage et/ou mise en place du rideau de nuit pendant 12 heures.

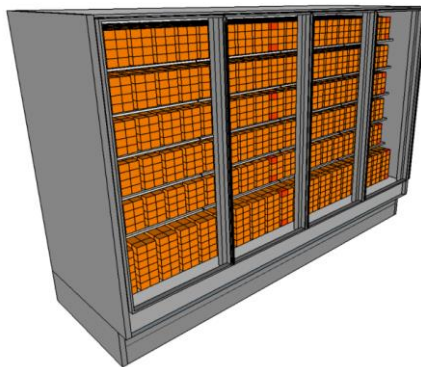


Figure 13-10 : Plan de charge d'un meuble frigorifique de vente

13.3.3 LES MOYENS D'ESSAIS

La cellule climatique dans laquelle sont réalisés les essais doit répondre aux exigences de la norme :

- Soufflage de l'air horizontal
- Vitesse d'air comprise entre 0,1 et 0,2 m/s $\pm 10\%$
- Choix des matériaux (gris clair) pour réduire l'émissivité des parois
- Eclairage 600 $\pm$ 100lx
- Régulation de la température
- Régulation de l'hygrométrie.



Figure 13-11 : Cellule climatique d'essai pour Meuble frigorifique de vente

La cellule permet de simuler l'ensemble des classes d'ambiance définies dans la norme et notamment la classe 3 (25°C, 60% HR) dans laquelle l'ensemble des essais ont été réalisés.

13.3.4 RESULTATS

Les résultats présentés portent sur :

- le respect de la classe de conservation du meuble
- la consommation d'énergie

La classe de température est associée à chaque meuble en fonction des températures maximum et minimum des paquets tests pendant l'essai.

Les classes de températures généralement visées par les fabricants sont la classe M1 pour les meubles positifs et L1 pour les meubles négatifs.

La consommation d'énergie d'un meuble est appréciée en utilisant les paramètres suivants :

- REC: Consommation journalière de réfrigération [kWh/24h]
- DEC: Consommation journalière des accessoires du meuble [kWh/24h]
- TEC: Consommation journalière du meuble (REC+DEC) [kWh/24h]
- SEC: Consommation journalière par mètre carré de surface d'exposition [kWh/m².24h]

Tableau 13-1 : Classes de températures

Classe	Température la plus élevée du paquet le plus chaud °C	Température la plus basse du paquet le plus froide °C	Température minimale la plus élevée °C
L1	-15		-18
L2	-12		-18
L3	-12		-15
M0	+4	-1	
M*	+6	-1	
M1	+5	-1	
M2	+7	-1	
H1	+10	+1	
H2	+10	-1	

La surface d'exposition étant la même pour chaque série de meubles, le tableau suivant ne présente que la consommation globale moyenne des meubles.

Tableau 13-2 : Tableau Comparatif des consommations journalières d'énergie de meuble à groupe hermétiquement scellés (R-404A / R-290)

Application	TEC R-404A [kWh/24h]	TEC R-290 [kWh/24h]	Ecart [%]
Positif	6,65	4,94	25%
Négatif	20,5	18,35	11,5%

Les essais dans des conditions normées démontrent une nette différence de consommation d'énergie en faveur des Meubles au R-290. L'écart est plus important pour les meubles positifs (écart de 24 à 28% environ par rapport à un meuble chargé au R-404A) que pour les meubles négatifs (écart de 8 à 15% environ par rapport à un meuble chargé au R-404A).

Par ailleurs, les meubles, au R-404A et au R-290, respectent tous la classe de température (M1 pour les positifs et L1 pour les négatifs).

14 - ETAT DES LIEUX SUR LES FORMATIONS AUX ALTERNATIVES

La mise en œuvre des alternatives aux HFCs à fort PRP se heurte à 2 enjeux majeurs :

- Développement des formations appropriées pour acquérir les compétences spécifiques à l'utilisation des fluides de substitutions
- la réglementation en vigueur laisse peu de place à l'utilisation des alternatives.

Le présent chapitre a pour objectif de faire le point sur les besoins en formation à l'utilisation des alternatives aux HFCs à fort PRP.

14.1 INTRODUCTION

La mise en œuvre de la F-Gaz a permis de faire monter en compétence les frigoristes sur des thèmes clés comme le confinement des installations et la manipulation des fluides (charge, récupération).

La recherche d'options alternatives à l'utilisation fluides frigorigènes à fort PRP a mené vers l'utilisation de fluides aux caractéristiques très différentes. En effet, l'utilisation de fluides naturels impose un savoir-faire particulier (les pressions de fonctionnement du CO₂ et la toxicité de l'ammoniac), il en va de même pour l'utilisation des hydrocarbures hautement inflammables. La conception de l'installation en est impactée, ainsi que la manipulation du fluide, les opérations de maintenance et d'utilisation du système. L'ammoniac est corrosif, modérément toxique, il impose donc d'autres contraintes. Les fluides inflammables tels que les hydrocarbures et, à moindre échelle, les HFO, imposent d'autres règles. Les précautions peuvent être liées à la sécurité, à la protection de l'environnement ou au maintien des performances des installations.

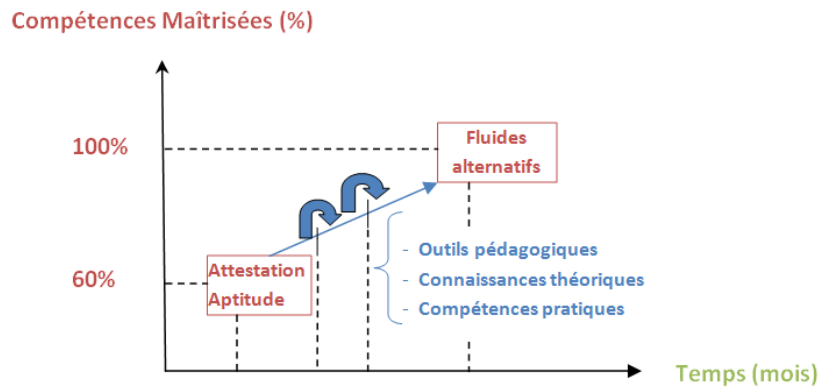
De plus, la technologie des installations a considérablement évolué pour répondre aux exigences de rationalisation de la consommation énergétique, avec une utilisation prégnante des outils de communication numériques.

La gestion prévisionnelle des emplois et des compétences (GPEC) doit être une priorité de la filière pour pérenniser le métier de frigoriste en s'appuyant sur des diplômes, certificats ou titres professionnels existants et la mise à jour des Référentiels Emploi / Activités / Compétences (REAC) du ministère du travail.

Calqués sur les exigences de la F-gaz, les référentiels doivent évoluer pour intégrer les nouvelles compétences et connaissances requises pour manipuler les fluides alternatifs :

- **Secteur Froid :**
 - MDF : Monteur Dépanneur Frigoriste (Niv V)
 - TIFCC : Technicien d'Intervention en Froid Commercial et Climatisation (Niv IV)
 - TIFI : Technicien d'Intervention en Froid Industriel (Niv IV)
 - TIFECF : Technicien d'Intervention en Froid et Equipements de Cuisine Pro (Niv IV)
- **Secteur Climatisation :**
 - MDC : Monteur Dépanneur en Climatisation (Niv V)
 - TICCSER : Tech Installateur Chauffage, Clim, Sanitaire, Energie Renouvelable (Niv IV)
 - AMECC : Agent de maintenance en Equipements de Confort Climatique (Niv V)
 - TMECC : Technicien de Maintenance en Equipements de Confort Climatique (Niv IV)
- **Secteur CVC :**
 - AMCV : Agent de maintenance CVC (Niv V)
 - TMCVC : Technicien de maintenance CVC (Niv IV)
 - TSMEC : Technicien Supérieur de Maintenance en Equipements Climatiques (Niv III)

Tableau 14-1 : Synoptique développement de compétences



14.2 LEGISLATION EUROPEENNE EN MATIERE DE FORMATION

L'Union Européenne a publié un rapport concernant la disponibilité des formations à la manipulation des fluides alternatifs aux HFCs, visant à satisfaire aux dispositions de l'article 21, paragraphe 6 du règlement F-gaz qui stipule ceci : «le 1er janvier 2017 au plus tard, la Commission publie un rapport examinant la législation de l'Union relative à la formation des personnes physiques à la manipulation sans danger de fluides frigorigènes de substitution visant à remplacer ou à réduire l'utilisation de gaz à effet de serre fluorés et soumet, le cas échéant, une proposition législative au Parlement européen et au Conseil visant à modifier la législation de l'Union pertinente.»

Outre la F-Gaz, un certain de directives européennes visent à garantir la manipulation en toute sécurité d'équipements ce qui impose implicitement, pour les équipements de réfrigération, que le personnel soit formé à la manipulation de fluides alternatifs :

- Directive 2014/68/UE sur les équipements sous pression
- Directive 2014/34/UE sur les atmosphères explosives (ATEX 95)
- Directive 99/92/CE concernant les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphère explosives
- Directive-cadre 89/391/CEE sur la sécurité santé au travail
- Directive 2014/35/UE Basse tension
- Directive 2014/30/UE compatibilité Electro magnétique
- Directive 2006/42/CE machine

Tous ces textes sont des directives et laissent donc aux états membres une certaine marge de manœuvre dans la mise en œuvre. Au contraire de la F-Gaz, ces directives ne prévoient aucune exigence minimale européenne particulière sur les fluides alternatifs aux HFCs, ni aucun système de certification obligatoire. Les employeurs sont dans l'obligation de tenir un registre du personnel formé, mais aucun rôle n'a été défini au niveau européen pour les organismes de certification en matière de réfrigération. L'absence d'obligation de certification européenne peut donner à penser qu'aucune exigence contraignante ne s'applique en matière de formation sur les substituts aux HFCs or ce n'est absolument pas le cas.

Par ailleurs, il est important de signaler que des exigences prescriptives en matière de formation et de compétences sont détaillées dans 2 normes EN qui s'appliquent au froid :

- EN378-4
- EN 13313

En conclusion, le rapport indique qu'un certain nombre de directives européennes imposent d'ores et déjà la fourniture de formation adéquate au personnel travaillant avec des fluides frigorigènes de substitution. Une prescription contraignante impose également aux employeurs de veiller à la formation du personnel pour se prémunir des risques de sécurité et santé au travail.

14.3 LES COMPETENCES CLES LIEES AUX FLUIDES SOUMIS A LA F-GAZ

Les opérateurs doivent obtenir une **attestation de capacité** délivrée par un organisme agréé pour chacun de ses établissements manipulant des fluides frigorigènes halogénés. L'attestation de capacité est délivrée pour une durée maximale de cinq ans après vérification, par l'organisme agréé, que l'opérateur remplit les conditions de capacité professionnelle prévue et qu'il possède les outillages appropriés.

L'outillage réglementaire, présenté ci-dessous doit faire l'objet d'une vérification périodique.

Tableau 14-2 : Synoptique parcours de formation

Catégories d'activité	Outillage obligatoire (Arrêté du 30 juin 2008)
Catégorie I	Station de charge et de récupération conforme à la norme NF EN 35421.
	Bouteilles de récupération par type de fluide.
	Détecteur de fuites conforme à la norme NF EN 14624.
	Raccords flexibles avec obturateur.
	Manomètres, thermomètre électronique et balance de précision 5%.
	Matériel de marquage.
Catégorie II	Station de charge et de récupération conforme à la norme NF EN 35421.
	Bouteilles de récupération par type de fluide.
	Détecteur de fuites conforme à la norme NF EN 14624.
	Raccords flexibles avec obturateur.
	Manomètres, thermomètre électronique et balance de précision 5%.
	Matériel de marquage.
Catégorie III	Station de charge et de récupération conforme à la norme NF EN 35421.
	Bouteilles de récupération par type de fluide.
	Manomètres et balance de précision 5%.
Catégorie IV	Détecteur de fuites conforme à la norme NF EN 14624.
	Manomètres et thermomètre.
Catégorie V	Station de charge et de récupération compacte ou en éléments séparés.
	Matériel de détection des fuites adapté aux systèmes de climatisation de véhicules.
	Thermomètre et balance de précision 5%.
	Tableau mis à jour des charges en fluide et en huile des véhicules.



L'attestation de capacité précise les types d'équipements sur lesquels l'opérateur peut intervenir ainsi que les types d'activités qu'il peut exercer. Les opérateurs **déclarent** à l'organisme qui leur a délivré l'attestation de capacité, chaque année n pour l'année civile n-1, les quantités de fluide HFC **acquises, chargées, récupérées, cédées**. Cette déclaration mentionne également l'état des stocks au 1er janvier et au 31 décembre de l'année civile précédente.

Les **personnes** qui procèdent sous la responsabilité de l'opérateur sont titulaires d'une **attestation d'aptitude** délivrée par un organisme certifié, correspondant aux **types d'activités** exercées et aux **types d'équipements** utilisés. En résumé, cela correspond à :

Tableau 14-3 : Attestation d'aptitude requise par domaine et par activité

	Réfrigération		Climatisation		Pompe à chaleur		Climatisation véhicules et engins	
	Tous	<2kg	Tous	<2kg	Tous	<2kg	Tous	<2kg
Contrôle d'étanchéité	I, II	I, II, IV	I, II	I, II, IV	I, II	I, II, IV	V	V
Entretien	I	I, II	I	I, II	I	I, II	V	V
Maintenance	I	I, II	I	I, II	I	I, II	V	V
Mise en service	I	I, II	I	I, II	I	I, II	V	V
Récupération	I	I, II, III	I	I, II, III	I	I, II, III	V	V

On estime aujourd'hui le nombre de professionnels disposant d'une attestation de capacité à 72000 personnes en France, dont 27000 en catégorie 1 et 37000 en catégorie V.

Les compétences professionnelles correspondant aux types d'activités exercées, aux types d'équipements utilisés et les conditions de délivrance de l'attestation d'aptitude sont précisées par l'arrêté du 29 février 2016 du ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer. L'arrêté définit les compétences, savoirs faire pratique (Test pratique) et connaissances (Test théorique) nécessaires à l'obtention de l'attestation d'aptitude.

Depuis le 1er janvier 2015, outre des connaissances techniques et une formation pratique sur les gaz à effet de serre fluorés, les techniciens certifiés doivent également disposer d'«informations sur les technologies pertinentes permettant de remplacer les gaz à effet de serre fluorés ou d'en réduire l'utilisation, et sur leur manipulation sans danger.» L'objectif est de fournir aux techniciens qui se forment à la manipulation des gaz à effet de serre fluorés certaines informations générales sur les propriétés des fluides frigorigènes de substitution (à savoir le CO₂, l'ammoniac, les hydrocarbures et les HFOs) et sur les caractéristiques des équipements conçus pour les utiliser. Le règlement ne prévoit pas d'exigences plus spécifiques en matière de formation en ce qui concerne les fluides frigorigènes de substitution (qui ne sont pas des gaz à effet de serre fluorés), puisque ceux-ci ne relèvent pas de son champ d'application.

14.4 LES COMPETENCES CLES LIEES AUX FLUIDES INFLAMMABLES

On entend par fluides inflammables, les hydrocarbures (A3) mais également les fluides faiblement inflammables (A2L) pour lesquels aucune qualification n'est obligatoire. Pour des raisons de sécurité évidente, les frigoristes manipulant des fluides inflammables doivent acquérir des connaissances sur les bonnes pratiques de manipulation de ces fluides, les limites de charges (NF EN 378), la rédaction d'analyse de risques (NF EN 378) et la réglementation ATEX (mécanique et électrique). Les frigoristes doivent également connaître l'outillage spécifique aux interventions sur les fluides hydrocarbures (manifold et groupe de transfert antidéflagrant).

14.5 LES COMPETENCES CLES LIEES AUX FLUIDES HAUTE PRESSION

On entend par fluide haute pression essentiellement le CO₂, pour lequel aucune qualification n'est obligatoire. Pour autant, les frigoristes intervenants sur des installations CO₂ doivent connaître les spécificités de ce fluide particulier rappelées ci-après :

- Propriétés thermodynamiques peu adaptées aux utilisations traditionnelles
- Limitation en basse température (point triple -56.6°C)
- Température critique +31 °C; 73.6 bars (à titre de comparaison R-404A à 72.1 °C; 37.3 bars) donc pas de condensation au -dessus du point critique
- Les applications traditionnelles mono et bi-étagées nécessitent des fonctionnements du compresseur en transcritique
- Pression de refoulement très élevée
- Conception des composants
- Problème de réintégration d'huile.

Le fluide opérant à des pressions supérieures à 85 bars, la maîtrise de la DESP et du CTP sont essentielles lorsque l'on manipule du CO₂.

14.6 LES COMPETENCES CLES LIEES AUX FLUIDES TOXIQUES

On entend par fluide toxique essentiellement l'ammoniac. L'arrêté du 16 juillet 1997 impose aux exploitants à veiller à la qualification professionnelle et à la formation sécurité spécifique pour son personnel. Le personnel peut être affecté à la conduite ou à la surveillance des installations frigorifiques (soumises à la rubrique 4735) ou susceptible d'intervenir sur celles-ci (Article 54).

Cette formation porte notamment sur des exercices pour se familiariser au port de l'appareil respiratoire isolant (ARICO) et sur les règles de mise en sécurité de l'installation en cas de fuite.

En complément les frigoristes doivent acquérir des connaissances sur la rédaction d'analyse de risques (NF EN 378).

Si l'usage de l'ammoniac s'étend à des installations non ICPE, les intervenants sur l'installation devraient être formés à la manipulation de ce fluide.

14.7 LES COMPETENCES CLES LIEES AUX MELANGES HFC/HFO

La plupart des fluides frigorigènes proposés à faible PRP, sont des mélanges de fluides qui présentent un glissement de température plus ou moins élevé. En particulier la sélection des compresseurs et évaporateurs ne se base plus sur la température d'évaporation (à pression constante) mais sur la moyenne des températures (entrée évaporateur – fin d'évaporation). Ce paramètre est à prendre en compte dans les logiciels de sélection des équipements dans le cadre de la conception d'installation neuve. Les prescripteurs et les personnels des BE spécialisés doivent être formés à la prise en compte des glissements de température dans la conception des installations.

En complément les frigoristes doivent acquérir des connaissances sur la rédaction d'analyse de risque (NF EN 378) du fait de leur faible inflammabilité.

14.8 SYNTHÈSE

Le Tableau suivant est une synthèse des besoins en termes de savoirs faire pratiques (Pratique : P) et de connaissances (Théorique : T).

Thématiques clés	HFC	HC (A3)	CO ₂	NH ₃	A2L*
Connaissances techniques	Inclus dans attestation d'aptitude	Spécificités techniques (P, T) Limite de charge (T)	Spécificités techniques (P, T)	Spécificités techniques (P, T)	Spécificités techniques (T) Limite de charge (T)
Étanchéité	Inclus dans attestation d'aptitude	pas de spécificités particulières	pas de spécificités particulières	pas de spécificités particulières	pas de spécificités particulières
Outillage	Inclus dans attestation de capacité	Manomètre spécifique Balance de précision Flexible long pour dégazer en dehors d'espace confiné	Manomètre spécifique (P) DéTECTEUR spécifique (P)	DéTECTEUR spécifique (P)	Groupe de transfert spécifique (P)
Récupération	Inclus dans attestation d'aptitude	Pas d'obligation réglementaire	Pas d'obligation réglementaire	obligation de récupération par une personne compétente (Arrêté du 16 juillet 1997)	pas de spécificités particulières
ATEX	Non	A3	Non	B2L	A2L*
DESP / Suivi en service ESP	Selon niveaux de pression				
EPI	Oui (déTECTEUR oxygène) (P)	Oui (déTECTEUR HC) (P)	Oui (déTECTEUR oxygène) (P)	ARICO obligatoire (P, T)	Oui (déTECTEUR oxygène) (P)
NF EN 378 (sécurité)	Oui				

* Classe A2L pas encore reconnue par la réglementation française sur les risques d'incendie.

14.9 ANNUAIRE DE FORMATION DISPONIBLES

L'AFF a rédigé un rapport intitulé : « **Formation à la manipulation des fluides dits « Naturels », Etat des lieux des besoins** » Ce rapport traite le sujet de la formation/développement de compétences pour l'utilisation du CO₂, du NH₃ et des hydrocarbures. Les besoins en formation ainsi que l'offre existante y sont détaillées pour chacune des technologies. L'aspect théorique et/ou pratique est également pris en compte.

Vous trouverez ci-dessous une liste de ces organismes ainsi que leurs coordonnées. Par ailleurs, les programmes de certaines formations sont en Annexe 1.

Tableau 14-4 : Coordonnées des centres de formation

Organisme	Adresse	Numéro de téléphone	Site internet
AFPA	Plusieurs centres de recherche sur le territoire métropolitain	/	https://www.afpa.fr/
Association de la Providence	146 Boulevard de Saint-Quentin, 80094 Amiens	03 22 33 77 77	http://www.la-providence.net/
Axima (GdF Suez)	Lille, Lyon, Marseille, Nantes, Strasbourg	03 88 19 19 41	https://engie-axima.fr/refrigeration/
Cemafroid	5 Avenue des Prés, 94260 Fresnes	01 49 84 84 84	http://www.cemafroid.fr/formation.htm
CFI Orly	5 Place de la Gare des Saules, 94310 Orly	01 41 76 00 70	https://www.cfi-formations.fr/
Coprotec	12 Impasse Montgolfier, 68127 Sainte-Croix-en-Plaine (Colmar)	03 69 28 89 00	http://www.coprotec.net/
Costic	Batiment 16, 102 Route de Limours, 78470 Saint-Rémy-lès-Chevreuse	01 30 85 20 10	https://www.costic.com/
INSA Lyon	20 Avenue Albert Einstein, 69100 Villeurbanne (Lyon)	04 72 43 83 83	https://www.insa-lyon.fr/
Institut Emmanuel d'Alzon	11 Rue Sainte-Perpétue, 30000 Nîmes	04 66 04 93 00	https://www.dalzon.com
Institut Français du froid Industriel	EPN01 292 Rue saint Martin 75141 Paris cedex 03	01 40 27 21 65	http://iffi.cnam.fr/formation-et-recherche-en-froid-industriel-climatisation-refrigeration-851197.kjsp
Johnson Controls	5, rue de l'hôtellerie Bat "Bel Air 3" 44 470 Carquefou	02 40 30 63 62	http://www.johnsoncontrols.com/fr_fr/buildings/our-solutions/training
Lezin Henri	Chemin de Ceinture, 82000 Montauban	05 67 21 09 22	www.lezin-formation.com/
Lycée Cantau	1 Allée de Cantau, 64600 Anglet	05 59 58 06 06	http://www.lycee-cantau.net/
Lycée Édouard Branly	2 Rue de la Porte Gayole, 62200 Boulogne-sur-Mer	03 21 99 68 00	http://lycee-branly.org/
Lycée Jean-Mermoz	717 Avenue Jean Mermoz, 34000 Montpellier	04 67 20 60 00	http://www.lycee-mermoz.net
Lycée La fontaine des eaux	8 Prom. de la Fontaine des Eaux, 22100 Dinan	02 96 87 10 00	http://www.lycees-dinan.fr/
Lycée La Martinière Monplaisir	41 Rue Antoine Lumière, 69008 Lyon	04 78 78 31 00	http://www.lamartinieremonplaisir.org/
Lycée Maximilien Perret / GRETA MTI	Place San Benedetto del Tronto 94140 Alfortville (Paris)	01 43 53 52 30	http://www.maxp.fr/
Matal Formation	40 Rue de la Poste, 44840 Les Sorinières (Nantes)	02 40 84 54 96	http://www.matal-formation.fr/
Profroid	178 Rue du Fauge, 13400 Aubagne	04 42 18 05 00	http://www.profroid.com/profroid/cms/7339/formations.dhtml
Université de Rouen-Normandie	1 Rue Thomas Becket, 76130 Mont-Saint-Aignan	02 35 14 60 00	http://www.univ-rouen.fr/
Université Grenoble Alpes	621 Avenue Centrale, 38400 Saint-Martin-d'Hères (Grenoble)	04 57 42 21 42	https://www.univ-grenoble-alpes.fr/

RÉFÉRENCES

Abdelaziz O [et al.] Alternative refrigerant evaluation for high ambient temperature environments: R-22 and R-410A alternatives for rooftop air conditioners [Report]. - [s.l.] : Oak Ridge National Laboratory for US Department of Energy, 2016.

Ademe Base carbone, Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone [Report]. - [s.l.] : Ademe, 2017.

AFCE Alternatives aux HFC à fort GWP dans les applications de réfrigération et de climatisation [Report]. - [s.l.] : AFCE, 2014.

AFF Formation à la manipulation des fluides dits « naturels » CO₂, NH₃, HC Etat des lieux et des besoins [Report]. - [s.l.] : AFF, 2014.

Ansar N [et al.] PROJET ICE-TEA: INNOVATION POUR UNE CHAMBRE D'ESSAI THERMIQUE A EFFICACITE AMELIOREE [Report]. - [s.l.] : Ademe, 2015.

Apra C [et al.] HFO-1234ze as Drop-in Replacement for R-134a in Domestic Refrigerators: An environmental Impact Analysis [Report]. - [s.l.] : Energy Procedia 101, 2016. - pp. 964-971.

Apra C, Greco A and Maiorino A An experimental investigation on the substitution of HFC-134a with HFO-1234yf in a domestic refrigerator [Report]. - [s.l.] : Therm. Eng 106, 2016. - pp. 959-967.

Arrighi M [et al.] Environmental impacts of carbon dioxide and dry ice production [Report]. - [s.l.] : EIGA, 2010.

Barrault S, Zoughaib A and Clodic D Inventaire des émissions de fluides frigorigènes – France et DOM COM - Année 2016 - Rapport Final [Report]. - 2016.

Barrault Stéphanie and Clodic Denis Inventaire des émissions de fluides frigorigènes – France et DOM COM - Année 2016 - Rapport Final [Report]. - 2015.

Bella B and Leportier Régis Glide Effect on Performance [Report]. - [s.l.] : Asercom, 2016.

Beshr M [et al.] A comparative study on the environmental impact of supermarket refrigeration systems using low GWP refrigerants [Report]. - Hangzhou, China : 11th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, 2014.

Bitzer Bitzer Software 6.8 [Report]. - 2018.

Bitzer Refrigerant report 13th edition A-501-13 [Report].

Bivens D Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons: Refrigeration [Report]. - [s.l.] : IPCC-TEAP Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System, 2005.

Chassecot M Résidentiel and light Commercial AC [Report]. - [s.l.] : Shecco, 2017.

- Chemours** Product Information (Chemour) [Report]. - [s.l.] : Chemour, 2016.
- Commision Européenne** Rapport de la commission concernant la disponibilité pour le personnel d'entretien de formations à la manipulation sans danger de technologie respectueuse du climat remplaçant les gaz à effet de serre fluorés ou en réduisant l'utilisation. [Report]. - 2016.
- Danfoss** Refrigerants from a Danfoss Perspective [Report]. - [s.l.] : Danfoss, 2018.
- Devin Eric** Les entrepôts et leur activité en 2012. Observation et Statistiques. Chiffres et statistiques. [Report]. - [s.l.] : Commissariat Général au Développement Durable, N° 334, 2012.
- Divers** Analysis of scientific literature [Report]. - [s.l.] : Divers, 1997-2002.
- Du L, Meszler D and Minjares R** HFC-134a Phase-out in the chinese light-duty motor vehicle sector [Report]. - [s.l.] : ICCT, 2016.
- Emerson** Transition des fluides frigorigènes en application du Règlement F-Gaz 517/2014 Quelques options ratiques sur la voie des systèmes CVACR de demain [Report]. - [s.l.] : Emerson, 2016.
- Emerson Copeland** Selection software 7.16 [Report]. - 2018.
- European Commission** Report from the Commission of 4.8.2017 assessing the 2022 requirement to avoid highly global warming Hydrofluorocarbons in some commercial refrigeration systems [Report]. - 2017.
- Fukuda S [et al.]** Low GWP refrigerant R1324ze€ and R1234ze(Z) for high temperature heat pumps [Report]. - [s.l.] : International Journal of Refrigeration, 2013.
- Grenelle Environnement** Chauffe-eau thermodynamiques en habitat individuels - Conception et dimensionnement [Report]. - [s.l.] : Règles de l'art Grenelle environnement 2012, 2015.
- Hashimoto K** Technology and Market Development of CO2 Heat Pump Water Heaters (ECO CUTE) in Japan [Report]. - [s.l.] : IEA Heat Pump Centre Newsletter. Vol 24. N°3, 2006.
- Hickman K** Reference List for low GWP Refrigerant testing [Report]. - [s.l.] : AHRI Low GWP AREP, 2013.
- Hughes J and Shah S** Testing of Low GWP Replacements for R-410A in Stationary Air Conditioning [Report]. - [s.l.] : Chemours / Internat R and AC Conference, 2016.
- IIF** Guideline for Life Cycle Climate Performance [Report]. - [s.l.] : IIF, 2015.
- IIR** Guideline for Life Cycle Climate Performance [Report]. - [s.l.] : IIF, 2015.
- IIR** Les progrès du froid dans les supermarchés [Report]. - [s.l.] : IIR Information, 2018.
- Ineris** Rapport Ineris: Etude de sécurité sur le remplacement des fluides frigorigènes [Report]. - [s.l.] : Ineris, 2017.
- IPCC** IPCC Fifth Assessment report [Report]. - [s.l.] : UNEP, 2014.
- IPCC** IPCC Fourth Assesment report [Report]. - [s.l.] : UNEP, 2007.

Kamada T, Haikawa T and Taira S Research on Optimization of Heat exchanger in Heat pump using R32 and HFO-mixed Refrigerant [Report]. - [s.l.] : Purdue University, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2016.

Kasai Kazushige and Johnson Phillip System Drop-in Test of R134a Alternative Fluids R-1234ze(E) and D4Y in a 200 RT Air-Cooled Screw Chiller [Report]. - 2013.

Kujak S and Shultz K Compositional Fractionation Studies of R410A Alternative R452B or DR55 and Their Impact on Flammability Behavior and Safety Implications [Report]. - [s.l.] : Purdue University, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2016.

KWT Pompes à chaleur jusqu'à 2000 kW [Report]. - 2015.

Lee H [et al.] LCCP evaluation on various vapor compression cycle options and low GWP refrigerants [Report]. - [s.l.] : International Journal of Refrigeration, 2016.

Leong CC The first CO2 refrigerant-based condensing unit to Jaya Grocer in Malaysia [Report]. - [s.l.] : Asia Atmosphere, 2017.

Llopis R [et al.] R-407H as drop-in of R-404A. Experimental analysis in a low temperature direct expansion commercial refrigeration system [Report]. - [s.l.] : International Journal of Refrigeration, 2017. - pp. 11-23.

Llopis, Sánchez and Cabello Experimental analysis of R-450A and R-513A as replacements of R-134a and R-507A in a medium temperature commercial refrigeration system [Journal] // International journal of refrigeration. - [s.l.] : ELSEVIER, September 2017. - 84.

Maina P and Huan Z A review of carbon dioxide as a refrigerant in refrigeration technology [Report]. - [s.l.] : South african journal of science, 2015.

Makhnatch P and Khodabandeh R The role of environmental metrics (GWP, TEWI, LCCP) in the selection of low GWP refrigerant. [Report]. - [s.l.] : The 6th International Conference on Applied Energy – ICAE2014, 2014.

Ministère de l'intérieur Guide M:Guide pratique relatif à la sécurité incendie dans les magasins de vente et les centres commerciaux [Report]. - [s.l.] : Ministère de l'intérieur, 2017.

Minor B, Shah S and Simoni L Testing of HFO Refrigerant with less than 150 GWP in a commercial freezer [Report]. - [s.l.] : 16th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, 2016.

Mota-Babiloni A, Makhnatch P and Khodabandeh R Recent investigations in HFCs substitution with lower GWP synthetic alternatives: focus on energetic performance and environmental impact [Report]. - [s.l.] : International Journal of Refrigeration, 2017.

Öko-Recherche Availability of alternatives to HFCs in commercial refrigeration in the EU [Report]. - 2016.

Pan Xuexin Panorama des industries agroalimentaires, édition 2012. [Report]. - [s.l.] : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt., 2012.

Papasavva Stella and Moonaw William Comparison between HFC-134a and Alternative Refrigerants in Mobile Air Conditioners using the GREEN-MAC-LCCP© Model

- [Report]. - [s.l.] : Purdue University, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2014.
- Pham Hung and Rajendran Rajan** R32 And HFOs As Low-GWP Refrigerants For Air Conditioning [Report]. - [s.l.] : International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, 2012.
- Rajendran R** Recent Development in refrigerants for air-conditioning and refrigerant system [Report]. - [s.l.] : Emerson, 1997-2000.
- Rajendran R** Refrigerant Update [Report]. - [s.l.] : Emerson, 2011.
- RPF** Rétrofit et fluides frigorigènes à glissement de température élevé [Report]. - [s.l.] : RPF, 2018.
- RPF** Sans stage, la profession se met en danger! [Report]. - [s.l.] : RPF n°1061, Décembre 2017, 2017.
- Sawalha S [et al.]** Field measurements of supermarket refrigeration systems. Part I: Analysis of CO2 trans-critical refrigeration systems. [Report]. - [s.l.] : Applied Thermal Engineering 87, 2015. - pp. 633-674.
- Sawalha S [et al.]** Field measurements of supermarket refrigeration systems. Part II : Analysis of HFC refrigeration systems and comparison to CO2 trans-critical. [Report]. - [s.l.] : Applied Thermal Engineering 111, 2017. - pp. 170-182.
- Sethi A and Yana Motta S** Low GWP Refrigerants for Air Conditioning and Chiller Applications [Report]. - [s.l.] : Purdue University, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2016.
- Sethi A, Pottker Gérald and Yana Motta S** Experimental evaluation and field trial of low global potential R-404A replacements for commercial refrigeration. Science and Technology for the built Environment [Report]. - [s.l.] : International Journal of Refrigeration, 2016. - pp. 1175-1184.
- Sethi A, Vera Becerra E and Yana Motta S** Low GWP R-134a replacements for small refrigeration (plug-in) applications [Report]. - [s.l.] : International Journal of Refrigeration, 2016. - pp. 64-72.
- Shah S** Testing of HFO Refrigerant With Less Than 150 GWP in a Commercial Freezer [Report]. - [s.l.] : Chemours 16th Internat R and AC at Purdue, 2016.
- Shecco** F-Gas Regulation is shaking up the HVAC and R industry [Report]. - [s.l.] : Shec co, 2016.
- Sutherland G and Burgos R** Research and Development Roadmap for Next-Generation Low Global Warming Potential Refrigerants [Report]. - [s.l.] : US Department of Energy, 2014.
- Tecumseh** Selection Program V4 [Report]. - 2018.
- Timmermans J** Refrigerant and cooling n renovation buildings [Report]. - [s.l.] : Daikin, 2017.

Tournus Equipement FLUIDE Réfrigérant R455A, GWP inférieur à 150 Amélioration des performances Sécurité [Report]. - [s.l.] : Tournus Equipement, 2017.

Tsamis K. M [et al.] Energy analysis of alternative CO2 refrigeration system configurations for retail food applications in moderate and warm climates [Report]. - [s.l.] : Energy conversion and Management 150, 2017. - pp. 822-829.

UNEP 2014 Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps technical options committee [Report]. - [s.l.] : UNEP, 2014.

Winter J Success with NH3/CO2 Cascade [Report]. - [s.l.] : Eurammon symposium, 2012.

ANNEXE 1

PROGRAMMES DE FORMATIONS EXISTANTES

La liste des organismes et modules de formation n'est pas exhaustive. Il existe d'autres organismes proposant des formations sur les thèmes des fluides alternatifs aux fluides à fort PRP. Nous nous sommes concentrés sur les formations dispensées en France.

Par ailleurs, certains des organismes cités ci-dessous proposent plusieurs formations sur les mêmes thèmes. Certains seront par exemple orientés sur la conception d'installation au CO₂, d'autres porteront sur la maintenance. Tous les modules existant ne sont pas reproduits ci-après, étant donné qu'il s'agit ici de présenter un aperçu des possibilités existantes ainsi que des types de formation proposées (pratiques/théoriques, courtes/longues...)

Les programmes présentés sont susceptibles de changer. Ils sont disponibles sur les sites internet des organismes de formation au début du mois de juin 2018.

Organismes	Thème	Titre de la formation	Durée
AFPA	NH ₃	Intervenir sur une installation à l'ammoniac (NH ₃) en toute sécurité	3 jours
AFPA	CO ₂	Intervenir sur une installation au CO ₂ en toute sécurité	2 jours
AFPA	Hydrocarbures	Manipuler des fluides frigorigènes hydrocarbures en toute sécurité	1 jour
Axima Réfrigération	CO ₂	Conduite et manipulation des installations CO ₂	2 jours
Axima Réfrigération	NH ₃	Conduite et manipulation des installations NH ₃	2 jours
Cemafruid	NH ₃	MG3 - Savoir conduire une installation à l'ammoniac (NH ₃ -R717)	7h
Cemafruid	CO ₂	MG4 - Savoir conduire une installation au CO ₂	7h
Cemafruid	Hydrocarbures	MG2 : Fluides « Naturels et alternatives au HFC	7h
CFI Orly	Hydrocarbures	FR36 – Manipuler des fluides frigorigènes propane et isobutane (R290 et R600a)	8h
CFI Orly	CO ₂	FRC02-1 Manipuler des installations au CO2 sub et transcritiques	14h
Coprotec	CO ₂ et NH ₃	T110-07 - Formation sur la réglementation des fluides naturels dans les installations de climatisation CO ₂ et Ammoniac	7h
Johnson Controls	CO ₂	Conduite et manipulation des installations CO ₂	2 jours
Johnson Controls	NH ₃	Habilitation Ammoniac NH ₃	2 jours
Johnson Controls	Hydrocarbures	Manipulation fluides frigorigènes R290, R600a	2 jours
Matal Formation	NH ₃	Perfectionnement et sécurité, qualification spécifique ammoniac (NH ₃)	3,5 jours
Matal Formation	CO ₂	Perfectionnement, sécurité, maintenance, optimisation (tous fluides), habilitation fluides fluorés	1 jour
Profroid	CO ₂	Formations pratiques	Plusieurs jours
Profroid	CO ₂	Formations théoriques	Plusieurs jours