



Inventaire des émissions de fluides frigorigènes pour la France métropole

Résultats 2020 et estimation provisoire 2021

Rapport AFCE

Juin 2022



Inventaire des émissions de fluides frigorigènes pour la France métropole

Résultats 2020 et estimation provisoire 2021
Juin 2022

<i>Rédaction</i>		
	<i>Nom, Fonction au sein du Citepa</i>	<i>Organisme</i>
<i>Rédacteur principal</i>	Stéphanie Barrault, Responsable de département	Citepa
<i>Contributeur(s)</i>	Vincent Mazin, Ingénieur d'études	Citepa

Pour citer ce document :

AFCE / Citepa, 2022. Inventaire des émissions de fluides frigorigènes pour la France métropole.
Résultats 2020 et estimation provisoire 2021

© Citepa 2022

Ce Rapport a été financé par l'AFCE (Alliance Froid Climatisation Environnement), sur la base de l'étude d'inventaire réalisée pour le compte du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE).

Pour obtenir des éléments contenus dans ce rapport :

AFCE
2, rue du phare de la Vieille 44 300 Nantes
<https://www.afce.asso.fr/> | dg@afce.asso.fr
Citepa
42, rue de Paradis - 75010 PARIS - Tel. 01 44 83 68 83
www.citepa.org | infos@citepa.org



SOMMAIRE - Rapport d'inventaire d'émissions de fluides frigorigènes - France métropole 2020

I.	APPROCHE UTILISEE.....	7
1.	INTRODUCTION	8
2.	PRINCIPES DE LA METHODE DE CALCUL	11
II.	RESULTATS TOTAUX 2020 – FRANCE METROPOLE	20
1.	PREAMBULE : LES EMISSIONS DE GAZ FLUORES PARMI LES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE	22
2.	EMISSIONS DE FLUIDES FRIGORIGENES - TOUS SECTEURS - FRANCE METROPOLE	23
3.	BANQUE TOUS SECTEURS FRANCE METROPOLE	26
4.	DEMANDE TOUS SECTEURS	27
5.	VERIFICATION DE COHERENCE	31
III.	SECTEUR 1 – LES APPLICATIONS DOMESTIQUES.....	34
1.	INTRODUCTION	35
2.	DONNEES ET HYPOTHESES – FROID DOMESTIQUE	36
3.	RESULTATS FROID DOMESTIQUE	41
IV.	SECTEUR DU FROID COMMERCIAL	44
1.	INTRODUCTION	45
2.	DONNEES ET HYPOTHESES.....	47
3.	RESULTATS	55
V.	SECTEUR DES TRANSPORTS FRIGORIFIQUES	60
1.	INTRODUCTION	61
2.	DONNEES ET HYPOTHESES.....	62
3.	RESULTATS	68
VI.	SECTEUR DU FROID INDUSTRIEL	73
1.	INTRODUCTION	74
2.	DONNEES ET HYPOTHESES.....	75
3.	RESULTATS	81
VII.	SECTEUR DES GROUPES REFROIDISSEURS A EAU (GRE).....	85
1.	INTRODUCTION	86
2.	DONNEES ET HYPOTHESES.....	87
3.	RESULTATS	92
VIII.	CLIMATISATION A AIR ET PAC AIR/AIR.....	96

1.	INTRODUCTION	97
2.	DONNEES ET HYPOTHESES.....	99
3.	RESULTATS	107
IX.	POMPES A CHALEURS REVERSIBLES	112
1.	INTRODUCTION	113
2.	DONNEES ET HYPOTHESES.....	113
3.	RESULTATS	117
XI.	CLIMATISATION MOBILE / CLIM AUTO.....	120
1.	INTRODUCTION	121
2.	DONNEES ET HYPOTHESES.....	122
3.	RESULTATS	131
XII.	ANNEXES	134
1.	PRG DU 4EME RAPPORT DU GIEC (AR4).....	135
2.	EMISSIONS DECLAREES POUR LE SECTEUR 2F1	136
3.	ACRONYMES ET ABREVIATIONS.....	137
4.	TABLE DES FIGURES	138
5.	TABLE DES TABLEAUX	142
6.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	145

I. Approche utilisée

1. Introduction

1.1 Contexte

Dans le cadre des engagements de la France au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), du Protocole de Kyoto et de l'amendement de Doha établissant la 2ème période d'engagement au Protocole de Kyoto (2013-2020), la France doit réaliser chaque année l'inventaire de ses émissions de gaz à effet de serre.

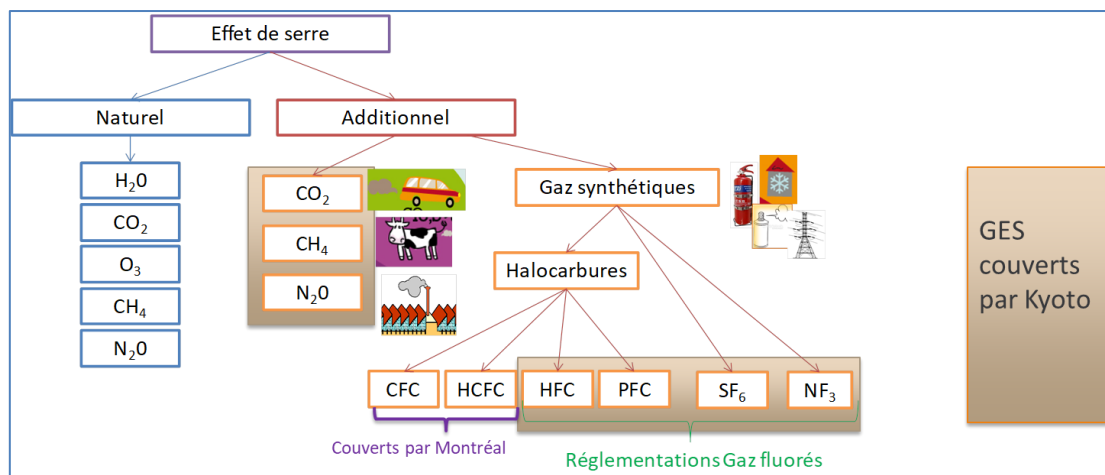


Figure 1 - Les gaz à effet de serre

Les substances inventoriées sont les sept gaz à effet de serre direct qui constituent le « panier Kyoto » : dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O), les deux familles de substances halogénées, à savoir les hydrofluorocarbures (HFC) et perfluorocarbures (PFC), l'hexafluorure de soufre (SF₆) ainsi que le trifluorure d'azote (NF₃). Dans le cadre de la France, les périmètres couverts sont la Métropole et l'ensemble des territoires d'Outre-mer pour la CCNUCC, la Métropole et les territoires d'Outre-mer inclus dans l'Union Européenne (UE) pour le Protocole de Kyoto.

Le Citepa, opérateur d'état, est mandaté par le ministère de l'Environnement depuis 2000 pour la réalisation des inventaires d'émissions de gaz à effet de serre (GES). Les inventaires de HFC pour les secteurs du froid et de la climatisation étaient, jusqu'aux inventaires 2016, réalisés par le CES de MINES-ParisTech. Depuis 2017, ces inventaires sont inclus dans la CPO (Convention Pluriannuelle d'Objectifs) reliant la DGEC (Division Générale de l'Energie et du Climat) du MTES au Citepa.

Dans le cadre de la reprise des travaux d'inventaire de gaz fluorés par le Citepa, la méthode de calcul des émissions de fluides frigorigènes a été revue, un nouvel outil a été développé, couplé à une base de données regroupant les données d'activité et de facteurs d'émissions concernant les équipements du froid et de la climatisation. La base de données France métropole a été progressivement reconstituée en collaboration avec des fédérations professionnelles, en traçant les sources et les hypothèses de façon à assurer les exigences de suivi et de transparence demandées par le reporting international.

Pour répondre aux besoins de la profession, l'AFCE a souhaité que le Citepa réalise un rapport dédié aux secteurs du froid et de la climatisation et couvrant l'ensemble des fluides frigorigènes, pas seulement les HFC soumis à déclaration. Ce rapport présente donc l'approche utilisée pour le calcul des émissions de fluides frigorigènes, les données et hypothèses par secteur et les principaux résultats

d'inventaire : émissions, banques et demandes en fluides frigorigènes. Les graphes présentent les résultats par famille de fluides frigorigènes de 1990 à 2020, l'estimation provisoire pour 2021, calculée à partir de données projetées est également présentée afin de palier l'écart entre la parution du rapport, contraint aux dates de soumission auprès des instances internationales, et l'année d'inventaire (2020).

1.2 Obligations réglementaires

Les inventaires d'émissions de fluides frigorigènes sont réalisés pour évaluer les émissions de HFC des secteurs du froid et de la climatisation, les HFC faisant partie des Gaz à Effet de Serre (GES) dont les émissions doivent être déclarées par la France à la CCNUCC (Convention Cadre des Nations Unies pour le Changement Climatique) et à la Commission Européenne (CE) dans le cadre de ses engagements internationaux. Chaque année, le Citepa réalise, pour le compte du MTE (Ministère de la Transition Ecologique) l'ensemble des inventaires d'émissions de GES et déclare auprès de la CCNUCC et de la CE les émissions de GES. Dans le cadre des HFC, la Figure 2 présente les données déclarées.

- Elles sont de deux types : les données d'activité et les émissions ;
 - o Les données d'activité requises sont, pour chaque HFC, les quantités chargées dans les nouveaux équipements, la banque, soit les quantités présentes dans les équipements formant le parc français et les quantités restant dans les équipements parvenant en fin de vie ;
 - o Les émissions sont décomposées en trois parties : les émissions à la charge, les émissions liées à la banque et émissions de fin de vie.
- Elles sont décomposées par HFC primaire : HFC-32, HFC-125, HFC-134a, HFC-143a et HFC-152a ; les HFC contenus dans les mélanges HCFC-HFC sont aussi déclarés, les HFO, en revanche, ne sont pas encore soumis à déclaration ;
- Elles sont regroupées en 6 grands secteurs d'activité :
 - o froid domestique,
 - o froid commercial,
 - o transport frigorifique,
 - o froid industriel incluant une partie des chillers,
 - o climatisation fixe, incluant la climatisation à air, les pompes à chaleur résidentielles et une partie de chillers,
 - o et climatisation embarquée incluant la climatisation automobile, celle des véhicules industriels, cars, bus, trains, métros.
- Une mise à jour des données déclarées est réalisée pour les années 1990 à l'année d'inventaire (ici 2020), à chaque édition d'inventaire.

Tables CRF

GREENHOUSE GAS SOURCE AND SINK CATEGORIES	Gas (please specify) <i>One row per substance</i>	ACTIVITY DATA			IMPLIED EMISSION FACTORS ⁽²⁾			EMISSIONS ⁽²⁾			
		Amount			Product manufacturing factor	Product life factor	Disposal loss factor	From manufacturing	From stocks	From disposal	Recovery ⁽²⁾
		Filled into new manufactured products	In operating systems (average annual stocks)	Remaining in products at decommissioning							
		(t)			%			(t)			
F. Product uses as substitutes for ODS											
1. Refrigeration and airconditioning											
Commercial refrigeration											
HFC-32	HFC-32	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO
HFC-125	HFC-125	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO
HFC-134a	HFC-134a	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO
HFC-143a	HFC-143a	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO
C3F8	C3F8	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO
Domestic refrigeration											
HFC-134a	HFC-134a	NO	1,28	NO	NO	0,30	NO	NO	0,00	NO	NO
Industrial refrigeration											
Transport refrigeration											
Mobile air-conditioning											
HFC-134a	HFC-134a	NO	16,33	NO	NO	8,33	NO	NO	1,36	NO	NO
Stationary air-conditioning											
HFC-32	HFC-32	NO	0,57	NO	NO	100,00	NO	NO	0,57	NO	NO
HFC-125	HFC-125	NO	0,62	NO	NO	100,00	NO	NO	0,62	NO	NO
HFC-134a	HFC-134a	NO	0,34	NO	NO	100,00	NO	NO	0,34	NO	NO
HFC-143a	HFC-143a	NO	0,09	NO	NO	100,00	NO	NO	0,09	NO	NO
C3F8	C3F8	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO

Figure 2 - Tables « CRF » (Common Reporting Format) ou mode de déclaration des émissions de HFC auprès de la CNUCC

Les « Implied Emission Factors » ne sont pas déclarés mais calculés automatiquement dans les tables. Ils sont utilisés par les « reviewers », experts mandatés par la CNUCC pour revoir les inventaires de chaque pays, afin de vérifier la cohérence des valeurs obtenues et comparer les niveaux entre les pays.

Il convient de souligner que si tous les pays européens sont soumis à la même obligation de déclaration des émissions de gaz fluorés, il n'y a pas d'obligation sur la méthode à adopter pour le calcul des émissions et les niveaux de précision peuvent varier fortement d'un pays à l'autre. La méthode utilisée par la France est particulièrement détaillée et vise à estimer les émissions de la façon la plus précise et réaliste possible. En particulier, elle :

- Utilise la méthode détaillée « Tier2a » recommandée par le GIEC pour le calcul des émissions des secteurs du froid et de la climatisation
- Prend en compte toutes les émissions au cours de la vie des équipements : à la charge, fugitives, à la maintenance, au retrofit, en fin de vie ;
- Utilise les données issues de la profession et collabore avec les fédérations de professionnels ;
- Prend en compte les obligations réglementaires mais s'appuie sur des retours de terrains pour traduire la réalité des pratiques et pour ne pas sous-estimer les niveaux d'émissions ;
- Tient compte des publications sur les taux d'émissions des équipements neufs mais prend également en compte la diversité des pratiques et performances sur le terrain, en incluant les dysfonctionnements et les pertes accidentelles qui peuvent pénaliser les moyennes.

Ce rapport doit être considéré comme un outil de travail pour améliorer l'évaluation des émissions de fluides frigorigènes. Il doit permettre de favoriser les échanges entre ceux qui réalisent l'inventaire des émissions de fluides frigorigènes et la profession, pouvant apporter ses données et retours d'expérience. Il se veut transparent sur les méthodes et hypothèses utilisées de façon à pouvoir améliorer chaque année les estimations en fonction des retours qui pourront être faits et des nouvelles sources de données qui seront communiquées.

2. Principes de la méthode de calcul

La réalisation de l'inventaire des HFC par le Citepa se fait dans la continuité de la méthode de calcul utilisée par le CES de MINES-ParisTech pour les inventaires d'émissions de fluides frigorigènes jusqu'en 2016, qui était basée sur les recommandations du GIEC [Références bibliographiques

Ref 1] et des travaux de thèse [Ref 2].

La prise en charge des inventaires de HFC par le Citepa a été l'occasion du développement d'un nouvel outil de calcul qui a permis de préciser la méthode de calcul utilisée par secteur et d'y apporter des améliorations telles que : la prise en compte de la variation de la charge nominale au cours du temps, de la variation de la durée à la suite des retrofits d'installation, d'introduire les compléments de charge à l'installation de certains équipements, etc. Le processus qualité utilisé par le Citepa pour l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre a été respecté.

Dans le cadre du développement de l'outil de calcul la base de données France métropole regroupant toutes les données d'activités (statistiques de marchés, caractéristiques techniques des équipements, les fluides frigorigènes) utilisées et les hypothèses de facteurs d'émission a été reconstituée. Elle a été structurée selon les grands secteurs précisés dans les rapports de référence RTOC de l'UNEP [3] et chaque secteur a été lui-même décomposé en plusieurs sous-secteurs ou application (Tableau 1), en fonction de la structure proposée par les fournisseurs de statistiques. Les références ont été revues et élargies, en apportant une transparence sur la reconstitution de l'historique et l'estimation des données manquantes. Les données statistiques ont été consolidées en collaboration avec des associations professionnelles par secteur, les hypothèses ont été basées sur les rapports du GIEC, de l'UNEP, de l'ADEME, les anciens rapports d'inventaire France et des avis d'experts.

Tableau 1 - Structure de la base de données des secteurs du froid et de la climatisation

Froid domestique	- Réfrigérateurs - Congélateurs - Caves à vin - Sèche linges thermodynamiques
Froid commercial	- Supermarchés - Hypermarchés - Petits commerces
Transport frigorifique	- Semi-remorques - Utilitaires - Part des conteneurs réfrigérés au niveau mondial - Part des navires réfrigérés
Climatisation à air	- Climatiseurs portables - Splits - windows - Multi-splits - Installations centralisées - VRV - Roof top - Autres équipements de climatisation
Pompes à chaleurs réversibles	- Air/eau - Eau/eau - Sol/sol - Sol/eau - Chauffe eaux thermodynamiques
Groupes refroidisseurs à eau	- A compresseur centrifuge - De forte puissance (> 350 kW) - De moyenne puissance (50 à 350 kW) - De faible puissance (< 50 kW)
Froid industriel	- Agroalimentaire - Procédés chimiques - Procédés pharmaceutiques - Production caoutchouc - Patinoires
Climatisation automobile	- Véhicules particuliers et utilitaires légers - Véhicules industriels - Cars et bus - Trains

Ce travail a été l'occasion de poursuivre la collaboration avec des organismes de professionnels comme le SNEFCCA et l'OFF de l'ADEME dans la vérification de la cohérence des données déclarées et calculées mais aussi d'élargir les échanges avec les homologues internationaux du Citepa à l'occasion des revues internationales et de conforter ou remettre en question certaines hypothèses.

Dans les déclarations d'inventaire auprès de la CNUCCC et de la CE, le secteur « froid industriel » est reconstitué en considérant que 2/3 des émissions des chillers lui sont attribuables. Le secteur « climatisation » inclut les émissions de la climatisation à air, des pompes à chaleur réversibles et 1/3 des émissions des chillers.

2.1 Approche de niveau 2a

La méthode de calcul est basée sur les recommandations données par les lignes directrices du GIEC pour la réalisation des inventaires d'émissions de gaz à effet de serre. Dans le cas des réfrigérants, si les informations nécessaires sont disponibles (données par sous-application et facteurs d'émission spécifiques), il est recommandé d'utiliser une approche de Niveau 2a, **approche détaillée, par facteur d'émission**. Cette méthode reconstitue la banque de fluides frigorigènes par application, soit les quantités de fluides présentes dans les équipements installés en France et formant le parc d'équipements. L'approche est dite « bottom-up », utilisant les données sur les marchés d'équipements, charges moyennes, fluides utilisés, durée de vie moyenne pour reconstituer le stock contenu dans les équipements puis calculer les émissions.

Aperçu des lignes directrices

La méthodologie de Niveau 2a :

Prend en compte l'élimination ou la diminution progressive des CFC et des HCFC dans le calendrier du Protocole de Montréal ou dans les réglementations nationales ou régionales, afin d'établir le choix fluide frigorigène pour toutes les applications ;

Définit la charge générale de fluide frigorigène et la durée de vie de l'équipement par sous application ;

Définit les facteurs d'émission pour la charge de fluide frigorigène, pendant le fonctionnement, la maintenance et la fin de vie.

Pour calculer les émissions au cours de la durée de vie de l'équipement, il est nécessaire de dériver le stock total de l'équipement indépendamment de leur année. En faisant cela, la banque de réfrigération est établie par sous application.

Afin d'obtenir une cohérence, il est suggéré de calculer le marché annuel des fluides frigorigènes à partir des quantités de fluides frigorigènes chargés dans l'équipement neuf et des quantités de fluides frigorigènes utilisés pour la maintenance du stock total d'équipements.

Figure 3 - Extrait des lignes directrices du GIEC 2006

Il est nécessaire de tenir compte :

- des émissions à la charge des équipements (E_charge) ;
- des émissions au cours de la durée de vie des équipements, issues des banques de fluides frigorigènes, pendant le fonctionnement et la maintenance des équipements, incluant les pertes accidentelles (E_duree-de-vie) ;
- des émissions de fin de vie, lors de la mise au rebut de l'équipement (E_fin-de-vie) ;
- des émissions liées à la gestion des conteneurs de fluides frigorigènes, notamment aux talons de charge résiduels (E_conteneurs).

$$E_{\text{Totales}} = E_{\text{charge}} + E_{\text{duree-de-vie}} + E_{\text{fin-de-vie}} + E_{\text{conteneurs}}$$

Les lignes directrices ne mentionnent pas les émissions liées au retrofit d'installations, qui peuvent être incluses dans les émissions au cours de la durée de vie.

Dans l'approche 2a, les facteurs d'émissions sont appliqués aux données d'activité. Leur estimation peut se faire de différentes façons, selon les données disponibles. Le GIEC met à disposition des gammes de facteur d'émissions pour les différents types d'émissions qui peuvent être utilisés en cas d'absence de facteur d'émission spécifique ou pour vérifier que les facteurs d'émissions nationaux entrent bien dans la gamme de valeurs recommandée.

2.2 Mise en œuvre de l'approche de niveau 2a

La figure suivante présente la méthode de calcul mise en œuvre dans l'outil Gaz Fluorés du Citepa, à partir des recommandations du GIEC pour une méthode de niveau 2a. Toutes les émissions au cours de la vie de l'équipement sont prises en compte. Les émissions sont calculées à partir :

- de paramètres permettant d'évaluer la donnée d'activité ;
- d'un facteur d'émission.

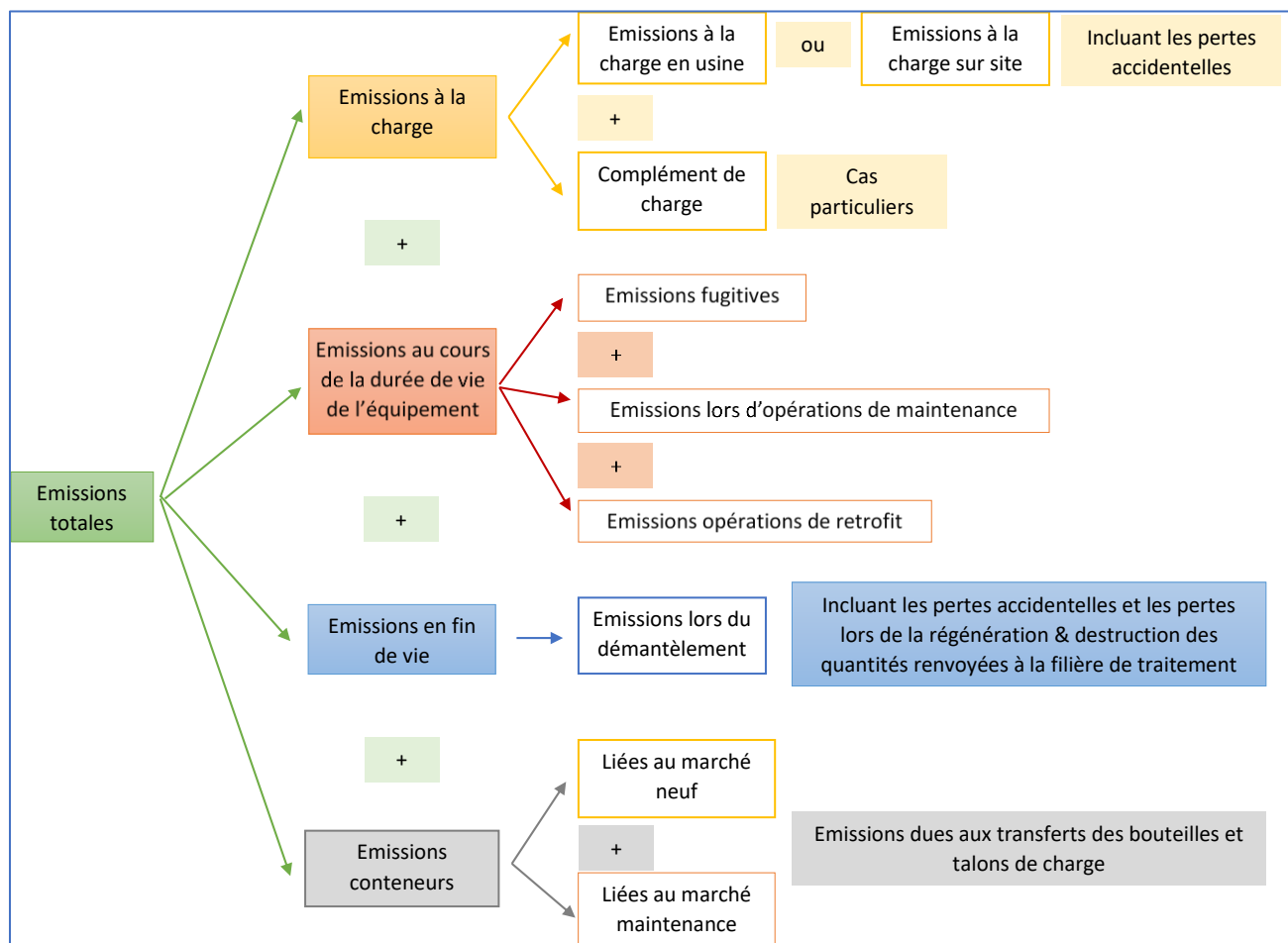


Figure 4 - Principes de la méthode de calcul des émissions de fluides frigorigènes

- **Les émissions à la charge** sont calculées relativement aux **quantités de fluides frigorigènes chargées dans les équipements neufs**. Celles-ci dépendent :
 - Des marchés d'équipements ou des productions d'équipements selon les lieux de charge propres à chaque équipement,
 - De la charge moyenne de l'équipement, celle-ci pouvant être calculée en fonction d'un ratio de charge et d'une valeur moyenne : le plus souvent un ratio par gamme de puissance (en kg/kW) et une puissance moyenne (en kW),
 - Du type de fluide frigorigène utilisé.

EQUATION 7.12
SOURCES DES EMISSIONS LORS DU CHARGEMENT DU NOUVEL EQUIPEMENT

$$E_{charge, t} = M_t \cdot \frac{k}{100}$$

Où :

$E_{charge, t}$ = émissions pendant le système de fabrication/assemblage au cours de l'année t , kg

M_t = quantité de HFC chargée dans le nouvel équipement au cours de l'année t (par sous application), kg

k = facteur d'émission des pertes d'assemblage du HFC chargé dans le nouvel équipement (par sous application), %

Figure 5 - Calcul des émissions à la charge (GIEC, 2006)

Les émissions à la charge dépendent du mode de charge des équipements :

- S'ils sont chargés en usine, le facteur d'émission est appliqué aux quantités chargées dans les équipements produits en France
- S'ils sont chargés sur site : le facteur d'émission est appliqué aux quantités chargées dans les équipements mis sur le marché français
- Dans quelques cas particuliers (type multi-splits et DRV en climatisation à air), les équipements chargés d'usine ont un complément de charge au moment de l'installation. Dans ce cas, le facteur d'émission est appliqué à la production mais aussi aux quantités supplémentaires ajoutées aux équipements mis sur le marché français.

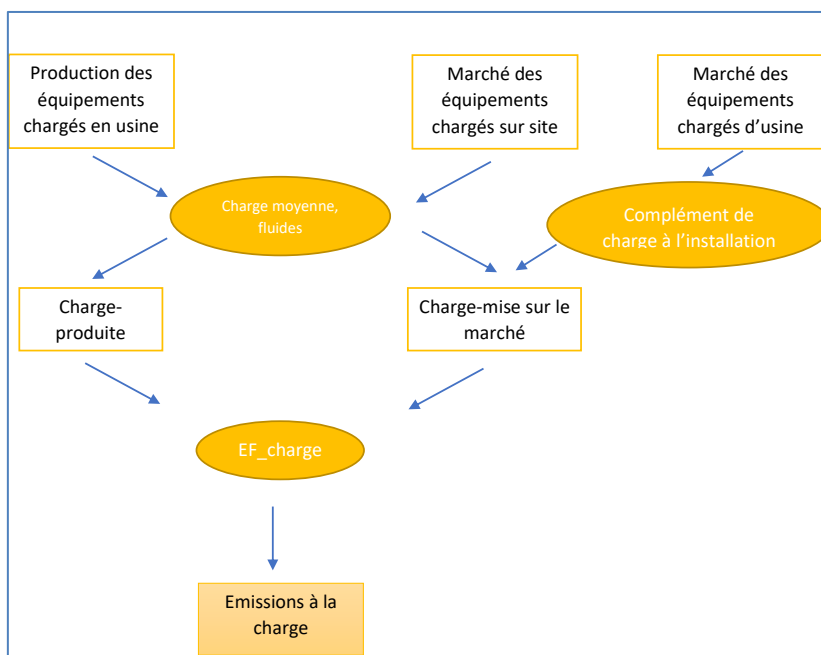


Figure 6 - Calcul des émissions à la charge

- Les **émissions au cours de la durée de vie** correspondent aux émissions **fugitives** au cours de la vie de l'équipement, elles sont rapportées à la **banque** de fluides frigorigènes, soit les quantités de fluides contenues dans les équipements formant le parc d'installations dépendant :
 - Des marchés d'équipements,
 - De la durée de vie des installations,
 - De la charge des équipements, celle-ci pouvant évoluer selon l'année de mise sur le marché,
 - Des fluides frigorigènes utilisés chaque année.

EQUATION 7.13

SOURCES DES EMISSIONS PENDANT LA DUREE DE VIE DE L'EQUIPEMENT

$$E_{\text{durée-de-vie}, t} = B_t \cdot \frac{x}{100}$$

Où :

$E_{\text{durée-de-vie}, t}$ = quantité totale de HFC émise pendant le fonctionnement du système au cours de l'année t ,
kg

B_t = quantité de HFC chargée dans les systèmes existants au cours de l'année t (par sous application), kg

X = taux d'émission annuel (c'est à dire, facteur d'émission) de HFC de chaque banque de sous application pendant le fonctionnement, prenant en compte les fuites moyennes annuelles et les émissions moyennes annuelles pendant la maintenance, %

Figure 7 - Calcul des émissions au cours de la durée de vie (GIEC, 2006)

Selon les modèles, des raffinements peuvent être apportés à cette méthode de calcul. Dans le cadre de l'outil Gaz fluorés développé au Citepa, la banque de fluides frigorigènes est calculée à partir des données de marchés d'équipements, en tenant compte de la variation de la charge, ou d'un ratio de charge au cours du temps, et de la durée de vie de l'équipement. Le modèle de la courbe de durée de vie développée dans la thèse de S.Saba [Ref 2] est utilisé de façon à introduire une évolution plus réaliste de la banque et des transitions de fluides frigorigènes, par application.

La maintenance est prise en compte de façon détaillée : la charge réelle de l'équipement est calculée au cours du temps et il est considéré qu'une opération de maintenance et une recharge de l'équipement ont lieu quand la charge réelle se trouve en deçà d'un seuil de bon fonctionnement. Les émissions lors des opérations de maintenance sont alors évaluées en tenant compte d'un facteur d'émission à la recharge de l'installation (et à la décharge, le cas échéant).

Les retrofits d'installations sont également pris en compte dans les émissions au cours de la vie des équipements en considérant que durant la période précédant une interdiction réglementaire d'usage de certains fluides frigorigènes, les installations qui ne parviennent pas en fin de vie sont en partie converties vers un autre fluide frigorigène (fluides de transition). Les hypothèses sont simplifiées et il est considéré qu'un retrofit prolonge en moyenne de 10 ans la durée de vie de l'installation.

- **Les émissions de fin de vie** correspondent aux émissions lors du démantèlement des installations : elles sont rapportées aux **quantités de fluides frigorigènes résiduelles** dans l'équipement lorsqu'il est démantelé. Celles-ci dépendent :
 - des quantités chargées dans les équipements neufs
 - de la durée de vie de l'équipement
 - du taux d'émissions fugitif qui va réduire la charge de l'équipement et impacter la charge résiduelle.

La charge résiduelle de l'équipement arrivant en fin de vie est calculée en fonction de l'âge de l'équipement et de sa charge réelle annuelle. Les double-comptes entre les émissions fin de vie et les émissions fugitives sont ainsi évités.

ÉQUATION 7.14
ÉMISSIONS DU SYSTEME DE FIN DE VIE

$$E_{fin-de-vie, t} = M_{t-d} \cdot \frac{p}{100} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{rec, d}}{100}\right)$$

Où :

$E_{fin-de-vie, t}$ = quantité totale de HFC émise dans le système de mise au rebut au cours de l'année t , kg

M_t = quantité totale de HFC chargée initialement dans les nouveaux systèmes installés au cours de l'année t ($t-d$), kg

Figure 8 - Calcul des émissions de fin de vie (GIEC, 2006)

- Enfin, les « **émissions conteneurs** » liées au transfert des fluides frigorigènes des conteneurs vers les bouteilles et à l'existence de talons de charge sont calculées à partir de la reconstitution du marché de fluide frigorigène nécessaire à la maintenance, à la production en France et à la charge des équipements mis vides sur le marché français.

EQUATION 7.11
SOURCES DES EMISSIONS ISSUES DE LA GESTION DES CONTENEURS

$$E_{conteneurs, t} = RM_t \cdot \frac{c}{100}$$

$E_{conteneurs, t}$ = émissions issues de tous les conteneurs HFC à l'année t , kg

RM_t = marché HFC pour le nouvel équipement et la maintenance de toutes les applications de réfrigération à l'année t , kg

c = facteur d'émission de la gestion de conteneurs HFC de l'actuel marché du fluide frigorigène, %

Figure 9 - Calcul des émissions conteneurs (GIEC, 2006)

2.3 Bilan des données nécessaires au calcul

L'ensemble des données d'activité et facteurs d'émissions récapitulées au Tableau 2, devront être consolidées, pour la période nécessaire au calcul d'inventaire de 1990 à 2020, pour chacune des 40 applications des 8 domaines du froid et de la climatisation pris en compte.

Tableau 2 - Données d'activité nécessaires par application et par an pour le calcul des émissions de réfrigérants

Type d'émission	Donnée d'activité	Paramètres dont dépendent les données d'activités
A la charge	Quantités chargées dans les équipements neufs	Marchés ou productions d'équipements selon mode de charge & charge moyenne & fluides utilisés
Durée de vie	Banque	Marchés d'équipements et fluides utilisés & Charge moyenne & durée de vie Caractéristiques de la maintenance et du retrofit
Fin de vie	Quantités contenues dans les équipements arrivant en fin de vie	Marchés d'équipement & Charge moyenne & durée de vie & mode de maintenance et taux d'émission fugitif (impactant la charge résiduelle)
Conteneurs	Marchés de HFC	Marché neuf, marché maintenance, marché retrofit

Les facteurs d'émissions sont, dans le cas de la France, généralement évalués par retour d'enquête de terrain et avis de fabricants et d'experts. Il convient de souligner que ces facteurs tiennent compte des pertes accidentelles. Si des données sont disponibles, les déclarations d'émissions sont étudiées de façon à prendre en compte les retours de terrain.

- Le facteur d'émission liée à la gestion des conteneurs est particulièrement difficile à estimer. Selon les lignes directrices, les émissions sont estimées entre 2 et 10 % du marché de fluide frigorigène. **Le facteur d'émission est actuellement considéré constant dans le calcul, égal à 3% sur toute la période d'inventaire.** Les talons de charge sont supposés égaux à 15 % de la demande. Il peut être ajusté selon les retours d'expérience des distributeurs de fluides frigorigènes.
- Le facteur d'émission à la charge de l'équipement varie, selon le GIEC 2006, entre 0,1 et 3 %, dépendant du mode de charge.
- Les facteurs d'émissions fugitives sont beaucoup plus variables : les lignes directrices du GIEC recommandent d'utiliser les données spécifiques au pays, basées sur les données fabricants, les enquêtes de terrain, les installateurs, opérateurs incluant, si nécessaire, les avis d'expert. Dans le cadre de la méthode de calcul développée, il est distingué :
 - les facteurs d'émissions fugitives incluant les pertes accidentelles sur le parc,
 - les facteurs d'émissions à la décharge et à la recharge de l'installation au cours des opérations de maintenance et de retrofit
 - les occurrences de maintenance sont évaluées en fonction de l'atteinte d'un seuil minimum de charge sauf pour les installations de charge élevée dont l'entretien est annualisé
 - les hypothèses de retrofit sont basées sur les échéances réglementaires.
- Les facteurs d'émissions de fin de vie dépendent de la mise en place ou non de filières de récupération et de bonnes pratiques souvent liées à l'existence de réglementations. Dans la pratique, la quasi-totalité du fluide devrait pouvoir être récupérée de l'équipement démantelé mais le facteur d'émission dépendra de la réalité du terrain : il n'est pas dépendant de l'équipement mais de la filière et de son efficacité.

Les valeurs des facteurs d'émissions, à la charge, fugitif et de fin de vie, pris en compte dans le calcul seront précisées dans la partie hypothèses de chaque secteur. Dans les lignes directrices du GIEC seuls quatre facteurs d'émissions sont définis : à la charge, de durée de vie, de fin de vie, conteneurs. Dans le cadre des inventaires français, une méthode détaillée permet d'évaluer plus précisément le facteur d'émissions de durée de vie, incluant les opérations de maintenance et de retrofit.

TABLE 7.9 (UPDATED) DEFAULT ESTIMATES ¹ FOR CHARGE, LIFETIME AND EMISSION FACTORS FOR REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING SYSTEMS						
Sub-application	Charge (kg)	Lifetimes (years) ²	Emission Factors (% of initial charge/year) ³		End-of-Life Emission (%)	
Factor in Equation	(M)	(d)	(k)	(x)	($\eta_{rec,d}$)	(p)
			At Time of Charge	Annual loss, Operating Lifetime	Recovery Efficiency ⁴	Initial Charge Remaining
Domestic Refrigeration	$0.05 \leq M \leq 0.5$	$12 \leq d \leq 20$	$0.2 \leq k \leq 1$	$0.1 \leq x \leq 0.5$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 80$
Stand-alone Commercial Applications	$0.2 \leq M \leq 6$	$10 \leq d \leq 15$	$0.5 \leq k \leq 3$	$1 \leq x \leq 15$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 80$
Medium & Large Commercial Refrigeration	$50 \leq M \leq 2000$	$7 \leq d \leq 15$	$0.5 \leq k \leq 3$	$10 \leq x \leq 35$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$50 < p < 100$
Transport Refrigeration	$3 \leq M \leq 8$	$6 \leq d \leq 9$	$0.2 \leq k \leq 1$	$15 \leq x \leq 50$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 50$
Industrial Refrigeration including Food Processing and Cold Storage	$10 \leq M \leq 10,000$	$15 \leq d \leq 30$	$0.5 \leq k \leq 3$	$7 \leq x \leq 25$	$0 < \eta_{rec,d} < 90$	$50 < p < 100$
Chillers	$10 \leq M \leq 2000$	$15 \leq d \leq 30$	$0.2 \leq k \leq 1$	$2 \leq x \leq 15$	$0 < \eta_{rec,d} < 95$	$80 < p < 100$
Residential and Commercial A/C, including Heat Pumps	$0.5 \leq M \leq 100$	$10 \leq d \leq 20$	$0.2 \leq k \leq 1$	$1 \leq x \leq 10$	$0 < \eta_{rec,d} < 80$	$0 < p < 80$
Mobile A/C	$5 \leq M \leq 6500$ (maritime) $10 \leq M \leq 30$ (railway) $4 \leq M \leq 18$ (busses) $0.5 \leq M \leq 2$ (other MAC)	$9 \leq d \leq 16$	$0.2 \leq k \leq 0.5$	$20 \leq x \leq 40$ (maritime) $5 \leq x \leq 20$ (railway) $10 \leq x \leq 20$ (other MAC)	$0 < \eta_{rec,d} < 50$	$0 < p < 50$
Source: ¹ UNEP RTOC Reports (UNEP-RTOC, 1999; UNEP-RTOC, 2003), Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (2009), Gallagher et al (2014), Umweltbundesamt (2015). For information on mobile A/C charge and mobile A/C emission factors for annual loss during operating lifetime: Schwarz and Rhiemeier (2007) and Gallagher et al (2014). ^{2,3} Lower value for developed countries and higher value for developing countries ⁴ The lower threshold (0%) highlights that there is no recovery in some countries.						

Figure 10 - Ordres de grandeur de la charge moyenne et des facteurs d'émissions par grand secteur (extrait lignes directrices 2019 du GIEC).

II. Résultats totaux 2020 - France métropole

1. Préambule : les émissions de gaz fluorés parmi les émissions de gaz à effet de serre

En 2020, les émissions de gaz fluorés (HFC, PFC, SF₆, NF₃) représentent 3,2 % des émissions de gaz à effet de serre de la France et les HFC représentent 3 %. D'un point de vue sectoriel, 85 % des émissions de gaz fluorés sont attribuables aux applications du froid et de la climatisation en 2020.

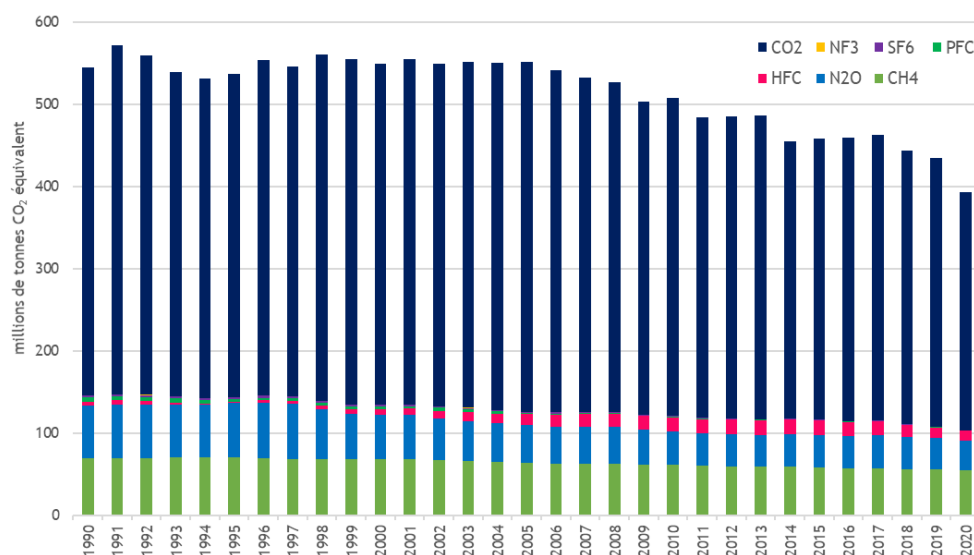


Figure 11 - Répartition des émissions de GES en CO₂ équivalent en France, périmètre Kyoto (France métropole & territoires d'outre-mer inclus dans l'UE). Source : Citepa, données Secten 2022.

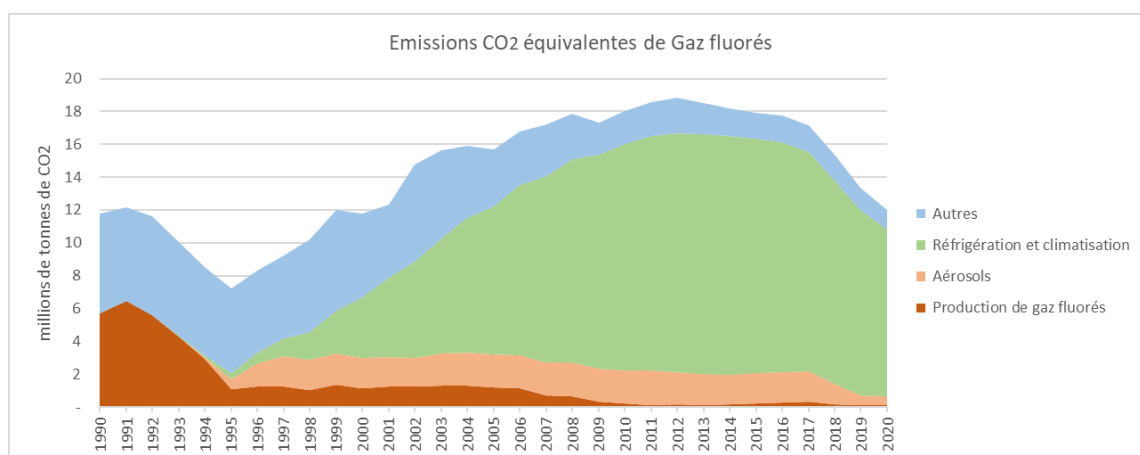


Figure 12 - Evolution des émissions de gaz fluorés (HFC, PFC, SF₆, NF₃) en France de 1990 à 2020, Périmètre Kyoto (France métropole et territoires d'Outre-mer inclus dans l'UE). Source : Citepa, rapport CNUCC 2022.

Les parties suivantes présentent les résultats du calcul d'inventaire 2021 des émissions de fluides frigorigènes, incluant les HFC, pour le total des secteurs du froid et de la climatisation en France métropole, pour les années 1990 à 2021, les valeurs étant pré-estimées et provisoires pour l'année 2021.

2. Emissions de fluides frigorigènes - tous secteurs - France métropole

2.1.1 Emissions totales

Les émissions de fluides frigorigènes de la France métropole, incluant les émissions à la charge, lors de la vie de l'équipement ainsi que lors de son démantèlement en fin de vie, sont estimées à 6 300 tonnes en 2020, en baisse de 4 % par an depuis 4 ans. Elles sont en décroissance, du fait de l'amélioration des pratiques, de l'amélioration de la formation des opérateurs, de l'efficacité grandissante des filières de fin de vie. La réglementation, les accords volontaires de la profession mais aussi la hausse des prix des HFC depuis quelques années ont également contribué à l'amélioration de la récupération des fluides frigorigènes et ainsi à la réduction des émissions.

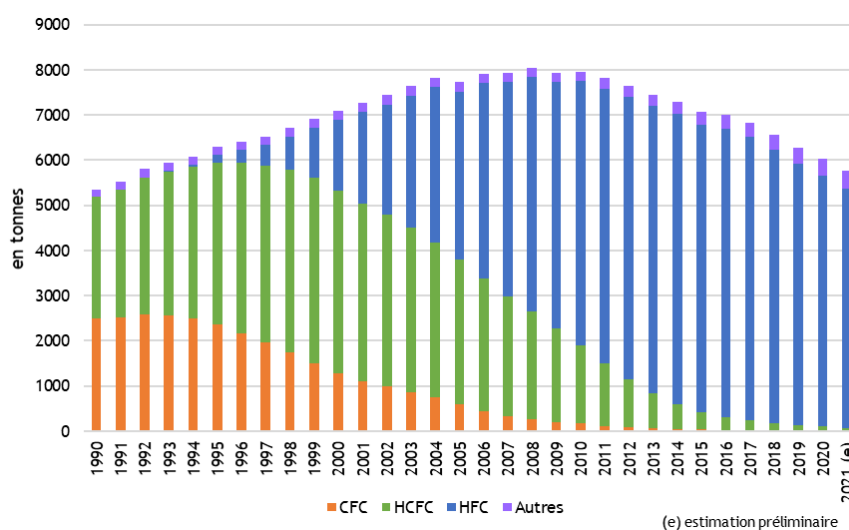


Figure 13 - Evolution en tonnes des émissions de fluides frigorigènes en France métropole (1990-2021)

Tableau 3 - Emissions 2020

Fluide frigorigène	2020 (en t)
R-11	1
R-12	18
Total CFC	19
R-22	83
Total HCFC	83
R-32	88
R-134a	2 363
R-404A	777
R-407A	40
R-407C	393
R-407F	92
R-410A	1 003
R-417A	13
R-422D	37
R-427A	9
R-448A	74
R-449A	83
R-450A	15
R-452A	29
R-454C	14
R-456A	14
R-507	19
R-513A	43
R-513B	14
R-1234yf	416
R-1234ze	13
Total HFC	5 548
R-290	3
R-600a	67
R-717	138
R-744	171
Total Autres	380
Total général	6 029

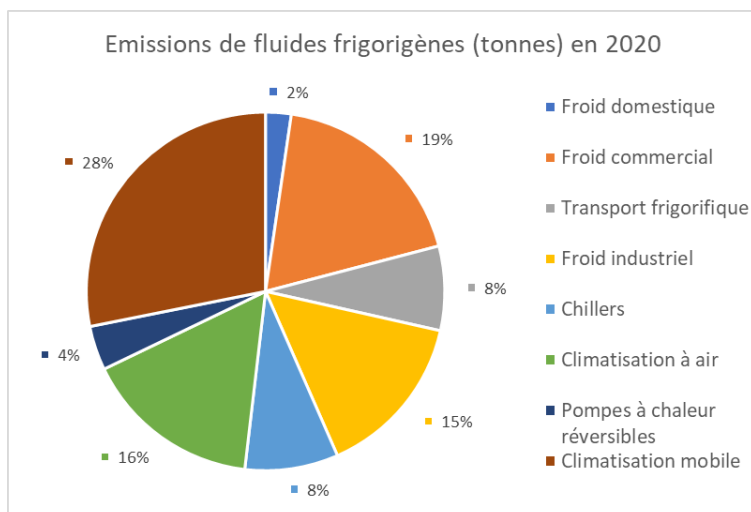


Figure 14 - Répartition sectorielle des émissions de HFC (exprimées en tonnes) en France métropole en 2020

Les émissions dominantes sont, à l'image de la constitution de la banque (Tableau 5), celles du R-134a (39 %), R-410A (17 %) et R-404A (13 %).

2.1.2 Emissions CO₂ équivalentes

En 2020, les émissions de fluides frigorigènes en France métropole sont estimées à 9,4 millions de tonnes de CO₂ équivalent dont 9,1 millions sont des émissions de HFC. Le calcul utilise les valeurs des PRG données par le 4^{ème} rapport du GIEC. Les émissions, en CO₂ équivalent, sont en forte décroissance ces cinq dernières années et ont diminué de 10 % entre 2019 et 2020. Plusieurs points expliquent cette décroissance, notamment :

- Le renouvellement du parc automobile, dont les émissions CO₂ équivalentes ont ainsi baissé de plus de 10% par an ces 3 dernières années ;
- L'approche de l'échéance 2020 d'interdiction d'usage des HFC de PRG supérieur à 2500 pour la maintenance des installations de réfrigération qui a conduit à l'accélération du renouvellement ou au retrofit d'installations de réfrigération utilisant du R-404A (PRG=3921) au profit d'installations utilisant des HFC avec un PRG inférieur à 1500;
- L'introduction progressive du R-32 (PRG = 675) à la place du R-410A (PRG=2087), avec une pénétration très rapide, bien avant l'échéance de 2025 pour certaines applications ;
- L'amélioration de la récupération du fait de l'augmentation des prix et de la pénurie de certains HFC à cause de la mise en place du « phasedown » par le règlement UE 517/2014.

Malgré la réduction de la banque de R-404A de près de moitié entre 2015 et 2020, les émissions du froid commercial restent dominantes (Figure 16), en équivalent CO₂, et représentent un quart des émissions CO₂ équivalentes de fluides frigorigènes, car les émissions fugitives de R-404A et celles se produisant au cours des retrofits sont encore importantes. La climatisation arrive en deuxième place, notamment si on considère l'ensemble du secteur incluant la climatisation à air, les pompes à chaleur réversibles et 1/3 des chillers. La part du froid industriel est plus faible grâce à l'usage répandu de l'ammoniac (dont la part a été revue à la hausse cette année à la suite de l'enquête de terrain dans le secteur agroalimentaire). Grâce au renouvellement du parc automobile vers des véhicules équipés d'un système de climatisation au R-1234yf (PRG = 4), les émissions de la climatisation automobile ne représentent désormais que 17 % (Figure 16) des émissions CO₂ équivalentes de fluides frigorigènes de la France métropole en 2020 alors qu'elles pèsent pour 28 % des émissions totales en tonnes (Figure 14).

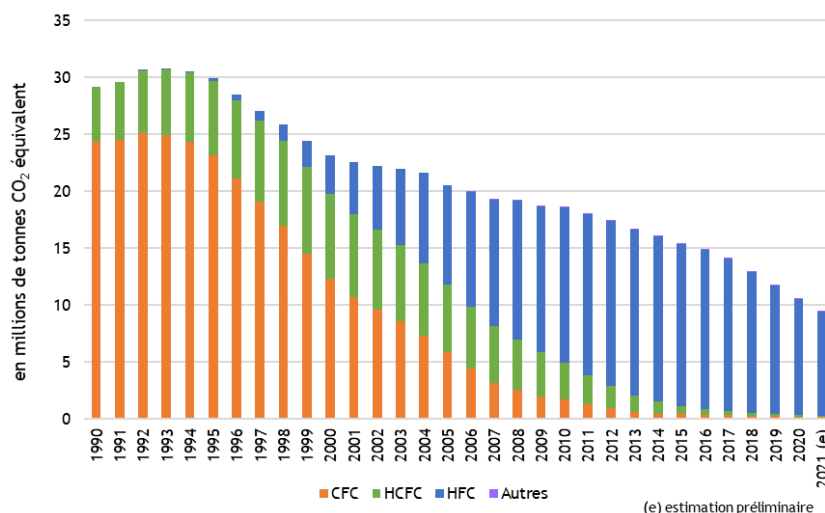


Figure 15 - Evolution, en tonnes de CO₂ équivalent, des émissions de fluides frigorigènes en France métropole

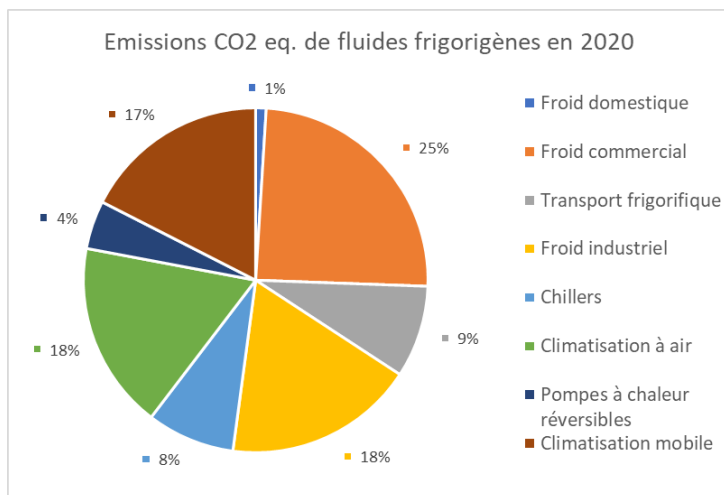


Figure 16 - Répartition sectorielle des émissions CO₂ équivalentes de fluides frigorigènes en France métropole en 2020

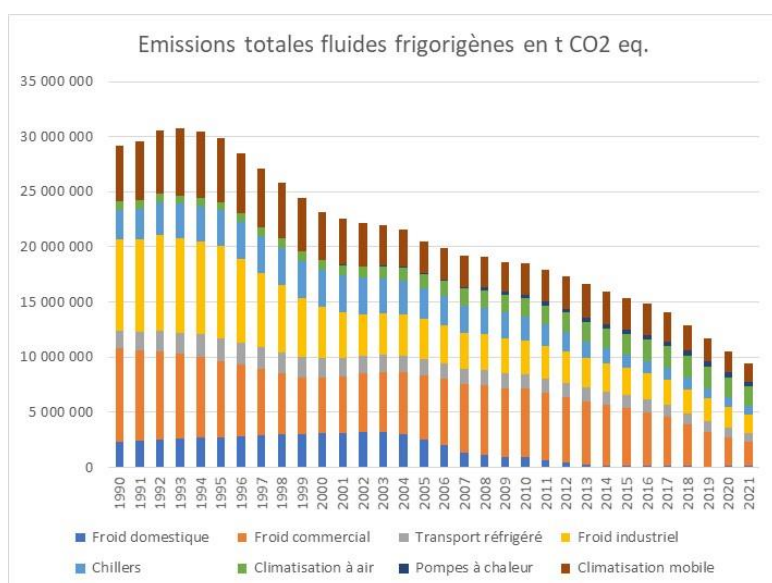


Figure 17 - Evolution des parts sectorielles des émissions CO₂ équivalentes de fluides frigorigènes

Tableau 4 - Emissions CO₂ eq. 2020

Fluide frigorigène	2020 (milliers de tonnes)
R-11	2
R-12	172
Total CFC	174
R-22	107
Total HCFC	107
R-32	95
R-134a	3 066
R-404A	2 406
R-407A	82
R-407C	587
R-407F	173
R-410A	2 028
R-417A	23
R-422D	78
R-427A	16
R-448A	135
R-449A	227
R-450A	13
R-452A	77
R-454C	3
R-456A	12
R-507	48
R-513A	34
R-513B	11
R-1234yf	2
R-1234ze	0
Total HFC	9 116
R-290	0
R-600a	0
R-744	0
Total Autres	0
Total général	9 398

3. Banque tous secteurs France métropole

La banque totale de fluides frigorigènes en France métropole atteint 59 000 tonnes en 2020 et est, à 88 %, composée de HFCs. La banque est assez stable depuis 2012, avec cependant une croissance légèrement plus marquée depuis 2018, de 1% par an, essentiellement due à la croissance du marché de la climatisation à air.

La banque résiduelle de HCFC est liée principalement au transport maritime (60 %), qui est traité au niveau international, à la climatisation à air et aux pompes à chaleur réversibles.

Le fluide dominant la banque est le R-134a, à 30% en 2020. Le secteur le plus utilisateur reste la climatisation automobile, à plus de 50%, le renouvellement du parc vers des véhicules utilisant le R-1234yf n'étant encore que partiel (environ 1/3 du parc renouvelé).

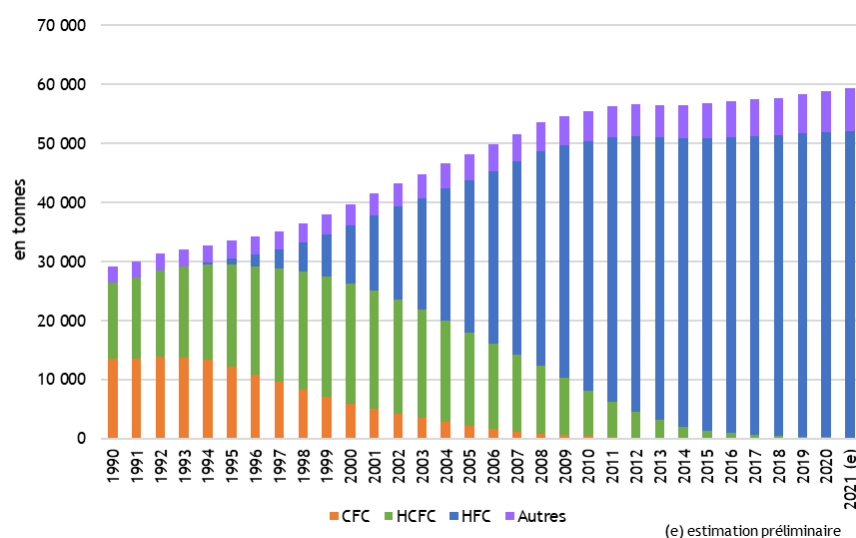


Figure 18 - Evolution de la banque totale de fluides frigorigènes en France métropole

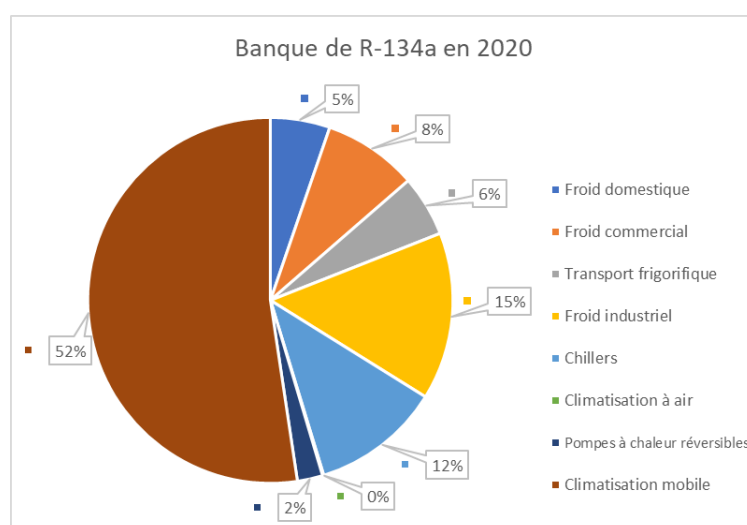


Figure 19 - Répartition sectorielle de la banque de R-134a en 2020 en France métropole

Tableau 5 - Banque 2020

Fluide frigorigène	2020 (en t)
R-11	3
R-12	48
Total CFC	52
R-22	194
Total HCFC	194
R-32	1 882
R-134a	17 672
R-404A	4 604
R-407A	239
R-407C	3 496
R-407F	463
R-410A	15 581
R-417A	134
R-422D	464
R-427A	155
R-448A	362
R-449A	472
R-450A	113
R-452A	239
R-454C	76
R-456A	69
R-507	75
R-513A	207
R-513B	69
R-1234yf	5 115
R-1234ze	177
Total HFC	51 664
R-290	216
R-600a	2 569
R-717	3 323
R-744	851
Total Autres	6 960
Total général	58 869

Le R-410A est le deuxième fluide frigorigène prédominant, à 26 %. Il n'est quasiment utilisé qu'en climatisation : à 70 % pour la climatisation fixe, 10 % pour les chillers et 20 % pour les pompes à chaleur réversibles.

Au total, la banque de HFC, représente près de 52 000 tonnes et est dominée (Figure 20 - Répartition sectorielle de la banque de HFC en France métropole en 2020.) par la climatisation mobile et la climatisation à air dont les parcs d'équipements sont en forte croissance. Lors de cette édition d'inventaire, une enquête de terrain en froid industriel a montré une tendance à une sous-estimation de la part de l'ammoniac dans les hypothèses des précédentes études d'inventaire. Une correction a été apportée, ce qui fait apparaître la part du froid industriel désormais réduite à 11 %. En équivalent CO₂, la part de la climatisation automobile est réduite à 15 % grâce au renouvellement du parc automobile vers des systèmes utilisant le R-1234yf. En climatisation à air, en revanche, le renouvellement du parc au R-410A est encore à ses débuts, ce qui fait apparaître la climatisation à air comme la banque CO₂ équivalente la plus importante. Le froid commercial représente une banque CO₂ équivalente encore significative, la banque résiduelle de R-404A étant estimée à plus de 2000 tonnes en 2020.

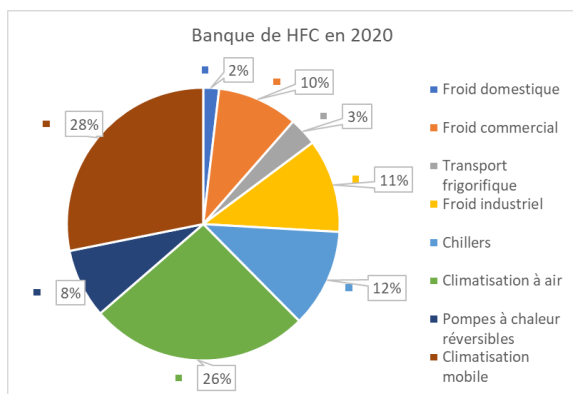


Figure 20 - Répartition sectorielle de la banque de HFC en France métropole en 2020.

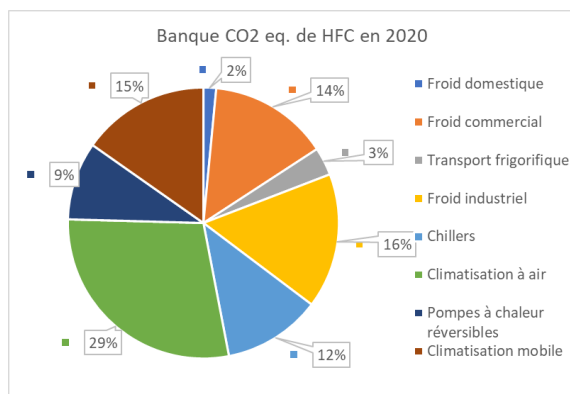


Figure 21 - Répartition sectorielle de la banque équivalente CO₂ de HFC en France métropole en 2020

4. Demande tous secteurs

Cette partie présente la demande totale équivalente au besoin en fluides frigorigènes pour la production, la charge, la maintenance et le retrofit des installations de froid et de climatisation en France. La demande totale est établie à partir des besoins estimés et tient compte des talons de charge supposés équivalents à 15% de la demande. A noter, une partie de cette demande peut être satisfaite par le marché des régénérés ou par le recyclage direct de fluides frigorigènes récupérés par les opérateurs lors des opérations de maintenance.

4.1 Demande totale

La demande totale en fluides frigorigènes est évaluée à 7 800 tonnes pour l'année 2020, dont 6 800 tonnes de HFC. Un tiers de la demande totale concerne le R-134a dont la moitié est due à la maintenance des installations. La part des non fluorés est en légère croissance mais représente seulement 12 % de la demande totale en 2020.

Malgré les besoins pour la maintenance des installations, la demande totale en HFC à fort PRG est en forte décroissance (-24 % pour le R-404A, -37 % pour le R-407C, - 15 % pour le R-410A, -40 % pour le R-422D, etc. Entre 2019 et 2020). Parallèlement, la demande en HFO augmente (+30 % pour le R-1234ze, +1 % pour le R-1234yf) ainsi que pour les mélanges de transition (+94 % entre 2019 et 2020 sur l'estimation des marchés cumulés de R-448A, R-449A, R-450A, R-452A, R-454C, R-456A).

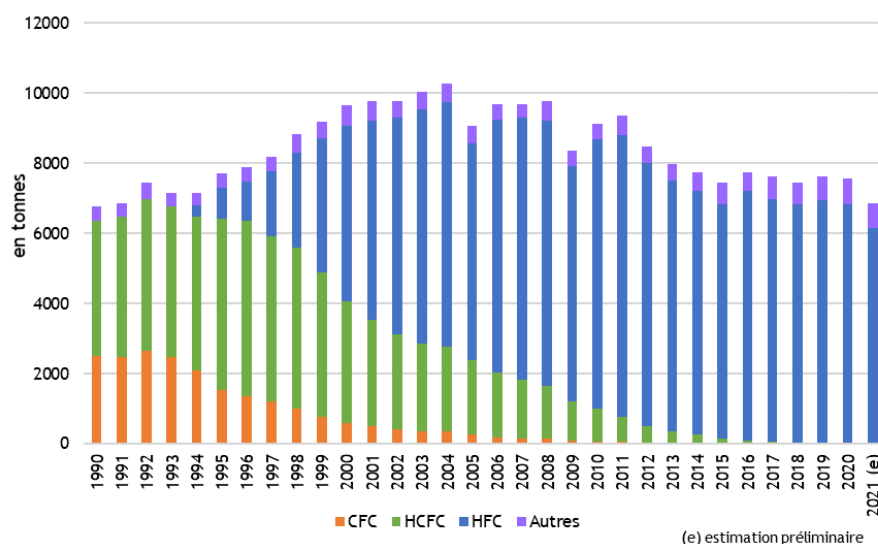


Figure 22 - Demande totale en fluides frigorigènes pour la France métropole

La demande en CFC/HCFC correspond à un besoin estimé par le calcul pour la maintenance des équipements résiduels contenant encore ces fluides frigorigènes. C'est une demande non satisfaite pour des équipements assez étanches qui pourraient ne pas avoir été renouvelés. Cette demande est marquée d'une forte incertitude et dépend des hypothèses de calcul.

La demande totale estimée à partir des besoins pour la production en France, la charge des équipements neufs sur site, le retrofit et la maintenance des installations, en tenant compte des talons de charge, peut être comparée aux marchés déclarés. La Figure 27 présente l'évolution des marchés déclarés au SNEFCCA et la demande totale reconstituée par le calcul Citepa.

Tableau 6 - Demande 2020

Fluide frigorigène	2020 (en t)
R-12	5
Total CFC	5
R-22	17
Total HCFC	17
R-32	370
R-134a	2 263
R-404A	728
R-407A	31
R-407C	143
R-407F	237
R-410A	905
R-417A	16
R-422D	39
R-427A	11
R-448A	405
R-449A	222
R-450A	69
R-452A	128
R-454C	76
R-456A	21
R-507	21
R-513A	62
R-513B	21
R-1234yf	859
R-1234ze	179
Total HFC	6 807
R-290	14
R-600a	8
R-717	319
R-744	374
Total Autres	716
Total général	7 545

4.1.1 Besoin pour les équipements neufs

La demande pour les équipements neufs est constituée par :

- le besoin pour les équipements pré-chargés produits en France (Figure 23) sur laquelle il y a une forte incertitude liée à la confidentialité des données ;
- le besoin pour la charge sur site des équipements installés en France (Figure 24).

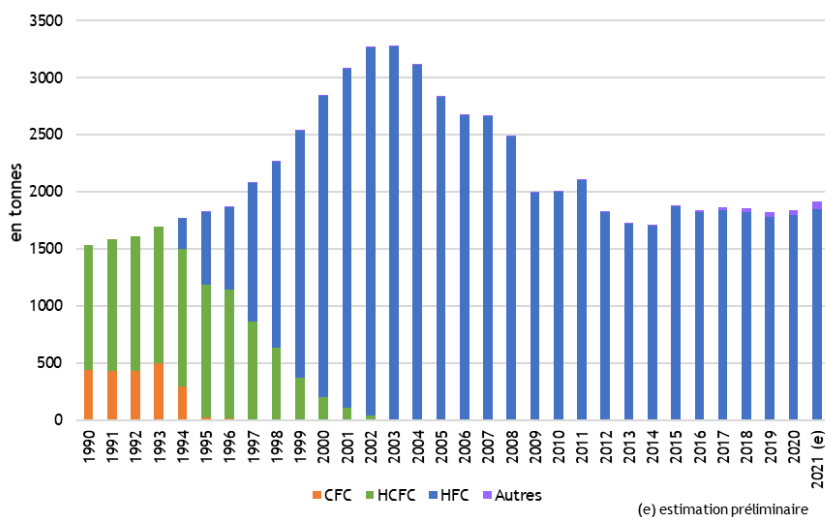


Figure 23 - Besoin en fluides frigorigènes pour la production d'équipements pré-chargés en France métropole

Tableau 7 - Production 2020

Fluide frigorigène	2020 (en t)
R-12	0
Total CFC	0
R-22	0
Total HCFC	0
R-32	151
R-134a	486
R-407C	15
R-410A	185
R-450A	3
R-452A	8
R-456A	17
R-513A	52
R-513B	17
R-1234yf	765
R-1234ze	147
Total HFC	1847
R-290	16
R-600a	8
R-717	0
R-744	39
Total Autres	63
Total général	1910

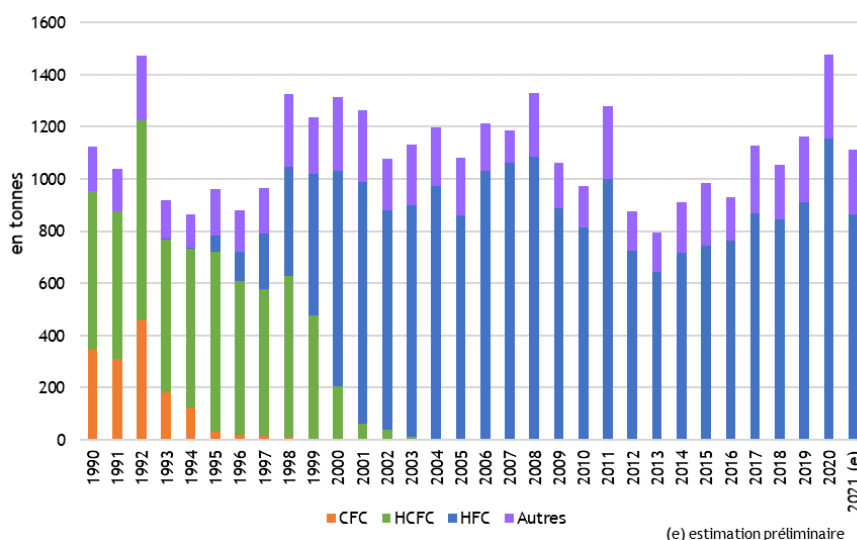


Figure 24 - Besoin en fluides frigorigènes pour la charge d'équipements sur site en France métropole

Tableau 8 - Charge 2020

Fluide frigorigène	2020 (en t)
R-32	222
R-134a	139
R-407C	0
R-407F	25
R-410A	166
R-448A	119
R-449A	30
R-450A	47
R-452A	31
R-454C	58
R-1234yf	19
R-1234ze	10
Total HFC	864
R-290	0
R-717	108
R-744	141
Total Autres	248
Total général	1 113

4.1.2 Besoin pour la maintenance et le retrofit du parc d'installations

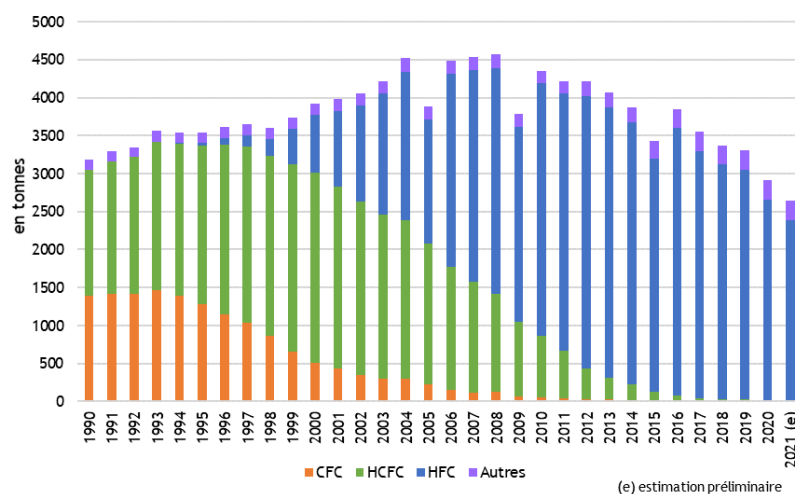


Figure 25 - Evolution du besoin estimé pour la maintenance des installations sur le parc d'équipements en France

Les principaux secteurs demandeurs en fluides frigorigènes pour la maintenance de leurs installations sont le froid commercial (30 %) et le froid industriel (35 %). Le froid commercial représente plus de la moitié du besoin en R-404A et le froid industriel, un tiers. La climatisation automobile est encore utilisateur de plus de 40 % du marché de R-134a consacré à la maintenance. Le besoin en R-410A se retrouve à 80 % en climatisation à air cependant, les taux d'émissions étant relativement faibles, cette demande reste assez basse.

A noter, les demandes pour la maintenance et pour le retrofit correspondent aux besoins évalués pour entretenir le parc d'équipements, en fonction des durées de vie et des taux d'émissions estimés. Une partie peut ne pas être satisfaite, une partie peut être comblée par le recyclage des quantités récupérées lors d'opérations de maintenance.

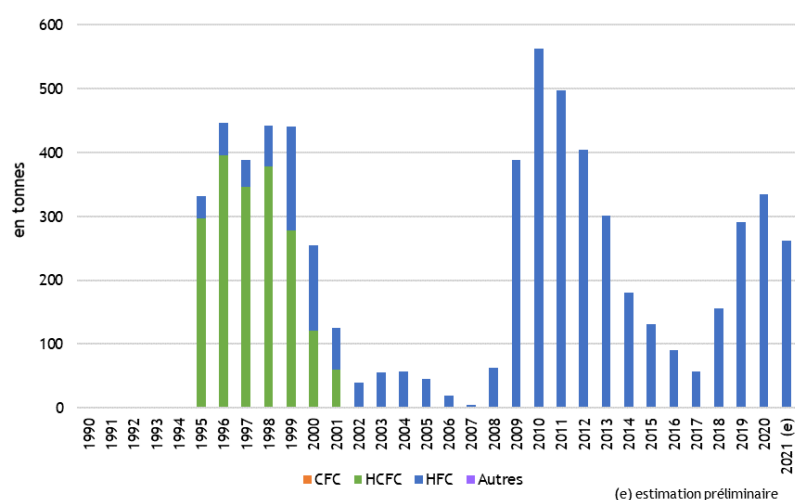


Figure 26 - Evolution du besoin estimé pour le retrofit des installations utilisant des HFC à fort PRG en France

Tableau 9 - Besoin maintenance

Fluide frigorigène	2020 (en t)
R-12	5
Total CFC	5
R-22	14
Total HCFC	14
R-32	1
R-134a	1 197
R-404A	633
R-407A	27
R-407C	112
R-407F	64
R-410A	374
R-417A	14
R-422D	34
R-427A	10
R-448A	40
R-449A	63
R-450A	5
R-452A	10
R-454C	3
R-456A	5
R-507	18
R-513A	16
R-513B	5
R-1234yf	3
R-1234ze	2
Total HFC	2 636
R-290	0
R-600a	0
R-717	111
R-744	142
Total Autres	253
Total général	2 909

Tableau 10 - Besoin retrofit

Fluide frigorigène	2020 (en t)
R-407F	27
R-448A	155
R-449A	91
R-452A	62
Total HFC	335
Total général	335

5. Vérification de cohérence

5.1 Comparaison des marchés et demandes par HFC

Afin de vérifier la cohérence de l'approche et des hypothèses de calcul, la demande reconstituée peut être comparée aux marchés déclarés, comme ci-dessous.

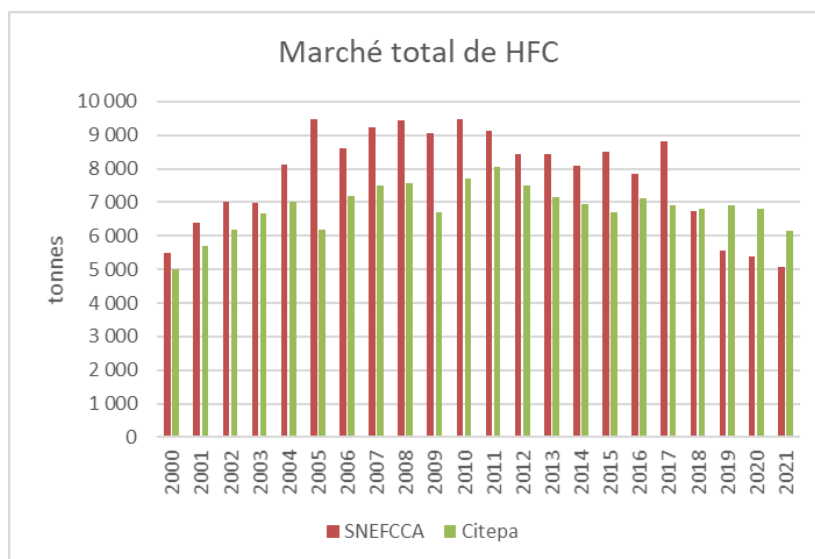


Figure 27 - Comparaison de la demande totale calculée aux marchés déclarés au SNEFCCA

La tendance globale montre que la demande est, sur l'historique, plutôt inférieure aux marchés déclarés. Depuis 2018 la tendance est inversée. Le fait que la demande soit supérieure au marché déclaré (celui-ci tient compte des quantités régénérées) s'explique par le fait qu'une partie du besoin est satisfait par les quantités récupérées directement recyclées. Ce phénomène est apparu très significativement avec la forte hausse des prix des HFC à partir de 2017-2018. Sur certaines années, l'écart peut s'expliquer par un stockage qui n'est pas pris en compte dans le calcul de la demande, équivalente au besoin pour la maintenance, la production et la charge des équipements.

Des comparaisons par fluide frigorigène sont également faites pour conforter les hypothèses par secteur ou mieux comprendre les écarts.

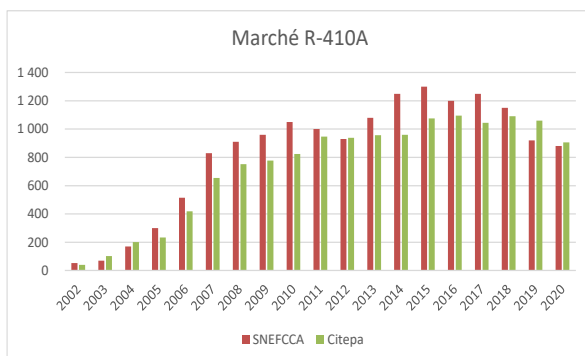


Figure 28 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-410A

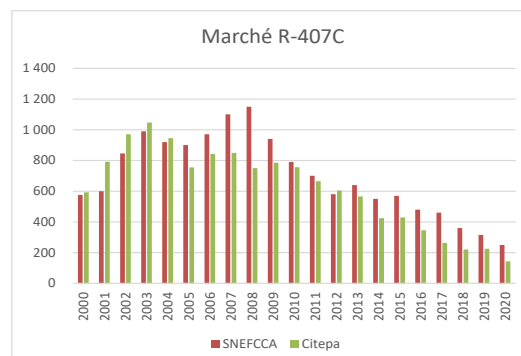


Figure 29 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-407C

En climatisation, les R-410A et le R-407C sont les HFC les plus utilisés. Les secteurs de la climatisation à air, des pompes à chaleur réversibles et des chillers sont particulièrement bien estimés du fait d'une bonne collaboration avec une fédération professionnelle, UNICLIMA qui fournit au Citepa des données détaillées sur les marchés d'équipements et les fluides utilisés par gamme. Les résultats des comparaisons (Figure 30 et Figure 31) tendent à montrer que l'ensemble des hypothèses est cohérent. Cependant les productions d'équipements sont, pour la plupart, estimées et les écarts observés sur le marché de R-32 tendent à confirmer la forte incertitude sur les données de production en France.

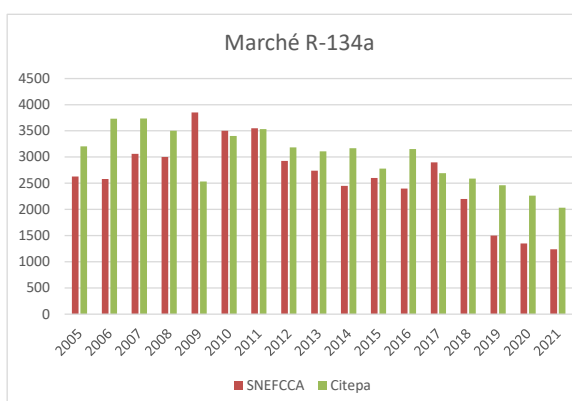


Figure 30 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-134a

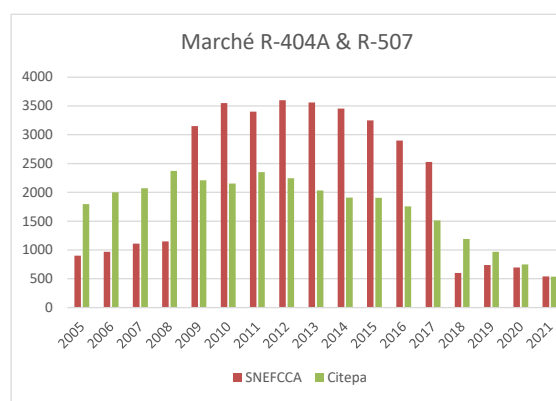


Figure 31 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-404A

Les comparaisons de la demande de R-134a et de R-404A avec les marchés déclarés font apparaître des écarts significatifs avant 2017, notamment pour le R-404A. Les corrections récentes apportées à l'industrie peuvent l'expliquer en partie et l'enquête de terrain qui a conduit à une réduction des ratios de charge et une augmentation de la pénétration de l'ammoniac sur l'historique devra être vérifiée pour tous les sous-secteurs.

5.2 Analyse des résultats sur la récupération en fin de vie des équipements

La Figure 32 compare :

- Les quantités cumulées de CFC, HCFC, HFC retournées aux distributeurs pour régénération ou destruction (données SNEFCCA) ;
- Les quantités récupérées estimées par l'outil GF (résultats Citepa), celles-ci dépendant des données et hypothèses sur les performances des filières de récupération en fin de vie ;

- Le potentiel de récupération : ce sont les quantités de fluides frigorigènes contenues dans les équipements parvenant en fin de vie ; Elles sont estimées par le calcul Citepa connaissant les marchés d'équipements, leurs durées de vie, leurs charges moyennes et tenant compte des pertes annuelles liées aux émissions fugitives.

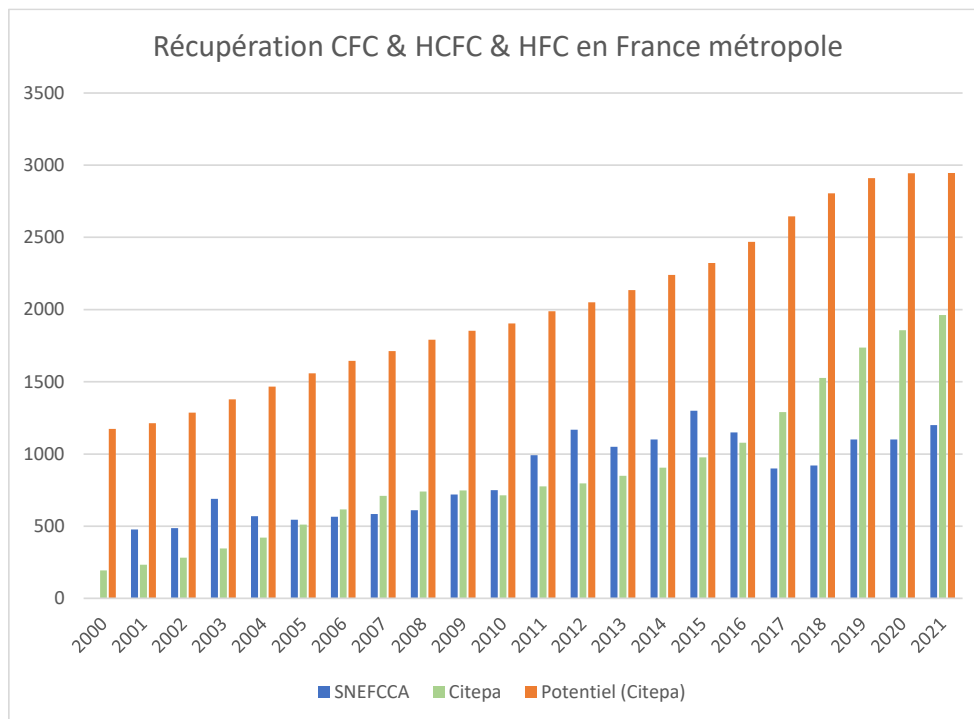


Figure 32 - Comparaison des données sur la récupération en France métropole

La comparaison fait apparaître un écart très significatif à partir de 2017 entre les données déclarées et les quantités estimées par le calcul. Une partie de l'écart s'explique par le fait qu'une partie des quantités récupérées par les opérateurs n'est pas retournée aux distributeurs mais directement recyclée. L'écart s'accroît sur les dernières années depuis la mise en place du phasedown qui a engendré une hausse des prix et une pénurie des HFC à fort PRG.

III. Secteur 1 - Les applications domestiques

1. Introduction

Ce secteur regroupe 4 sous-secteurs :

- les réfrigérateurs (tous types confondus) ;
- les congélateurs seuls ;
- les sèche-linges avec pompe à chaleur ;
- les caves à vin.

Réfrigérateur

Il existe différents types de réfrigérateurs :

- le table-top : il est équipé d'une porte et se compose généralement d'un compartiment principal de conservation et d'un petit compartiment de fabrication de glaçons ;
- le simple porte : il est équipé d'une seule porte et est composé d'un compartiment de conservation des denrées fraîches et éventuellement d'un petit compartiment de fabrication de glaçons ;
- le combiné : il est doté de deux portes avec en partie basse un compartiment de congélation et en haut un compartiment de conservation des denrées fraîches ;
- le double porte : il est aussi doté de deux portes mais le compartiment congélation se trouve cette fois en haut ;
- l'américain : il est composé de deux compartiments placés côte à côte, généralement un réfrigérateur et un congélateur.

Congélateur

Il existe différents types de congélateurs :

- le congélateur armoire : il est proposé dans des capacités allant de 45 litres à plus de 450 litres. Il occupe un espace similaire à un réfrigérateur ;
- le congélateur coffre : il peut offrir les plus grandes capacités de stockage, allant de 100 litres à 750 litres ;
- le congélateur table top : d'une contenance d'environ 85 litres.

Sèche-linge pompe à chaleur

Depuis le début des années 2010, une nouvelle technologie fait appel à une pompe à chaleur afin de sécher les vêtements. En plus de capter et de réutiliser l'air chaud normalement expulsé vers l'extérieur, les nouveaux appareils produisent de la chaleur en comprimant l'air humide présent dans le culbuteur à l'aide d'une pompe. Cette pompe à chaleur utilise l'électricité, mais la machine consomme néanmoins beaucoup moins d'énergie que la sècheuse conventionnelle.

Cave à vin

Apparues dans les années 1970, il existe plusieurs types de caves à vin :

- la cave de vieillissement : elle permet au vin de vieillir et de se bonifier dans des conditions réguliées grâce à la stabilité de température (autour de 12°C), la bonne circulation de l'air et l'hygrométrie (entre 60 et 80 %) ;
- la cave de mise en température : elle permet de conserver les bouteilles à température de dégustation ;

- la cave combinée ou multi-températures : c'est une cave polyvalente qui permet de stocker différentes sortes de vin sur plusieurs étages à des températures différentes offrant à la fois la possibilité de vieillissement et de mise en température.

Modes de charge

Les équipements domestiques sont tous chargés en usine (lieux de production). Les émissions à la charge dépendent donc des productions nationales.

Modes de maintenance

Il est considéré qu'il n'y a pas de maintenance faite sur ces équipements, les systèmes frigorifiques étant entièrement scellés.

Durée de vie moyenne

La durée de vie moyenne de ces équipements prise en compte dans les calculs est de 15 ans pour les réfrigérateurs, congélateurs et caves à vin, et de 10 ans pour les sèche-linges pompe à chaleur. Une courbe de durée de vie est associée.

2. Données et hypothèses - Froid domestique

2.1 Données d'activités

2.1.1 Marchés et productions

MARCHES

Réfrigérateur et congélateur

Le Gifam (Groupement Interprofessionnel des Fabricants d'Appareils d'Équipement Ménager) [Ref 4] publie chaque année les statistiques de marchés pour certains appareils domestiques, dont les réfrigérateurs et les congélateurs. Une répartition des modèles de réfrigérateurs et congélateurs (en termes de volume moyen) sur le parc français est disponible pour certaines années (2001, 2011, 2017) [Ref 4] [Ref 5]. Ainsi, les ventes annuelles en France sont connues avec une bonne précision.

Sèche-linge pompe à chaleur

Le marché des sèche-linges pompe à chaleur en France a été reconstitué depuis 2010 à partir des informations d'un producteur d'équipement [Ref 6] et des données récentes du Gifam [Ref 4] qui fournit les ventes de sèche-linges en France ainsi que la segmentation par produit permettant de distinguer les sèche-linges PAC des sèche-linges à condensation et des sèche-linges à évacuation.

PRODUCTIONS

Les équipements domestiques étant chargés d'usine, la donnée d'activité à prendre en compte pour estimer les émissions à la charge des équipements est la production d'équipements.

Réfrigérateur et congélateur

Les réfrigérateurs ne sont plus produits en France depuis 2001 et les congélateurs depuis 2005. Les données de production entre 1994 et 2000 proviennent des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 5]. Les années antérieures sont estimées sur la base de la tendance entre 1994 et 1995.

Sèche-linge pompe à chaleur

Parmi les sèche-linges fabriqués en France, seule une usine a fabriqué des sèche-linges de type pompe à chaleur entre 2013 et 2018 ; elle n'utilise que le R-134a. Les consommations de réfrigérants pour la production de ces équipements ont été directement transmises par l'exploitant et le nombre d'appareils produits est déduit de ces consommations et de la quantité moyenne de réfrigérant installé par appareil.

Cave à vin

Il existe un seul fabricant de caves à vin en France (groupe Eurocave). L'hypothèse a été faite de considérer les productions à partir de l'année où le marché des caves à vin a commencé à être représentatif en France, soit en 2000. Les productions antérieures ont donc été considérées négligeables, faute d'information du fabricant. Le volume de production en France en 2013 a été utilisé et provient d'une revue spécialisée [Ref 7]. Les volumes de productions des années antérieures et postérieures ont été estimées en suivant les tendances d'un taux d'augmentation annuel de 8 %.

2.1.2 Charge nominale

Tableau 11 - Hypothèses de charges nominales des équipements de froid domestiques en 2020

2020	Ratio de charge	Volume moyen (l)
Réfrigérateur	230 g/l (R-600a)	244
Congélateur	300 g/l (R-600a)	
Sèche linge thermodynamique	325g / appareil	
Cave à vin	65g / appareil	

Réfrigérateur

Les ratios de charge évoluent dans le temps en fonction de deux paramètres principaux :

- le type de fluide réfrigérant utilisé ;
- le type d'équipement mis sur le marché.

Le ratio de charge final, exprimé en g de réfrigérant par le volume moyen d'un équipement, est ainsi calculé en fonction de la part des différents modèles de réfrigérateurs mis sur le marché et d'une charge moyenne de fluide par équipement et par fluide (tiré des rapports d'inventaires des fluides frigorigènes [Ref 5]). A noter que la charge pour un même équipement est environ deux fois moindre pour l'utilisation de R-600a que pour l'utilisation de R-12 et R-134a.

Pour la catégorie Congélateur, la charge est calculée de la même manière, en fonction d'un ratio de charge par fluide et d'un volume moyen.

Sèche-linge pompe à chaleur

La quantité de réfrigérant R-134a contenu dans un appareil dépend des classes énergétiques, 280g pour les bases A+ et 370g pour les bases A++ d'après un fabricant [Ref 6]. La moyenne des deux valeurs est considérée dans l'inventaire, soit 325 g/appareil. Ce volume de charge est cohérent avec la gamme proposée dans les Lignes directrices du GIEC (entre 50 et 500 g/appareil).

Cave à vin

La quantité de réfrigérant contenu dans les caves à vin varie en fonction de la gamme. Selon un fabricant [Ref 8], cette quantité est comprise entre 30 g et 100 g. La valeur considérée dans l'inventaire la moyenne de ces deux valeurs, soit 65 g/appareil. Ainsi, pour cette sous-application, la charge de réfrigérant est également cohérente avec l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 (entre 50 et 500 g/appareil).

2.1.3 Fluides frigorigènes utilisés

La réglementation européenne CE 517/2014 interdit la mise sur le marché des réfrigérateurs et congélateurs domestiques contenant un fluide frigorigène de PRG supérieur à 150 depuis 1^{er} janvier 2015.

Réfrigérateur et congélateur

Le CFC-12 a historiquement été utilisé avant son interdiction par le Protocole de Montréal. Deux fluides l'ont remplacé à partir de 1994 et 1995, le R-134a et l'isobutane (R-600a). La répartition des fluides au cours du temps s'est notamment effectuée à l'aide d'enquêtes terrain régulières [Ref 5] jusqu'en 2002 et à partir de 2010. Entre 2002 et 2010, la répartition est lissée en prenant compte des données du rapport RTOC pour l'année 2008 qui indique une répartition de la production de réfrigérateurs et congélateurs de 16 % de R-134a et 84 % R-600a pour la zone Europe de l'ouest. L'intégralité des équipements produits à partir de 2015 le sont avec du R-600a (Figure 33).

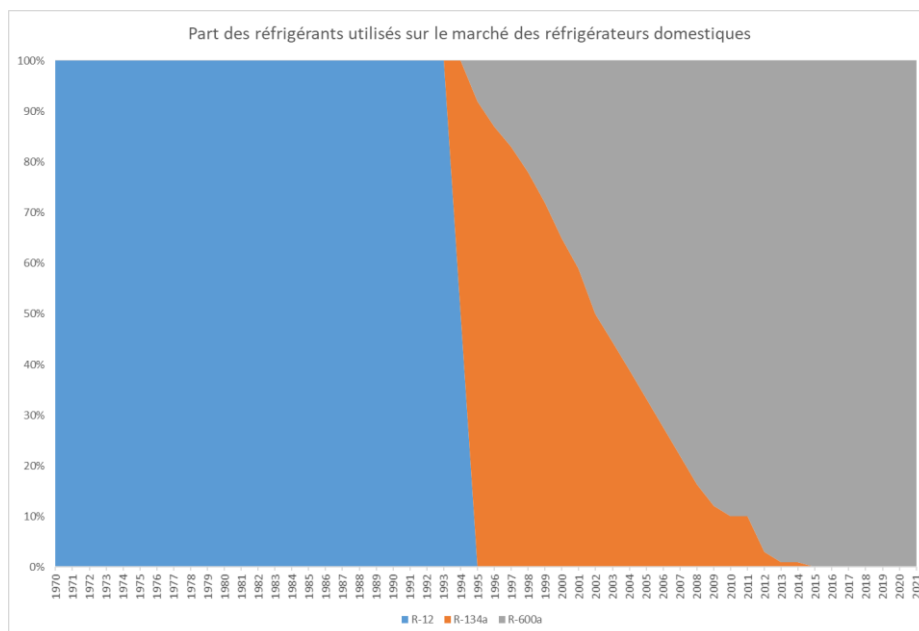


Figure 33 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés sur le marché des réfrigérateurs domestiques

Sèche-linge pompe à chaleur

Dans l'inventaire, il est supposé que seul le R-134a était utilisé dans les équipements jusqu'en 2018 où une enquête terrain [Ref 9] a mis en évidence la présence de R-450A et R-290. Une introduction progressive de ces fluides a donc été prise en compte dans les hypothèses de calcul.

Cave à vin

En 2017, selon un catalogue de vente de caves à vin qui recense les produits et les diverses caractéristiques dont les réfrigérants, sur 25 produits le R-600a et le R-134a sont les fluides les plus employés. A noter qu'il existe également des technologies basées sur les systèmes de refroidissement thermoélectrique pour lesquels aucun gaz réfrigérant n'est utilisé. Une enquête terrain réalisée en 2019 [Ref 9] a par ailleurs permis de constater que le R-600a était le fluide le plus largement utilisé. Il a été supposé une introduction du R-600a progressive en remplacement du R-134a à partir de 2000.

2.1.4 Durée de vie

La durée de vie moyenne des réfrigérateurs et des caves à vins réfrigérées est supposée identique à celle des congélateurs, estimée à 15 ans. Pour les sèche-linges avec pompe à chaleur la durée de vie est estimée à 10 ans.

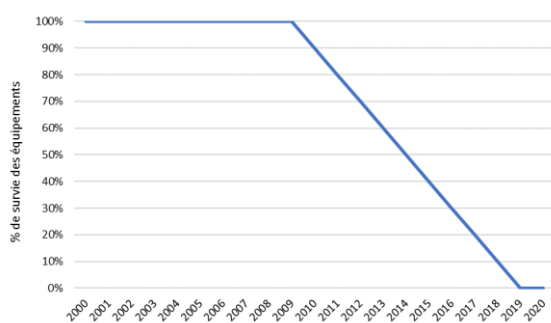


Figure 34 : Courbe de durée de vie pour les réfrigérateurs, congélateurs et caves à vin

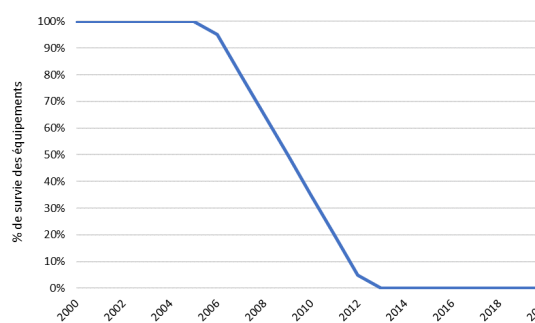


Figure 35 : Courbe de durée de vie pour les sèche-linges avec pompe à chaleur

2.2 Facteurs d'émissions

2.2.1 A la charge

Les facteurs d'émissions à la charge pris en compte pour l'année 2020 sont les suivants :

Tableau 12 - Facteur d'émission à la charge des équipements de froid domestique

2020	Réfrigérateurs	Congélateurs	Sèche-linges pompes à chaleur	Caves à vin
Facteur d'émission à la charge	0,2 %	0,2 %	0,1 %	0,6 %

Réfrigérateur et congélateur

Il est considéré, dans les hypothèses, que le facteur d'émission à la charge des réfrigérateurs et congélateurs a évolué au cours du temps avec l'amélioration des pratiques. Un facteur d'émission de 2 % a été utilisé jusqu'à la fin de l'utilisation du R-12 dans le milieu des années 1990 pour atteindre un taux de 0,2 %, correspondant à la tranche basse des facteurs d'émission des Lignes directrices du GIEC 2006 pour le froid domestique [Ref 10] à partir de 2010.

Sèche-linge pompe à chaleur

Un facteur d'émission spécifique au pays a été calculé en utilisant les consommations et les émissions déclarées par l'unique site de production en France. Celui-ci varie de 4,9 % à 0,1 % selon les années. La mise en place d'un nouveau process de remplissage du gaz entre 2016 et 2017 explique en partie la forte baisse de ce facteur d'émission.

Cave à vin

Le facteur d'émission utilisé correspond à la moyenne de l'intervalle préconisé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 [Ref 10], soit 0,6 %.

2.2.2 Fugitif

Les appareils de froid domestique sont étanches, le circuit frigorifique étant entièrement soudé. Les émissions fugitives sont donc quasi-inexistantes et constituées de très rares pertes complètes de la charge correspondant généralement à un défaut initial de brasure. Le taux d'émissions fugitives est donc assimilé à la fréquence de défaillance des équipements : il est considéré stable, de l'ordre de 0,01 % correspondant à 1 défaillance sur 10 000 appareils [Ref 5]. Ce taux est basé sur les résultats d'une enquête assez ancienne qui avait été menée auprès d'un magasin de vente. Ce taux d'émission est supposé identique pour les 4 sous-applications de ce secteur.

Tableau 13 - facteur d'émission fugitif des équipements de froid domestique

En 2020	Appareils domestiques
Facteur d'émission fugitif	0,01 %

Il n'est pas pris en compte d'opérations de maintenance pour les applications domestiques.

2.2.3 En fin de vie

Depuis la mise en place de la filière DEEE en 2007 imposée par la réglementation française (décret n° 2005-829 du 20 juillet 2005 relatif à la composition des équipements électriques et électroniques et à l'élimination des déchets issus de ces équipements), des éco-organismes assurent la collecte, le recyclage et le suivi des quantités récupérées. Les quantités annuelles de CFC, HCFC, HFC et HC extraits en première phase de dépollution des appareils de froid domestique sont communiquées chaque année par l'ADEME dans les rapports DEEE [Ref 11]. Un taux de récupération peut ainsi être estimé en comparant les quantités récupérées et les quantités de réfrigérants supposés être en fin de vie en fonction des mises sur le marché et de la durée de vie moyenne des équipements. Ce taux de récupération est supposé caractériser le secteur du froid domestique. Le même taux de récupération, et donc le même facteur d'émission fin de vie, est appliqué à chaque sous-application domestique.

Tableau 14 - Facteur d'émission de fin de vie des équipements de froid domestique

En 2020	Appareils domestiques
Facteur d'émission de fin de vie	44 %

3. Résultats Froid domestique

3.1 Banque

Le parc des appareils de froid domestique se renouvelle progressivement et est, depuis 2013, dominé par les appareils utilisant des hydrocarbures (R-600a). Le ratio de charge de ces appareils étant plus faible que ceux fonctionnant au R-12 ou R-134a, la banque totale de fluides frigorigènes a décliné (Figure 36) entre 2000 et 2014. Depuis 2015 on observe une hausse de la banque du secteur du froid domestique, du fait de la hausse des marchés de réfrigérateurs, de sèche-linges et de caves à vins réfrigérées. La banque totale de fluides frigorigènes du froid domestique est estimée à 3 575 t en 2020, composée à 71 % de R-600a (Tableau 15).

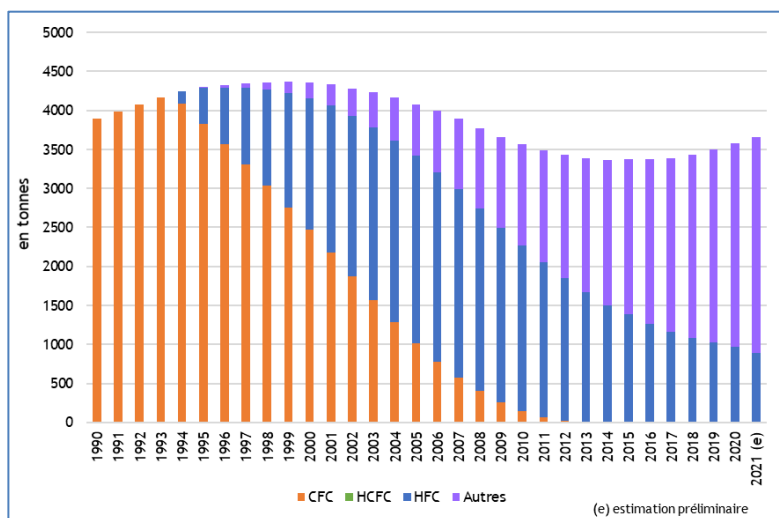


Figure 36 : Banque de fluide dans le secteur du froid domestique

Tableau 15 : Banque de fluide

Fluide frigorigène	2020 (en t)
R-134a	932,4
R-450A	34,0
Total HFC	966,4
R-290	68,0
R-600a	2 540,7
Total Autres	2 608,7
Total général	3 575,1

3.2 Demande

3.2.1 Besoin pour les équipements neufs

La demande pour les applications de froid domestique est liée à la production des équipements en France, durant certaines périodes, les besoins pour maintenance (réparation) d'appareils étant très faible. La demande a beaucoup diminué depuis 2000 avec l'arrêt de la production de réfrigérateurs (depuis 2001) et de congélateurs (depuis 2005) en France. Entre 2013 et 2018, la demande est liée à la production de sèche-linges thermodynamiques fabriqués en France et utilisant uniquement du R-134a.

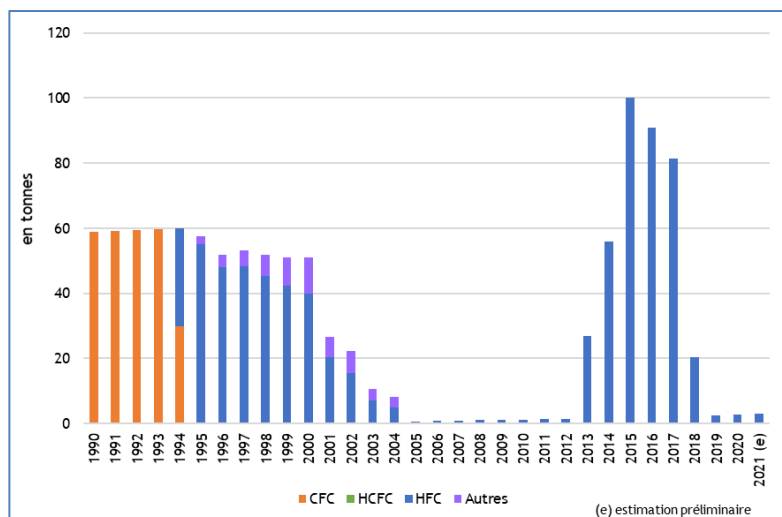


Figure 37 : Demande en fluides frigorigènes pour la production dans le secteur du froid domestique

Tableau 16 : Production 2020

Fluide frigorigène	2020 (en t)
R-134a	2,7
Total HFC	2,7
Total Autres	0,0
Total général	2,7

3.3 Emissions

3.3.1 Emissions totales

En 2020, les émissions totales du froid domestique sont constituées à 99,7 % des émissions de fin de vie des équipements, les systèmes étant hermétiques. Elles sont assez faibles, de l'ordre de 138,8 tonnes en 2020, étant donnée l'efficacité croissante de la filière DEEE. Elles sont composées à près de 52 % de R-134a et à 48 % de R-600a

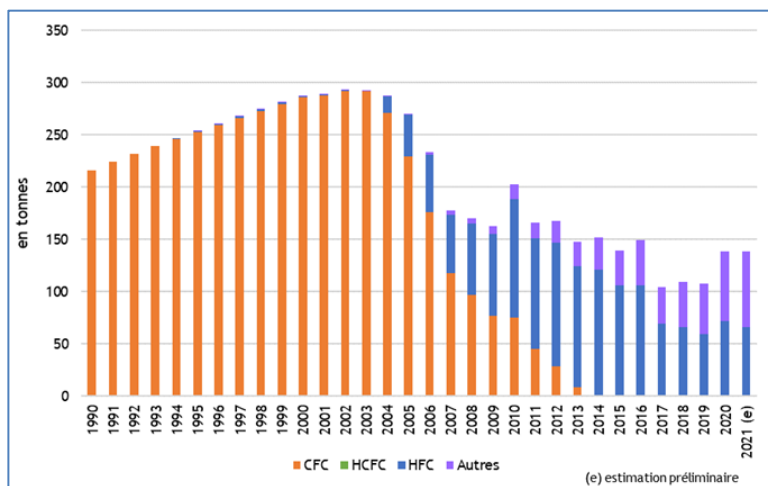


Figure 38 : Emissions totales du froid domestique

Tableau 17 : Emissions totales 2020

Fluide frigorigène	2020 (en t)
R-134a	71,8
R-450A	0,00
Total HFC	71,8
R-290	0,01
R-600a	67,0
Total Autres	67,0
Total général	138,8

3.3.2 Emissions CO₂ équivalentes

Alors qu'elles culminaient à plus de 3,2 millions de tonnes de CO₂ en 2002, les émissions du froid domestique ne représentent plus que 103 000 tonnes de CO₂ en 2020 et sont amenées à décroître encore avec la généralisation de l'utilisation du R-600a (Figure 39).

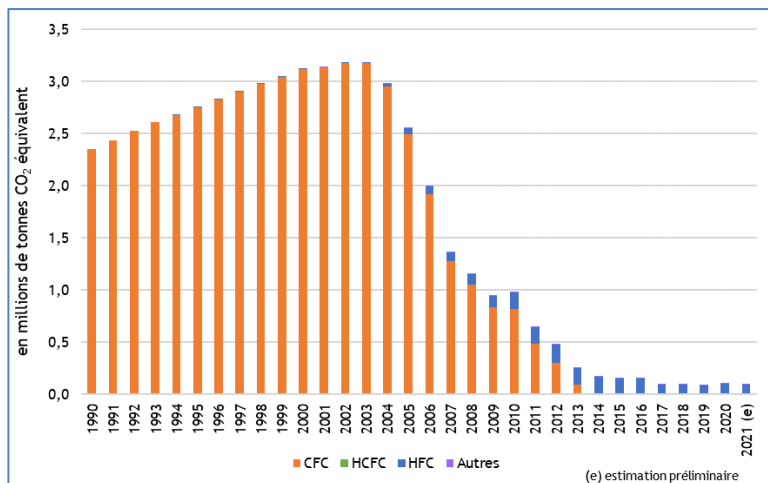


Figure 39 : Emissions CO₂ équivalentes du froid domestique (millions de tonnes)

Tableau 18 : Emissions CO₂eq. 2020

Fluide	2020 (Mt CO ₂ e)
R-134a	0,10
R-450A	0,00
Total HFC	0,10
R-290	0,0000
R-600a	0,0002
Total Autres	0,0002
Total général	0,10

IV. Secteur du froid commercial

1. Introduction

Le secteur du froid commercial est décomposé en quatre sous-secteurs :

- Les installations frigorifiques des hypermarchés, commerces de détail non spécialisés à prédominance alimentaire d'une surface de vente égale ou supérieure à 2 500 m².
- Les installations des supermarchés, commerces de détail non spécialisés à prédominance alimentaire d'une surface de vente comprise entre 400 m² à 2 500 m².
- Les équipements frigorifiques utilisant des groupes de condensation (ex : chambre froide) dans les petits commerces.
- Les équipements utilisant des groupes hermétiques (ex : armoire réfrigérée) dans les petits commerces et les distributeurs automatiques.

Les super et hypermarchés sont équipés d'une salle des machines comportant deux séries de centrales frigorifiques, l'une dit de froid positif (entre - 10°C et -15°C) pour la conservation des produits frais et l'autre dit de froid négatif (aux environs de -35°C à -38°C) pour les produits surgelés. 80 % de la puissance frigorifique et 75 % des charges de fluides se trouvent dans les centrales de froid positif. Le calcul des charges de fluides frigorigènes est basé sur la description du parc de magasins et termes de nombre et surfaces et de ratios de charge surfacique (kg/m²).

Les « petits commerces » sont équipés de groupes de condensation ou de groupes hermétiques. Ces équipements sont utilisés dans les commerces alimentaires de détail, du spécialiste alimentaire à la supérette. Les équipements utilisés dans les bars, hôtels, restaurants, cuisines professionnelles ainsi que les stations-services sont rattachés aux petits commerces. Les distributeurs automatiques de boissons réfrigérées sont également pris en compte. Les magasins de type « Drive » sont également considérés dans l'inventaire. Enfin, concernant les maxi-discomptes dont les surfaces de vente réfrigérées sont nettement inférieures à celles des supermarchés, leurs installations frigorifiques s'apparentent à celles des supérettes. L'ensemble des petits commerces est pris en compte en 4 groupes de magasins présentés au tableau ci-dessous, supposés présenter les mêmes caractéristiques en termes d'équipements.

Tableau 19 - Catégories de magasin prises en compte dans les équipements des petits commerces

Groupe - supérettes	Groupe - petits commerces spécialisés	Groupe - drives	Groupe - distributeurs automatiques
Maxi-discomptes Supérettes Surgelés	Alimentation générale Bars, Hôtels, Restaurants Boulangeries pâtisseries Boucheries charcuteries Poissonneries Primeurs Stations-services	Magasins drives	Distributeurs automatiques réfrigérés

Modes de charge

Les installations frigorifiques des super et hypermarchés ainsi que les équipements réfrigérés des commerces alimentaires de détail sont chargés sur site excepté les groupes hermétiques équipant les armoires et vitrines frigorifiques qui sont chargés dans les usines de production.

Modes de maintenance

Etant donné les contraintes réglementaires impactant les équipements de plus de 300kg, il est pris en compte au moins une opération de maintenance annuelle pour les supermarchés et les

hypermarchés. En revanche pour les petits commerces, on considère que la maintenance intervient lorsque la quantité réelle de réfrigérant passe en deçà d'un certain seuil. Il n'est pas considéré de maintenance pour les équipements utilisant des groupes hermétiques. Il est considéré que lors de la maintenance, ces équipements ne nécessitent pas de décharge complète du fluide mais seulement un complément de charge égal aux quantités perdues par émissions fugitives depuis l'installation ou la dernière opération de maintenance.

Tableau 20 - Modes de maintenance des équipements de froid commercial

Sous-secteur	Rythme de maintenance	Seuil
Hypermarchés	annuelle	-
Supermarchés	annuelle	-
Groupes de condensation	selon seuil	70 %
Groupes hermétiques	Pas de maintenance	-

Durée de vie moyenne

L'hypothèse de durée de vie moyenne des équipements est basée sur les rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 5] et les lignes directrices de 2006 du GIEC [Ref 10]. Une courbe de durée de vie est associée.

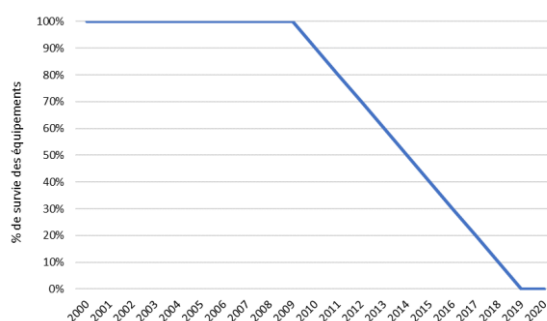


Figure 40 - courbe de durée de vie des équipements du froid commercial

Pour tous les sous-secteurs du froid commercial, le renouvellement des installations des magasins est pris en compte en considérant une durée de vie des équipements de 15 ans.

2. Données et hypothèses

2.1 Données d'activités

2.1.1 Marchés et productions

MARCHES

Hypermarchés

Afin de reconstituer l'évolution du parc depuis 1970, plusieurs sources de données ont été considérées. Entre 1970 et 1980, une communication du groupe Nielsen [Ref 12], entre 1980 et 2004 les données publiées par l'INSEE [Ref 13], [Ref 14], [Ref 15], [Ref 16]. Pour les données plus récentes (depuis 2007), le parc d'hypermarchés est construit à partir de la base de données de l'ACOSS, la caisse nationale des URSSAF recensant entre autres les différents types de commerces alimentaires de détail par code NAF [Ref 17]. Les années manquantes pour lesquelles les informations sont indisponibles, sont estimées par interpolation.

Supermarchés

La méthode de calcul des quantités de fluides utilisés dans les supermarchés et similaire à celle présentée pour les hypermarchés. Entre 1970 et 1992, le parc est reconstitué à l'aide des mêmes sources. Entre 1994 et 2016, les anciens rapports d'inventaires sont utilisés comme référence [Ref 5]. Enfin, le parc de supermarchés considéré en 2018 est issu d'une communication avec le LSA [Ref 18], et celui de 2019 est issu d'une communication avec Perifem [Ref 19].

Groupes de condensation

La banque de fluide frigorigènes dans les groupes de condensation des « petits commerces » est calculée en fonction des charges moyennes par équipement, d'une configuration type d'équipements par magasin et de l'évolution du parc de magasins. Une charge moyenne par type de magasin (supérettes, drives, etc.) est ainsi estimée selon les résultats d'études de terrain réalisées par l'Ecole des Mines et dont les résultats sont détaillés dans les rapports d'inventaires [Ref 5]. Le parc de petits commerces, de supérettes, de magasins drive et de distributeurs est reconstitué, notamment à partir des rapports des Mines [Ref 5], de la base de données de l'ACOSS [Ref 17], de sites retraçant l'évolution de divers secteurs du commerce alimentaire de détail et des bases de données de l'INSEE [Ref 13], [Ref 14], [Ref 15], [Ref 16].

Groupes hermétiques

La même méthode que pour les groupes de condensation est appliquée aux groupes hermétiques. La charge moyenne par type de magasin (supérettes, drives, etc.) est estimée sur la base d'études de terrain réalisés par l'Ecole des Mines et dont les résultats sont détaillés dans les rapports d'inventaires [Ref 5].

PRODUCTIONS

Faute de données, on estime que la production des groupes hermétiques sur le territoire national est équivalente au marché. Pour les autres sous-secteurs, la production n'est pas nécessaire au calcul puisque les équipements sont chargés sur site.

2.1.2 Charge nominale

Pour les hypermarchés et supermarchés, la charge de fluide est exprimée en quantité par unité de surface (kg/m^2). Ces ratios ont été estimés à partir d'enquêtes de terrain et d'avis d'experts, incluant progressivement la réduction des charges via notamment l'introduction des systèmes indirects et cascade [Ref 5]. La courbe a été lissée, sur l'historique, en utilisant un modèle de courbe en S.

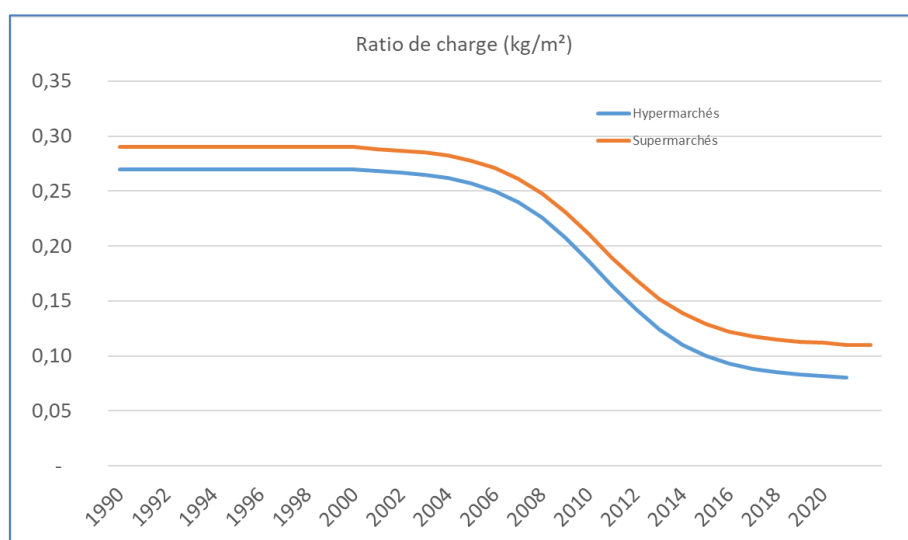


Figure 41 : Ratios de charge surfacique en supermarchés et hypermarchés

Tableau 21 - Charges moyennes en super et hypermarchés

Charge de référence (kg/m^2)	Avant 2000	2021
Hypermarchés	0,27	0,08
Supermarchés	0,29	0,11

Pour les petits commerces, les charges de fluides des groupes de condensation et des groupes hermétiques varient selon le type de commerces rencontrés.

Tableau 22 - Charges moyennes des équipements par type de petits commerces

Charge de référence (kg)	Avant 2000	2021
Supérettes - Groupes de condensation	129	20
Supérettes - Groupes hermétiques	2,8	2,8
Petits commerces - Groupes de condensation	3,5	3,5
Petits commerces - Groupes hermétiques	1,4	1,4
Distributeurs automatiques - Groupes de condensation	0	0
Distributeurs automatiques - Groupes hermétiques	0,3	0,3
Drives - Groupes de condensation	200	200
Drives - Groupes hermétiques	0	0

2.1.3 Fluides frigorigènes utilisés

Les évolutions des fluides frigorigènes utilisés par sous-secteur du froid commercial ont été reconstituées à partir des données issues des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 5], d'une communication de l'European Partnership for Energy and the Environment [Ref 20], rapport RTOC de 1998 [Ref 21] et de l'évolution de la réglementation européenne ((EU) 517/2014).

Hypermarchés

Entre 1970 et 1978, l'hypothèse est faite que les installations frigorifiques centralisées des hypermarchés utilisaient principalement le R-22 (entre 70 % et 80 %) et le R-12 (entre 20 % et 30 %). A partir du début des années 90, on considère que le R-22 constituait l'unique fluide utilisé dans les installations frigorifiques des hypermarchés. On estime qu'à partir du Plan Climat Européen de 1992, la part du HCFC-22 diminue au profit de mélanges de transition tels que le R-408A, puis majoritairement vers les HFC à fort PRG, le R-404A et le R-507 (qui restera minoritaire, pour des questions principalement commerciales). A partir de 2008 et le début de l'introduction des systèmes de type cascade, notamment R-134a/CO₂, la part du R-404A diminue. A partir de 2015, du fait de la nouvelle réglementation F-Gas et de l'interdiction programmée d'utilisation du R-404A dans les équipements neufs à partir de 2022, de nouveaux fluides frigorigènes commencent à être introduits sur le marché, à plus bas PRG. Il est considéré que la part du R-404A diminue progressivement pour être nulle en 2020 au profit d'autres fluides : le R-744 principalement ainsi que le R-134a, R-448A, R449A, R-450A et R-454C dans des proportions variables à partir de 2017.

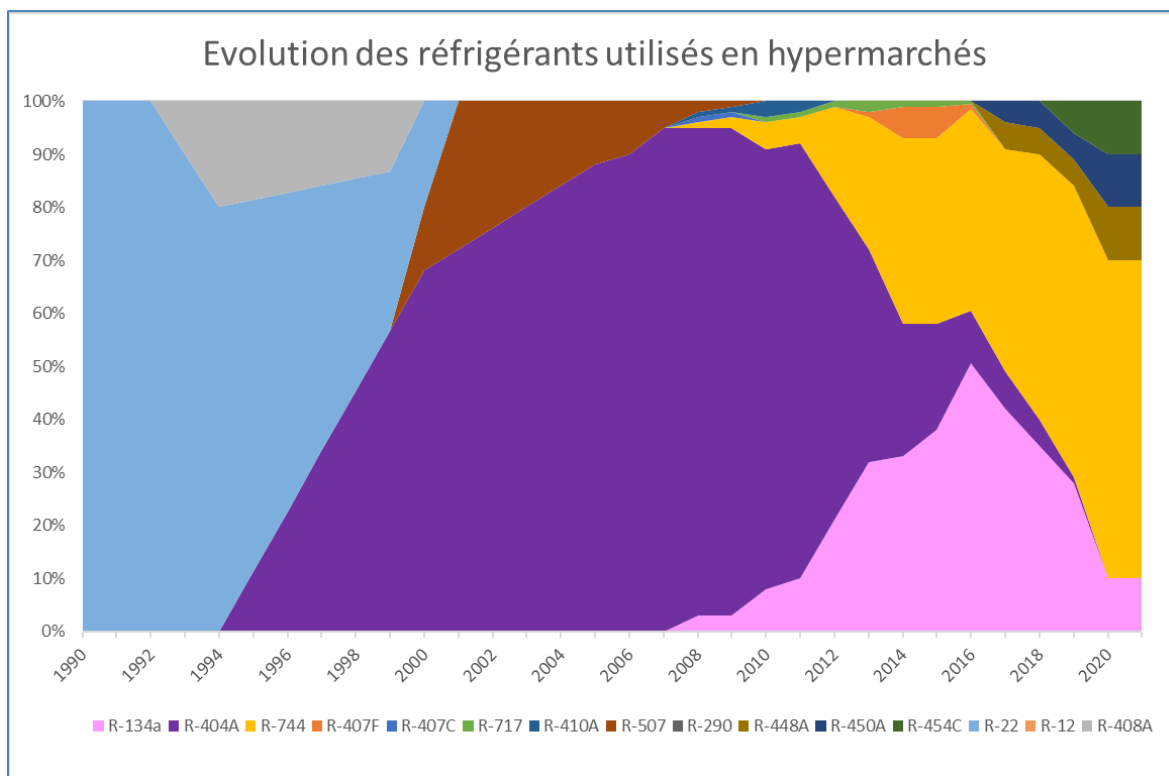


Figure 42 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les nouvelles installations des hypermarchés

A partir de 2016, il est pris en compte dans les hypothèses de calcul qu'une part croissante du parc d'installations au R-404A est convertie vers des installations au R-407A, R-448A, R-449A (2% en 2016 à 10% en 2020).

Supermarchés

A partir des années 1970 et jusqu'au milieu des années 1990, l'hypothèse retenue considère que les installations frigorifiques centralisées des supermarchés sont principalement chargées au R-12, R-22 et au R-502. Aux termes du Plan Climat Européen de 1992, on estime que l'utilisation de ces fluides va être grandement réduite : le R-502 et le R-12 dans un premier temps puis le R-22 à la fin des années 1990. Des fluides de remplacement apparaissent alors, le R-408A en transition puis le R-404A.

De 2000 à 2010, l'utilisation du R-404A domine dans les supermarchés où l'on estime qu'il représente une part allant jusqu'à 95 %. De même que pour les supermarchés, du fait des systèmes cascade et indirects, le R-134a est progressivement introduit dans les années 2010 et la part du R-404A diminue. A partir de 2015, on fait l'hypothèse d'une baisse progressive de l'utilisation du R-404A au profit de nouveaux fluides frigorigènes aux potentiels de réchauffement globaux plus faible tels que le R-407A et le R-407F mais aussi le R-744.

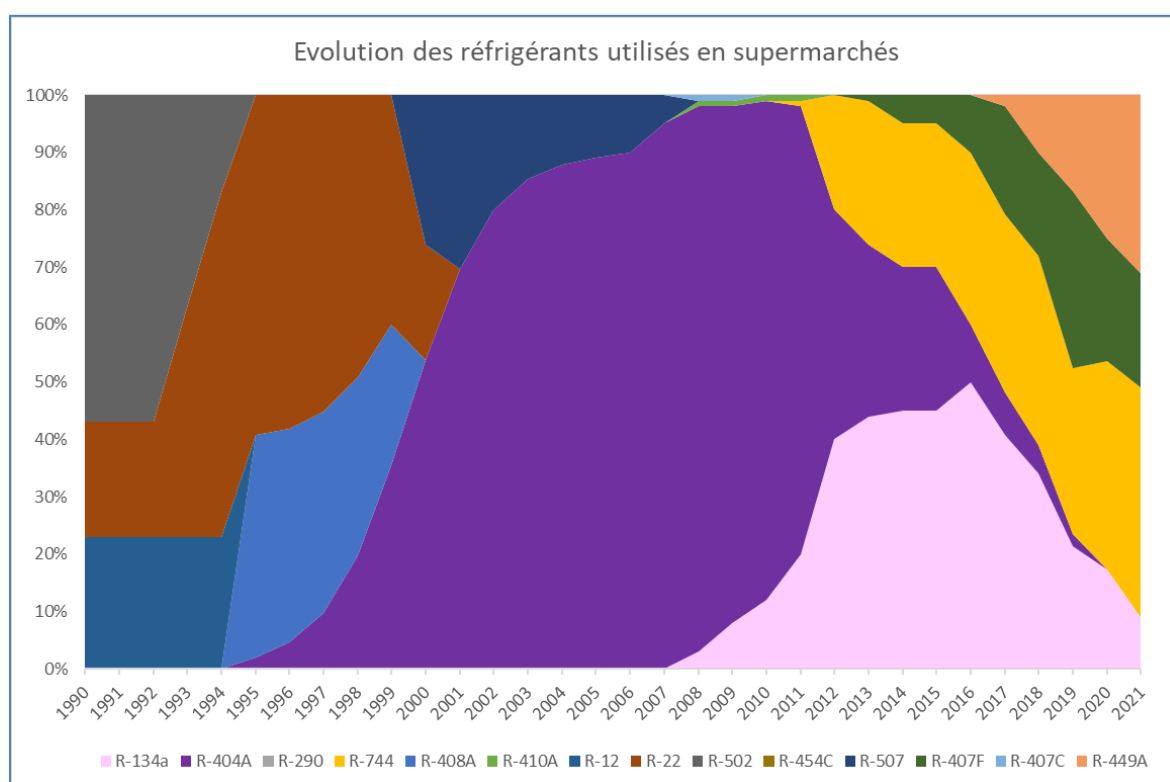


Figure 43 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés en supermarchés

De même que dans les hypermarchés, il est supposé un retrofit d'installations au R-404A vers des installations au R-407A, R-448A, R-449 à partir de 2016.

Groupes de condensation

Entre 1970 et le milieu des années 1990, une transition s'opère dans les groupes de condensation des « petits commerces » des CFC vers les HCFC. On considère que l'utilisation exclusive du R-12 laisse progressivement sa place au R-22. Sur la deuxième moitié des années 1990, la transition se fait du R-22 vers le R-404A.

Entre 2000 et 2016, on considère une utilisation majoritaire du R-404A (plus de 95 % en 2000 et 50 % en 2016) et du R-134a (jusqu'à 50 % en 2000), puis une diminution marquée jusqu'en 2021 du fait de

l'utilisation progressive d'autres fluides à plus bas PRG le R-744, le R-407A, le R-448A, le R-450A et le R-454C.

Groupes hermétiques

Entre 1970 et 1993, on considère que les groupes hermétiques présents dans les « petits commerces » utilisent du CFC-12 puis on considère une diminution rapide de son utilisation au profit du R-134a.

L'hypothèse est faite que le R-134a est le seul fluide utilisé dans ces groupes frigorifiques jusqu'en 2010. Dès lors, apparaissent d'autres fluides, notamment le R-290 et le R-744 dont la pénétration croît régulièrement jusqu'à aujourd'hui au détriment du R-134a.

2.1.4 Durée de vie

En froid commercial, la durée de vie de l'équipement est estimée en moyenne à 15 ans. Indépendamment de la durée de vie des magasins, cette valeur tient compte de la fréquence moyenne de renouvellement des installations frigorifiques. La courbe de durée de vie est basée sur cette valeur moyenne et permet de prendre en compte des variations de durée de vie des équipements au sein du parc, de 10 à 20 ans.

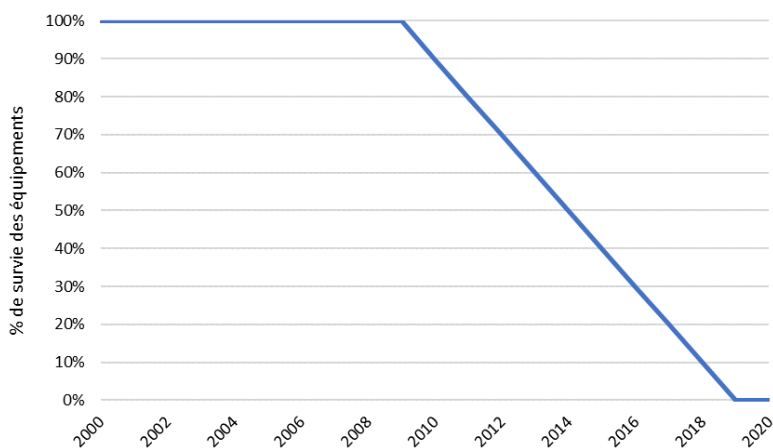


Figure 44 : Courbe de durée de vie pour le froid commercial

2.2 Facteurs d'émissions

2.2.1 A la charge

Pour estimer les facteurs d'émission à la charge, on distingue si les équipements sont chargés d'usine (groupes hermétiques) ou sont chargés sur site (hypermarchés, supermarchés et groupes de condensation). Les facteurs d'émissions utilisés sont issus des Lignes directrices du GIEC de 1996 [Ref 22] et de 2006 [Ref 10]. Pour les années antérieures à 1996 et les années après 2006, ils sont considérés constants.

Tableau 23 - hypothèses de facteurs d'émission à la charge des équipements de froid commercial

	1990	2020
Hypermarchés	4,5 %	2 %
Supermarchés	4,5 %	2 %
Groupes de condensation	4,5 %	2 %
Groupes hermétiques	3,0 %	2 %

2.2.2 Fugitif

Les facteurs d'émissions fugitifs, au cours de la vie des équipements, pour l'ensemble des sous-secteurs du froid commercial, sont donnés Figure 45. Les courbes ont été lissées à partir des données obtenues par retours d'enquêtes de terrain sur les consommations de HFC pour la maintenance des installations sur un échantillon du parc d'équipements, pour certaines années. Ces valeurs sont des moyennes sur le parc de magasins, et incluent les pertes accidentelles.

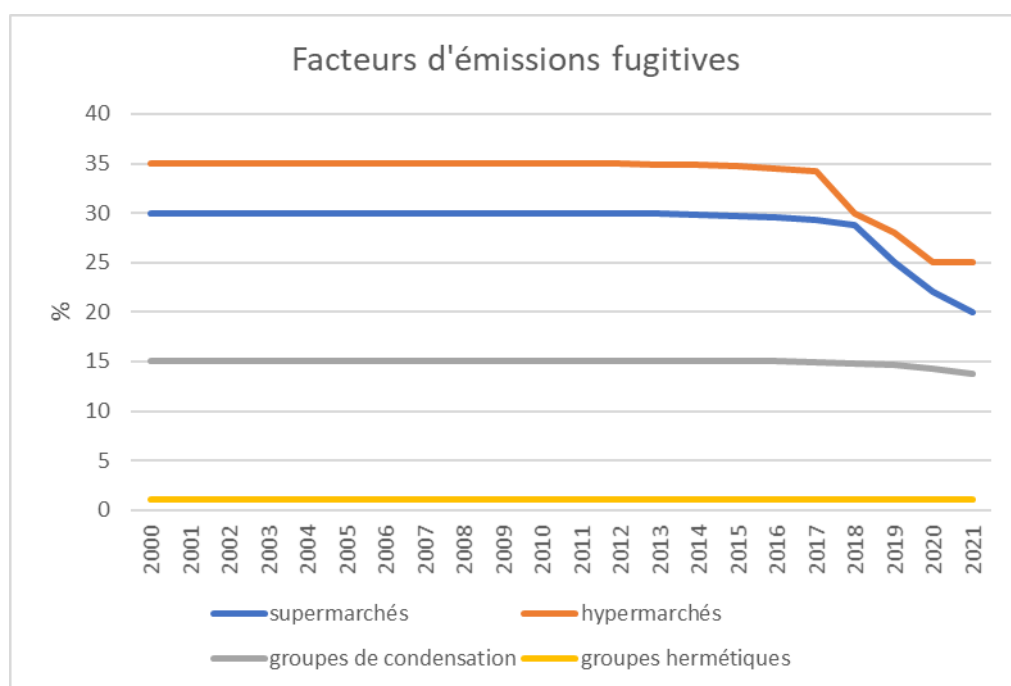


Figure 45 : Facteurs d'émission à l'usage dans le secteur du froid commercial (en %)

Supermarchés

A la suite de données issues d'enquête de terrains et de contrôles réalisés par le ministère de l'Environnement, des niveaux moyens ont pu être établis, régulièrement, sur un échantillon de magasins lors des études inventaires précédentes. Pour les années antérieures à 2013, on estime un taux d'émission fugitif constant de 30 %. Au-delà, on considère, avec l'amélioration des pratiques de maintenance, le renforcement des contrôles d'étanchéité, la généralisation progressive de système de détections de fuites, une diminution de ce taux d'émission à hauteur de 25 % en 2021 [Ref 23].

Hypermarchés

La construction de la courbe d'évolution du taux d'émission fugitifs pour le sous-secteur des hypermarchés est similaire à celle des supermarchés. Avant 2013, on estime un taux constant de 35 %. Au-delà, on considère une diminution de ce taux d'émission à hauteur de 30 % en 2022 [Ref 23] et à hauteur de 25 % en 2035.

Groupes de condensation

Pour les années antérieures à 2017, on considère un taux d'émission fugitif constant de 15 %, valeur issue des anciens rapports d'inventaire. Au-delà on pose l'hypothèse d'une diminution de ce taux à 10 % en 2035 et on évalue la progression par une courbe en S.

Groupes hermétiques

Le taux d'émission fugitif associé aux groupes de condensation est considéré constant à 1 % sur toute la série temporelle, afin de prendre en compte les pertes accidentelles, le système étant hermétique.

2.2.3 A la maintenance

L'évolution du taux d'émission à la maintenance pour le secteur du froid commercial est donnée Figure 46. Le modèle de calcul considère qu'à chaque opération de maintenance des émissions ont lieu sur les quantités rechargées dans l'installation, à cause de la manipulation du fluide frigorigène et de pertes accidentelles. Ce taux est fortement réduit au cours du temps, grâce à l'amélioration des pratiques et à la hausse des prix des HFC sur les années récentes.

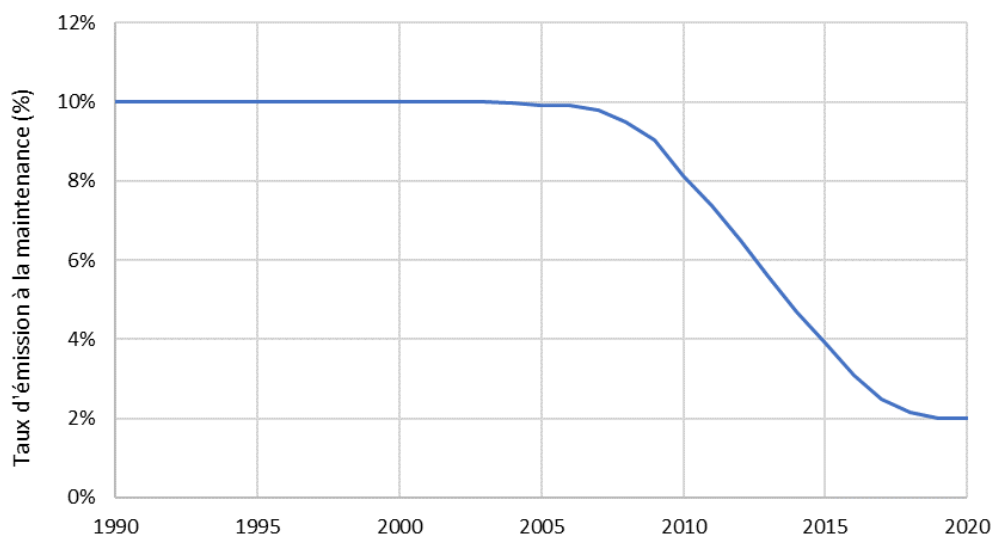


Figure 46 : Taux d'émission à la maintenance - Froid commercial

2.2.4 En fin de vie

Les émissions en fin de vie des équipements dépendent des quantités présentes dans l'équipement quand il atteint sa fin de vie et d'un facteur d'émission fin de vie traduisant l'efficacité des filières de récupération ou de l'opérateur assurant le démantèlement. La méthode de calcul permet d'évaluer la charge réelle de l'équipement au cours de sa durée de vie, tenant compte des occurrences de maintenance, permettant de ne pas surestimer les émissions de fin de vie, la charge de fin de vie tenant compte des émissions fugitives des années précédentes.

Concernant le secteur du froid commercial, ces facteurs ont été estimés avec un modèle de courbe en S (Figure 47).

Pour les hypermarchés et supermarchés, on considère une récupération nulle jusqu'en 1992 et en 2019, on estime ce taux à plus de 94 %.

Concernant les groupes de condensation, on considère une récupération nulle jusqu'en 1992 et en 2019, on estime le taux à près de 55 %. Enfin, pour les groupes hermétiques, on estime une récupération nulle jusqu'en 2000 et en 2019, on estime le taux à près de 23 %.

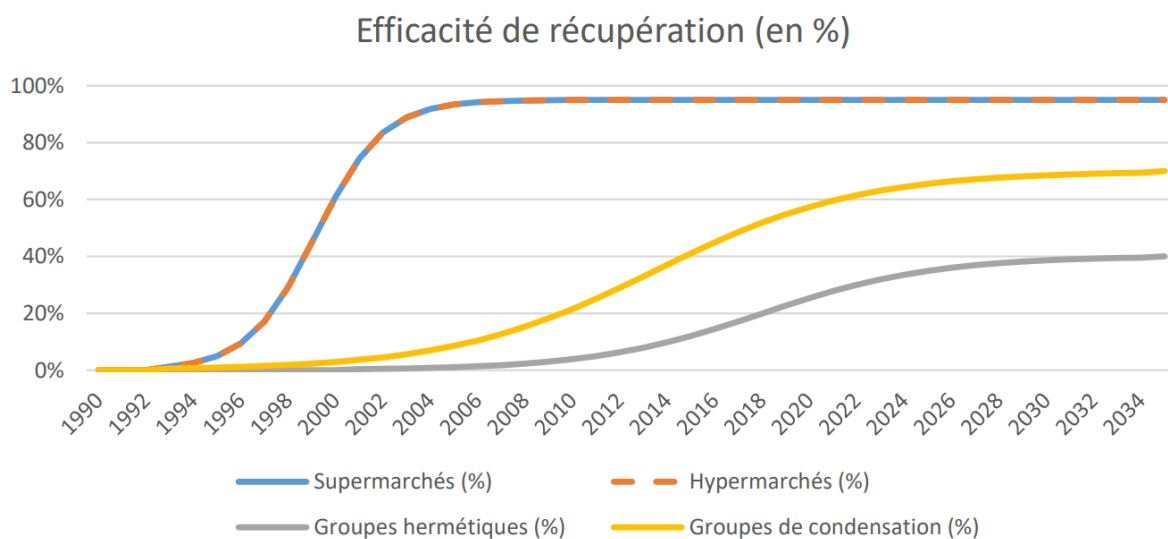


Figure 47 : Efficacité de récupération en fin de vie des équipements dans le secteur du froid commercial

3. Résultats

3.1 Banque

La banque de froid commercial, évaluée à 5 654 t en 2020, est en croissance de 3,4 % par rapport à 2019, notamment du fait de la croissance des parcs d'hypermarchés et de magasins drive.

Le rythme régulier de retrofits des installations aux HCFC a permis d'en éradiquer totalement la banque de froid commercial depuis 2018 (Figure 48). En 2020, les fluides R-134a, R-404A et R-744 forment les trois quarts de la banque : ils représentent respectivement 26 %, 37 % et 11 % (Tableau 24).

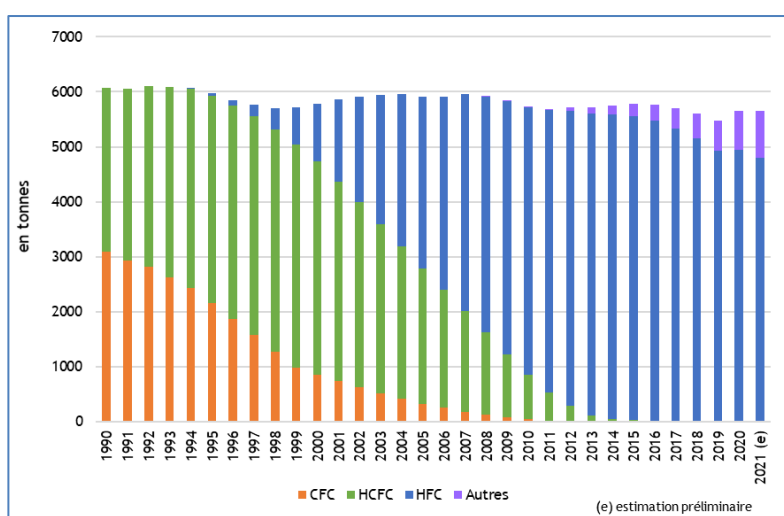


Figure 48 : Banque de fluide dans le secteur du froid commercial

Tableau 24 : Banque 2020

Fluide	2020 (en t)
R-134a	1 477,2
R-404A	2 074,2
R-407A	143,5
R-407C	3,5
R-407F	388,4
R-410A	10,2
R-417A	41,9
R-422D	42,4
R-448A	361,7
R-449A	180,9
R-450A	73,1
R-454C	75,8
R-507	75,3
R-1234yf	0,7
Total HFC	4 949,0
R-290	55,2
R-600a	28,7
R-717	8,3
R-744	612,5
Total Autres	704,7
Total général	5 653,7

3.2 Demande

3.2.1 Besoin pour les équipements neufs

En 2020, la demande pour la production d'équipements de froid commercial en France est principalement constituée de fluides non fluorés (80 %), du fait de la part croissante des hydrocarbures

dans les groupes équipant les petits commerces (Tableau 25). Ces chiffres sont à prendre avec précaution, les données de production étant marquées d'une forte incertitude.

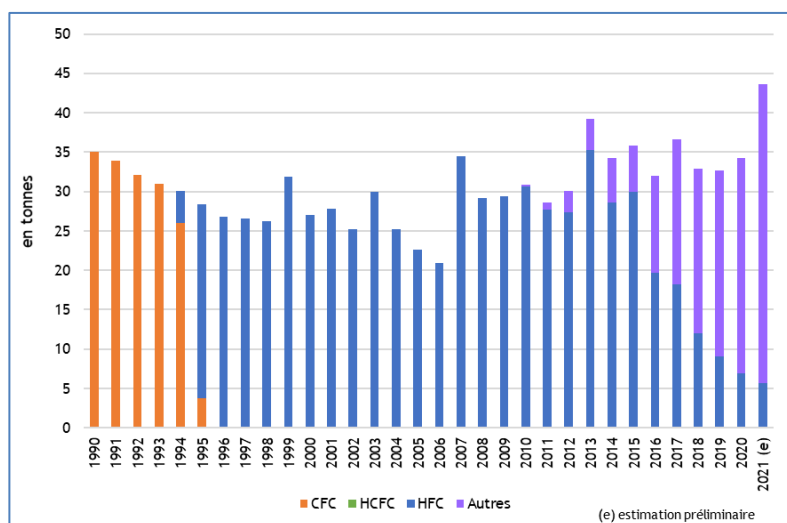


Figure 49 : Quantités requises pour la production d'équipements en France dans le secteur du froid commercial

Tableau 25 : Production 2020

Fluide	2020 (en t)
R-134a	6,3
R-1234yf	0,7
Total HFC	7,0
R-290	12,0
R-600a	7,0
R-744	8,3
Total Autres	27,3
Total général	34,2

Concernant les quantités nécessaires à la charge sur site des équipements de froid commercial, on observe une baisse régulière de la demande depuis 2011 (Figure 50) du fait de la tendance à la réduction des charges induite par l'augmentation du nombre d'installations indirectes ou cascade (diminution du ratio de charge dans les supermarchés de -42 % entre 2011 et 2020 et de -50 % pour les hypermarchés) avec une relative stabilité du parc.

En 2020, on estime que 82 % des quantités mises sur le marché sont des HFC pour 18 % de fluides non fluorés.

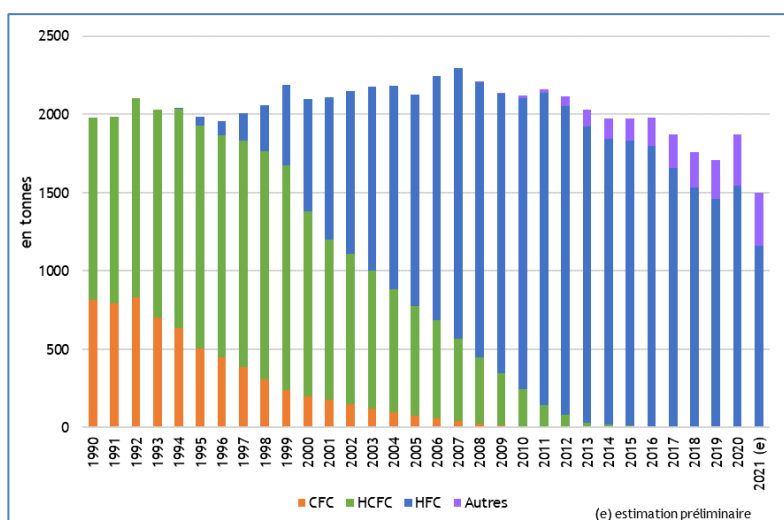


Figure 50 : Besoin en fluides frigorigènes pour la charge sur site des équipements neufs pour le secteur du froid commercial

Tableau 26 : Charges 2020

Fluide	2020 (en t)
R-134a	306,1
R-404A	390,6
R-407A	19,9
R-407C	1,0
R-407F	219,3
R-410A	2,9
R-417A	8,6
R-422D	8,7
R-448A	290,2
R-449A	133,7
R-450A	62,5
R-454C	76,2
R-507	21,1
R-1234yf	0,8
Total HFC	1 541,7
R-290	13,8
R-600a	8,0
R-717	2,4
R-744	308,2
Total Autres	332,4
Total général	1 874,1

3.2.2 Besoin pour la maintenance

Depuis 2008, et plus significativement depuis 2016, on observe une baisse des quantités nécessaires à la maintenance dans le secteur du froid commercial du fait de l'amélioration de pratiques et de la certification des opérateurs. Cette baisse s'est intensifiée depuis 2016 grâce à la généralisation de systèmes de détection de fuites et au contexte récent de pénurie et augmentation des prix des HFC à fort PRG qui incite à une meilleure récupération.

En 2020, on estime que 86 % des quantités requises pour la maintenance sont des HFC contre 14 % de fluides non fluorés.

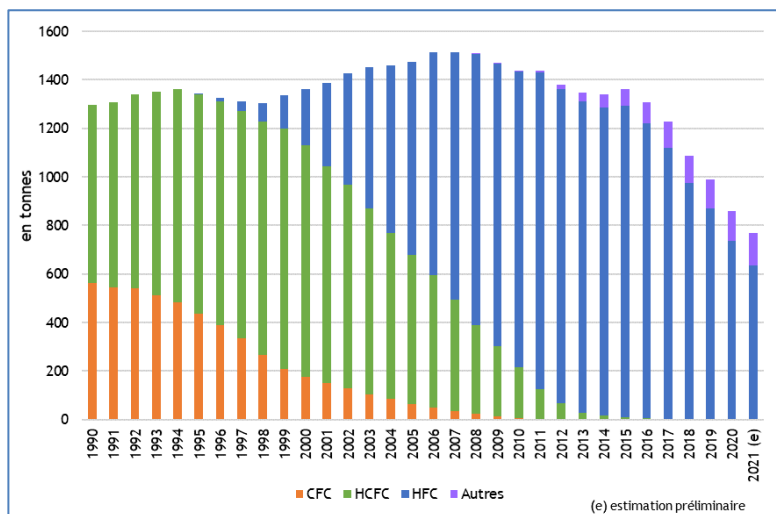


Figure 51 : Besoin en fluides frigorigènes pour la maintenance du parc d'installations dans le secteur du froid commercial

Tableau 27 : Quantités pour la maintenance 2020

Fluide	2020 (en t)
R-134a	194,7
R-404A	339,6
R-407A	17,3
R-407C	0,8
R-407F	57,7
R-410A	2,5
R-417A	7,5
R-422D	7,6
R-448A	40,2
R-449A	43,3
R-450A	4,6
R-454C	3,0
R-507	18,3
Total HFC	737,4
R-717	2,1
R-744	120,8
Total Autres	122,9
Total général	860,3

3.2.3 Besoin pour le retrofit

Ces dernières années, les fluides principalement utilisés pour le retrofit du R-22 et R-404A dans les hypermarchés et supermarchés, sont le R-407F, R-448A, et R-449A.

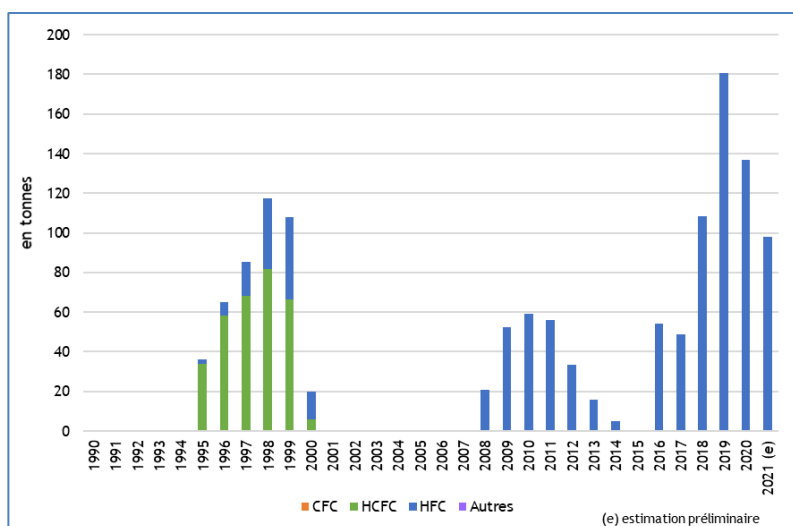


Figure 52 : Besoin en fluides frigorigènes pour le retrofit d'installations dans le secteur du froid commercial

Tableau 28 : Quantités pour le retrofit 2020

Fluide	2020 (en t)
R-407F	27,4
R-448A	54,7
R-449A	54,7
Total HFC	136,9
Total général	136,9

3.3 Emissions

3.3.1 Emissions totales

En 2020, les émissions totales de l'ensemble du secteur du froid commercial sont estimées à environ 1 120 tonnes de fluides frigorigènes (Tableau 29). Les émissions 2020 sont dominées à plus de 80 % par les installations aux fortes charges des supermarchés et hypermarchés et quasi exclusivement constituées de HFC (87 % en 2020).

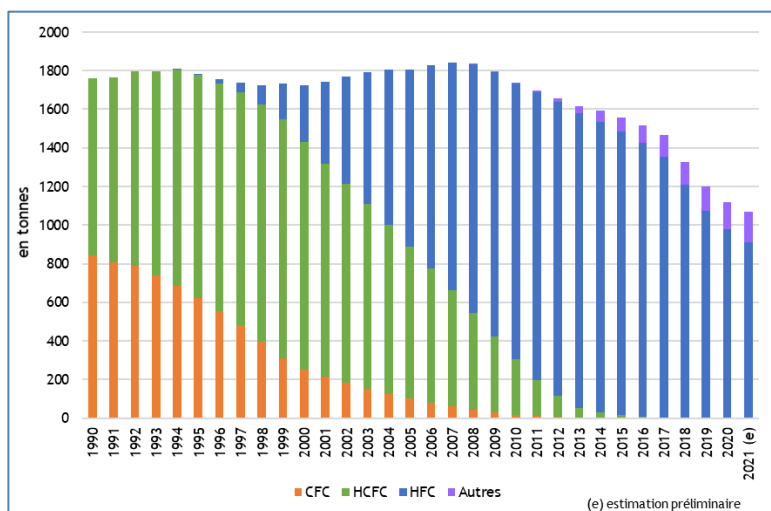


Figure 53 : Emissions totales du froid commercial

Tableau 29 : Emissions totales 2020

Fluide	2020 (en t)
R-134a	258,7
R-404A	426,4
R-407A	28,1
R-407C	0,9
R-407F	82,3
R-410A	2,6
R-417A	7,5
R-422D	7,6
R-448A	73,9
R-449A	45,3
R-450A	13,7
R-454C	13,7
R-507	18,9
R-1234yf	0,0
Total HFC	979,5
R-290	1,0
R-600a	0,5
R-717	2,1
R-744	137,3
Total Autres	140,9
Total général	1 120,4

Les émissions fugitives du froid commercial constituent 94% des émissions du secteur (1 050 tonnes en 2020) principalement composées de R-404A (38 %) et de R-134a (23 %).

On constate une diminution des émissions du secteur depuis la fin des années 2000 (Figure 53) notamment du fait de la tendance à la réduction des charges dans les supermarchés et les hypermarchés et de l'amélioration des pratiques et des facteurs d'émissions (Figure 45, Figure 46, Figure 47), notamment sur ces dernières années.

3.3.2 Emissions CO₂ équivalentes

Alors qu'elles culminaient à plus de 8,49 millions de tonnes de CO₂ en 1990, les émissions du froid domestique ne représentent plus que 2,58 millions de tonnes de CO₂ en 2020 et sont amenées à décroître encore avec la généralisation de l'utilisation de fluides à PRG plus faibles (Figure 54).

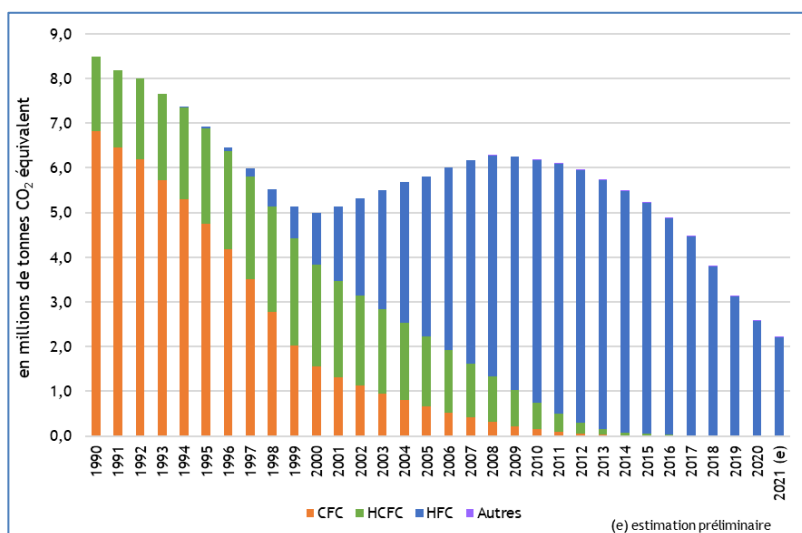


Figure 54 : Emissions CO₂ équivalentes du froid commercial (millions de tonnes)

Tableau 30 : Emissions CO₂eq. 2020

Fluide	2020 (Mt CO ₂ e)
R-134a	0,37
R-404A	1,67
R-407A	0,06
R-407C	0,00
R-407F	0,15
R-410A	0,01
R-417A	0,02
R-422D	0,02
R-448A	0,10
R-449A	0,10
R-450A	0,01
R-454C	0,00
R-507	0,08
R-1234yf	0,00
Total HFC	2,58
R-290	0,00
R-600a	0,00
R-744	0,00
Total Autres	0,00
Total général	2,58

V. Secteur des transports frigorifiques

1. Introduction

Le secteur des transports frigorifiques se compose de 3 sous-secteurs : les navires réfrigérés, les conteneurs frigorifiques autonomes et le transport routier. Ce dernier est scindé en 2 catégories :

- les véhicules équipés de groupes frigorifiques autonomes de type « moteur thermique », rencontrés généralement sur les remorques ou semi-remorques ;
- les véhicules équipés de groupes de type « poulie-courroie » accouplés au moteur et installés sur les véhicules plus petits.

Les navires réfrigérés correspondent aux cales réfrigérées ou « reefers », c'est-à-dire les navires équipés de leurs propres systèmes de production frigorifique. On distingue plusieurs types de navires réfrigérés : les navires congélateurs, les transporteurs de palettes, les transporteurs en vrac ou les navires citernes (pour le transport des jus notamment).

Les conteneurs frigorifiques autonomes sont indépendants du mode de transport et sont véhiculés par train, camion ou bateau (porte-conteneurs). Les portes conteneurs sont apparus dans les années 1970 et sont devenus le principal mode de fret maritime et leur nombre continue de croître.

Modes de charge

Pour le secteur des transports frigorifiques, il est considéré que :

- les systèmes de type « poulie-courroie » sont chargés sur le site de production des remorques ou semi-remorques,
- les véhicules équipés de groupes frigorifiques autonomes de type « moteur thermique » sont chargés en usine de production,
- les cales réfrigérées des navires sont chargées sur place,
- les conteneurs frigorifiques sont chargés d'usine.

Modes de maintenance

Il est considéré que ces équipements subissent une opération de maintenance dès lors que leur charge de réfrigérant passe en deçà d'un certain seuil et que la maintenance consiste en un complément de charge sans décharge complète de l'équipement.

Tableau 31 - prise en compte de la maintenance dans la méthode de calcul pour le transport frigorifique

Sous-secteur	Rythme de maintenance	Seuil	Décharge complète lors de la maintenance ?
Véhicules utilitaires réfrigérés légers	selon seuil	70 %	non
Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	selon seuil	70 %	non
Cales réfrigérées	selon seuil	70 %	non
Conteneurs frigorifiques	selon seuil	80 %	non

Durée de vie moyenne

L'hypothèse de durée de vie moyenne des équipements est de 10 ans pour les équipements du transport routier, de 20 ans pour les conteneurs frigorifiques et de 30 ans pour les navires équipés de cales réfrigérées [Ref 5]. Des courbes de durée de vie y sont associées, comme pour les autres secteurs.

2. Données et hypothèses

2.1 Données d'activités

2.1.1 Marchés et productions

MARCHES

Véhicules utilitaires réfrigérés légers

Le parc circulant en France être calculé à partir des marchés annuels de véhicules utilitaires légers réfrigérés.

Les marchés historiques (avant 2000) ont été reconstitués à partir des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 5] et d'hypothèses sur les taux de croissance du sous-secteur. De 2002 à 2016, les données de marchés des véhicules frigorifiques ont été transmises par l'association Carcoserco (ou Fédération Française de carrosserie). Depuis 2018, le marché national est estimé à partir des communications de la Fédération Française de Carrosserie (FFC) [Ref 24].

Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques

Les marchés annuels de remorques et de semi-remorques ont été reconstitués de la même façon que pour les véhicules utilitaires légers réfrigérés.

Reefers

La flotte maritime de navires réfrigérés est estimée au niveau mondial, seules des statistiques globales étant disponibles. Au niveau mondial, le marché est équivalent à la production. Il est considéré qu'une part de 10 % peut être attribuée à la France [Ref 5], ce taux pourra être reconsidéré selon les données disponibles.

Les marchés historiques (avant 2004) ont été reconstitués à partir des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 5] et d'hypothèses sur les taux de croissance du sous-secteur. Les marchés des années plus récentes ont été estimés à l'aide de données disponibles sur le site MarineTraffic et des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 5].

Conteneurs frigorifiques

Comme pour la flotte de navires réfrigérés, seules des statistiques mondiales sont disponibles, le marché national de conteneurs réfrigérés est supposé égal à 10 % du marché mondial. Les conteneurs frigorifiques étant chargés d'usine, la production française risque par cette méthode d'être surestimée, les résultats concernant le transport maritime sont donc à prendre avec précaution.

Les marchés historiques et récents ont été estimés à partir des anciens rapports d'inventaires de fluides frigorigènes [Ref 5] et du Container Handbook [Ref 25].

Le transport frigorifique par voie ferroviaire est peu développé en France : environ une centaine de wagons selon les anciens rapports d'inventaires d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 5]. Compte tenu de la similarité des technologies utilisés, le transport ferroviaire réfrigéré est supposé être comptabilisé dans le parc total de conteneurs frigorifiques.

PRODUCTIONS

Les données de production des véhicules du transport routier frigorifique sont issues de communications du Cemafruid pour les rapports d'inventaires antérieurs [Ref 5] et extrapolées sur 2017-2020.

Tableau 32 : Productions estimées des groupes frigorifiques pour le transport routier

Types	1990	2000	2010	2020
Véhicules utilitaires réfrigérés légers	1 526	2 690	5 570	5 915
Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	6 511	10 800	16 150	22 284

Pour les reefers et les conteneurs frigorifiques qui sont traités à l'échelle mondiale, le marché est supposé égal à la production.

Tableau 33 : Flotte mondiale de navires réfrigérés et de conteneurs frigorifiques

Types	1990	2000	2010	2020
Flotte de reefers	896	1 191	1 048	554
Flotte de conteneurs réfrigérés	294 000	848 000	1 702 000	2 950 000
Marché de conteneurs réfrigérés	36 463	105 173	91 000	214 845

2.1.2 Charge nominale

Concernant le transport routier, les charges sont estimées à partir des données issues d'enquêtes auprès des fabricants recensées dans les anciens rapports d'inventaires [Ref 5] et de communications du Petit Forestier [Ref 26]. Les charges des équipements du transport routier sont considérées constantes jusqu'en 2006 et, selon les communications des fabricants, en baisse progressivement depuis 2007.

Tableau 34 - Evolution des niveaux de charge nominale des équipements frigorifiques du transport routier

Charge nominale (kg)	Avant 2006	2010	2015	2020
Véhicules utilitaires réfrigérés légers	2,50	2,20	2,19	2,03
Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	7,20	6,72	6,74	6,62

Pour le transport maritime, les charges sont estimées à partir des anciens rapports d'inventaires [Ref 5]. Les charges des navires à cales réfrigérées sont supposées constantes jusqu'en 2000, puis une réduction de charge est prise en compte, liée à l'utilisation de systèmes indirects. Faute de données plus précises, la charge des conteneurs réfrigérés est supposée constante sur la toute la série temporelle.

Tableau 35 - charges nominales des équipements frigorifiques du transport maritime

Charge nominale (kg)	Avant 2000	2021
Reefers (t)	4	1
Conteneurs réfrigérés (kg)	4,6	4,6

2.1.3 Fluides frigorigènes utilisés

Véhicules utilitaires réfrigérés légers

Entre 1970 et 1990 on considère que l'ensemble du parc de véhicules utilitaires réfrigérés légers fonctionnaient au R-12. Il est considéré qu'au début des années 1990, une transition s'opère vers des systèmes chargés au R-134a et qu'il est utilisé à 100 % dans les véhicules équipés de groupes de type « poulie-courroie » jusqu'au début des années 2000. Ces hypothèses ont été définies en prenant en compte le rapport RTOC de 1998 [Ref 21], les anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 5] et de l'évolution de la réglementation internationale. A partir de 2003, le R-134a fait progressivement place au R-404A qui devient prépondérant après 2010. A partir de 2016, le R-452A apparaît en tant que HFC à plus bas PRG pouvant substituer le R-404A, puis le R-744 et le R-450A commencent à être introduits sur le marché en 2020. L'évolution des fluides frigorigènes utilisés a été estimée sur la base :

- des données fournies par les anciens rapports des inventaires d'émissions des fluides frigorigènes [Ref 5], incluant des communications de Carrier et du Cemafruid,
- d'échanges avec Petit Forestier [Ref 26],
- d'échanges avec l'European Partnership for Energy and the Environment (EPEE) [Ref 20].

Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques

Jusqu'au milieu des années de 90, les camions et semi-remorques frigorifiques étaient chargés au R-502, principalement, et au R-22. Ces fluides ont progressivement laissé place au R-404A dont l'utilisation est généralisée à tous les véhicules équipés de groupes frigorifiques autonomes de type « moteur thermique ». Ces hypothèses ont été définies en s'appuyant sur le rapport RTOC de 1998 [Ref 21] et les anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 5].

Jusqu'en 2007, le R-404A est le seul fluide utilisé pour les camions et semi-remorques. A partir de 2008, le R-134a est introduit. Les hypothèses d'évolution des fluides frigorigènes utilisés sont basées sur les tendances fournies par le Cemafruid. Le R-452A apparaît sur le marché en 2016 et est majoritairement utilisé en 2020. En 2020, sont également introduits d'autres fluides de PRG plus faible que le R-404A tels que le R-450A ou le R-744. La répartition des fluides utilisés a été estimée sur la base des mêmes éléments que pour les véhicules utilitaires légers.

Reefers

Entre 1970 et 2000, le R-22 et le R-12 constituent les 2 fluides utilisés dans les cales frigorifiques des navires, la part du R-12 diminuant rapidement sur les dernières années selon les données communiquées dans le rapport RTOC de 2002 [Ref 27]. Depuis 2000, le R-404A, le R-410A, le R-407C, le R-290 et le R-717 ont progressivement remplacé le R-22. On considère que le R-22 n'est plus utilisé dans les nouveaux navires à partir de 2018. Ces résultats reposent principalement sur les rapports RTOC et la prise en compte de l'évolution de la réglementation internationale.

Conteneurs frigorifiques

Les hypothèses d'évolution des fluides frigorigènes utilisés dans les conteneurs frigorifiques sont présentées Figure 55. Jusqu'en 1993, sur la base du rapport RTOC de 1998 [Ref 21] on estime que l'ensemble des conteneurs frigorifiques sont chargés au R-12. Ce réfrigérant laisse rapidement sa place au R-134a qui a été le réfrigérant le plus utilisé pour ce sous-secteur. Plus récemment, de nouveaux fluides frigorigènes sont apparus en remplacement du R-134a : le R-513A, le R-513B, le R456A et le R-744. Ces hypothèses se basent principalement sur les rapports RTOC.

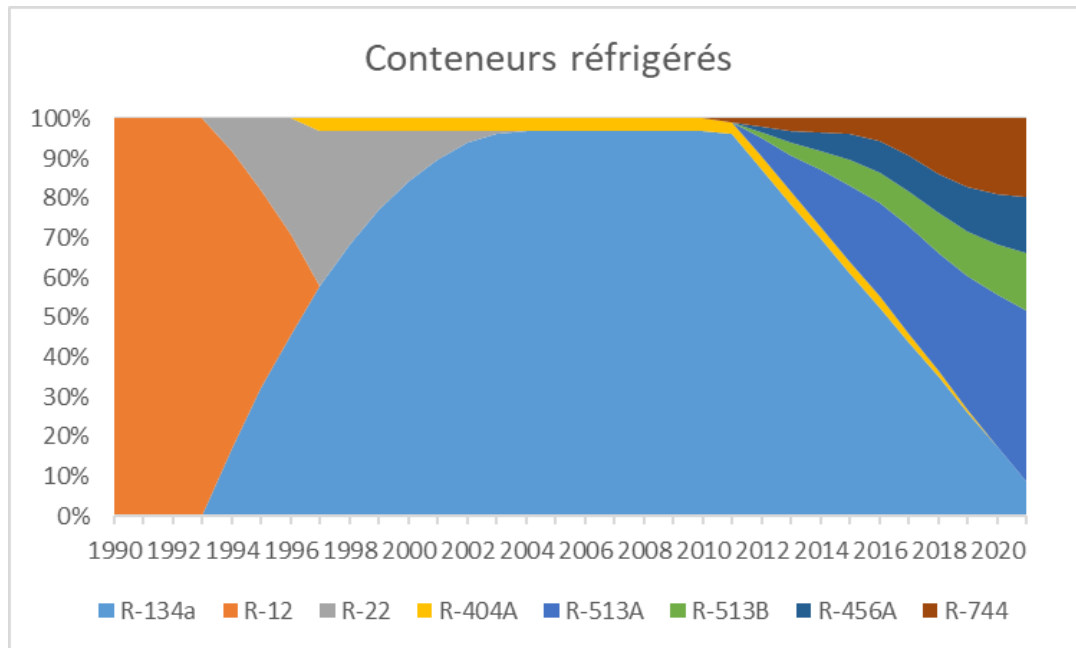


Figure 55 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les conteneurs frigorifiques (transport maritime)

2.1.4 Durée de vie

Les courbes de durées de vie du secteur du transport frigorifique sont présentées ci-dessous et sont construites sur la base de durées de vies des équipements : 30 ans pour les reefers, 15 ans pour les conteneurs réfrigérés et 10 ans pour les véhicules routiers réfrigérés.

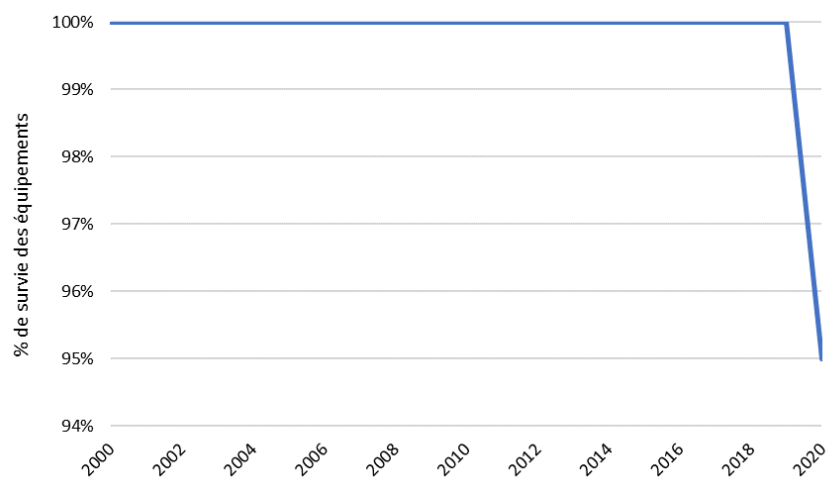


Figure 56 : Courbe de durée de vie pour les reefers

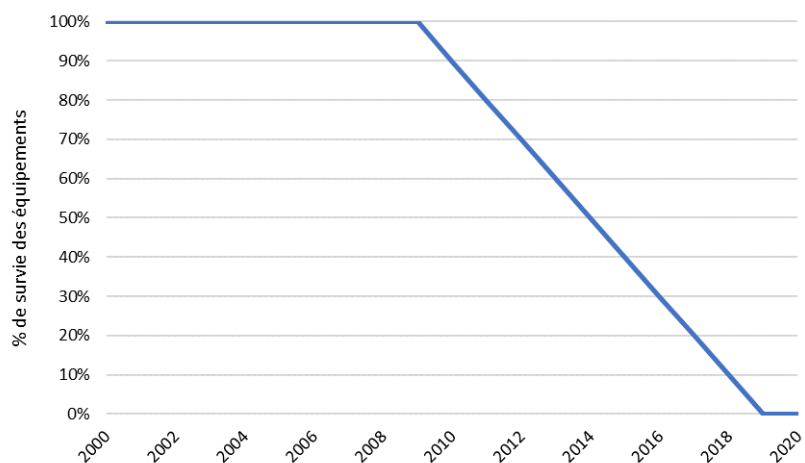


Figure 57 : Courbe de durée de vie pour les conteneurs frigorifiques

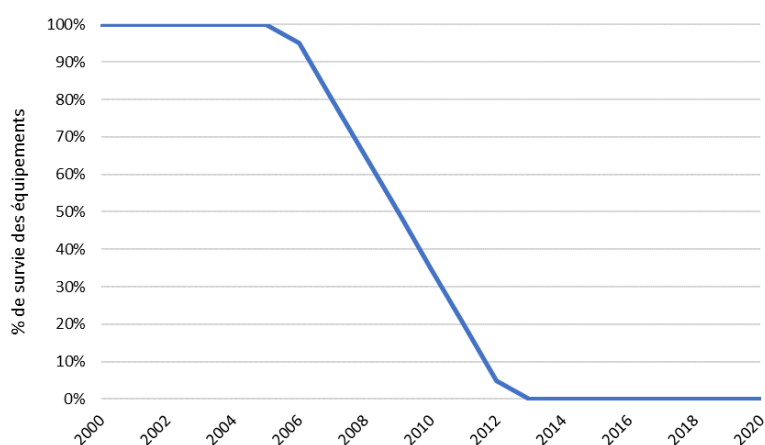


Figure 58 : Courbe de durée de vie pour le transport frigorifique routier

2.2 Facteurs d'émissions

2.2.1 A la charge

Les hypothèses concernant les facteurs d'émission à la charge sont issues des Lignes directrices du GIEC de 1996 [Ref 22] et de 2006 [Ref 10]. Pour les années antérieures à 1996 et les années après 2006, ils sont considérés constants.

Tableau 36 - Facteurs d'émissions à la charge pour le transport frigorifique

	1990	2020
Reefers	5,0 %	1,0 %
Conteneurs frigorifiques	3,0 %	1,0 %
Véhicules utilitaires réfrigérés légers	5,0 %	1,0 %
Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	3,0 %	1,0 %

2.2.2 Fugitif

Les facteurs d'émissions à l'usage pour l'ensembles des sous-secteurs du transport frigorifique sont donnés Tableau 37.

Tableau 37 - Facteurs d'émissions fugitives 2020 pour les applications du transport frigorifique

2020	VUL réfrigérés	Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	Reefers	Conteneurs frigorifiques
Facteur d'émission fugitif	18 %	12 %	15 %	20 %

Véhicules utilitaires réfrigérés légers et Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques

Les hypothèses prises en compte pour les facteurs d'émission proviennent en partie des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 5]. Depuis 2014 ces facteurs d'émission sont calculés sur la base de données communiquées par Petit Forestier [Ref 26].

Reefers et conteneurs frigorifiques

Pour les années antérieures à 1995, le facteur d'émission est considéré constant égal à 35 % sur la base des données du rapport RTOC de 1998 [Ref 21]. Une baisse est prise en compte pour atteindre 15% en 2016, sur la base des anciens rapports d'inventaires [Ref 5].

2.2.3 A la maintenance

L'évolution du taux d'émission à la maintenance pour le secteur du transport frigorifique ci-dessous.

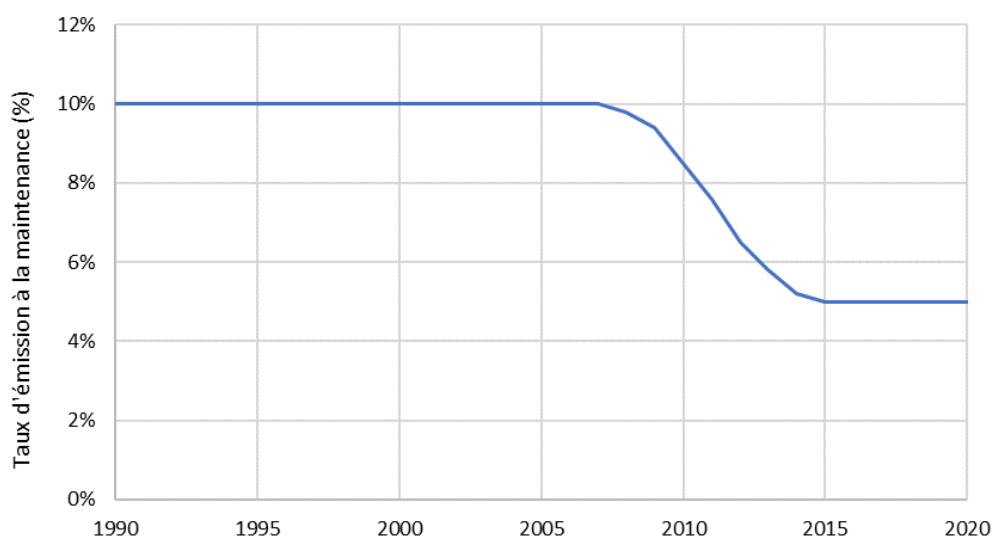


Figure 59 : Taux d'émissions à la maintenance - transports frigorifiques

2.2.4 En fin de vie

Dans le secteur du transport routier, la récupération des fluides est supposée débiter aux termes du règlement (CE) no 3093/9. L'évolution de la récupération est supposée suivre une courbe en S atteignant une valeur de 70 % en 2020. Ce niveau est à confirmer.

Pour le transport maritime, il est également pris en compte une évolution de la récupération en fin de vie selon une courbe en S mais avec une évolution plus lente. Il est supposé que la récupération commence dans les années 1990 pour atteindre 40 % en 2020 pour les reefers et 50 % pour les conteneurs.

Tableau 38 - Facteurs d'émission en fin de vie des équipements du transport frigorifique

2020	VUL réfrigérés	Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	Reefers	Conteneurs frigorifiques
Facteur d'émission de fin de vie	30 %	30 %	60 %	50 %

3. Résultats

3.1 Banque

La banque du transport frigorifique, évaluée à près de 2 000 tonnes en 2020 (Tableau 39). Elle est dominée à 70 % par les conteneurs réfrigérés suivis des systèmes autonomes équipant les camions frigorifiques à 17 %.

La banque est en croissance régulière, de 1,7 % par rapport à 2019, notamment du fait de la croissance de la flotte des conteneurs frigorifiques qui augmente de 3 à 5 % par an sur les dix dernières années.

En 2020, le R-134a et R-404A constituent plus de 60 % de la banque. Le R-134a très utilisé historiquement dans les conteneurs frigorifiques représente 48% de la banque et le R-404A, majoritairement utilisé en transport frigorifique routier, pour les systèmes autonomes des camions représente 14% de la banque.

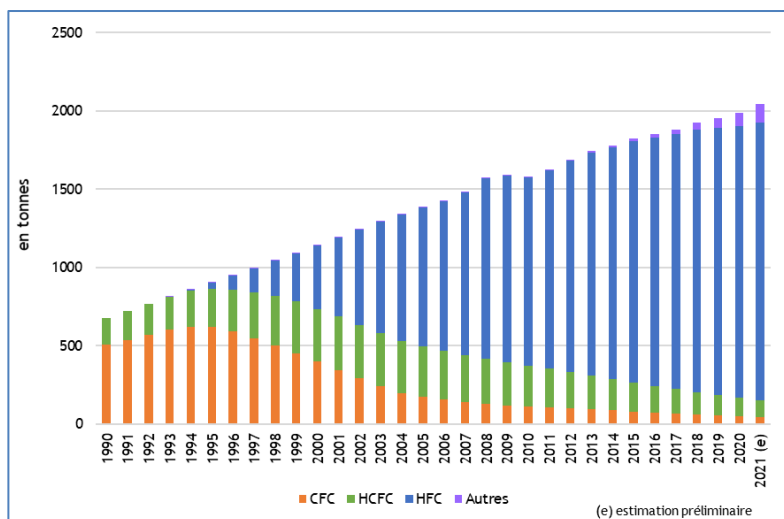


Figure 60 : Banque de fluide dans le secteur du transport frigorifique

Tableau 39 : Banque 2020

Fluide	2020 (en t)
R-12	48,0
Total CFC	48,0
R-22	118,8
Total HCFC	118,8
R-134a	954,2
R-404A	270,1
R-407C	2,1
R-410A	1,3
R-450A	5,8
R-452A	156,5
R-456A	68,9
R-513A	206,8
R-513B	68,9
Total HFC	1 734,6
R-290	0,0
R-717	1,5
R-744	85,9
Total Autres	87,4
Total général	1 988,9

3.2 Demande

3.2.1 Besoin pour les équipements neufs

Le besoin en fluides frigorigènes pour les équipements neufs est évalué à près de 500 tonnes en 2020. Un quart de cette demande est liée à la production d'équipements, qui peut être surestimée étant données les incertitudes sur les niveaux de production en France et la prise en compte des conteneurs réfrigérés. Cependant, cette incertitude n'influe que sur les émissions à la charge et le facteur d'émissions est faible. Cette demande est principalement constituée de HFC (83 % en 2020), notamment de R-513A (34 %). On constate une pénétration du marché par les fluides non fluorés depuis 2011. En 2020, ceux-ci représentent 18 % des quantités nécessaires à la production d'équipements en France.

Pour la charge des équipements sur site, le principal fluide utilisé reste le R-134a avec 38 % du marché en 2020.

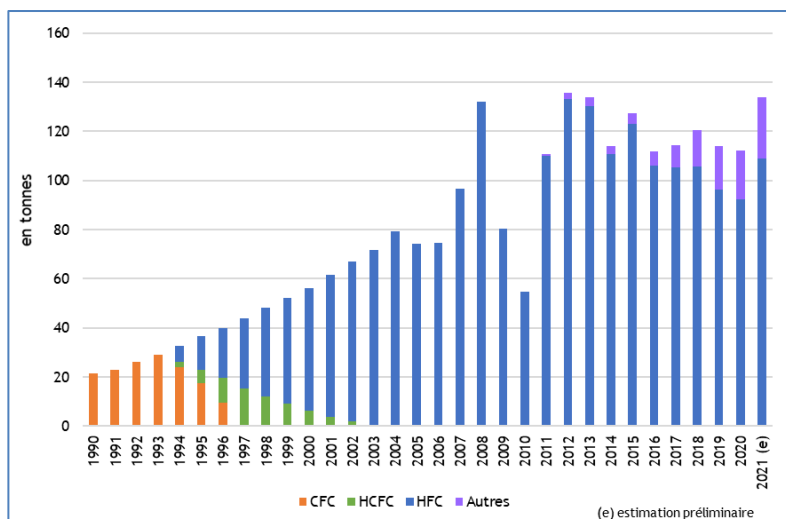


Figure 61 : Quantités nécessaires à la production dans le secteur du transport frigorifique

Tableau 40 : production 2020

Fluide	2020 (en t)
R-134a	17,9
R-450A	1,2
R-452A	9,9
R-456A	12,7
R-513A	38,1
R-513B	12,7
Total HFC	92,4
R-744	19,6
Total Autres	19,6
Total général	111,9

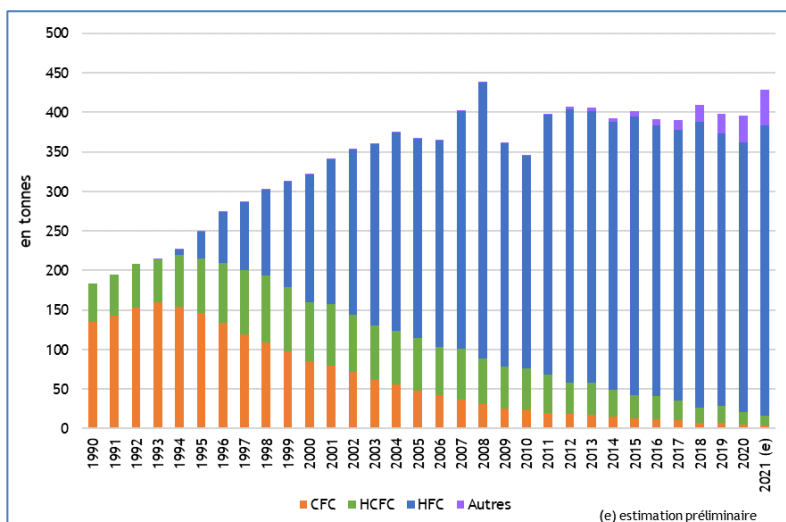


Figure 62 : Quantités nécessaires à la charge des équipements sur site pour le secteur du transport frigorifique

Tableau 41 : charges sur site 2020

Fluide	2020 (en t)
R-12	5,3
Total CFC	5,3
R-22	15,9
Total HCFC	15,9
R-134a	149,5
R-404A	28,6
R-407C	0,33
R-410A	0,21
R-450A	6,3
R-452A	52,5
R-456A	20,6
R-513A	61,9
R-513B	20,6
Total HFC	340,6
R-290	0,01
R-717	0,30
R-744	33,4
Total Autres	33,7
Total général	395,5

3.2.2 Besoin pour la maintenance

La tendance à la baisse des facteurs d'émissions permet d'observer une stabilisation des quantités nécessaires à la maintenance dans le secteur du transport frigorifique malgré une croissance de la banque, les taux d'émissions des conteneurs étant particulièrement bas. En 2020, on estime que 87 % des quantités requises pour la maintenance sont des HFC, soit 165 tonnes.

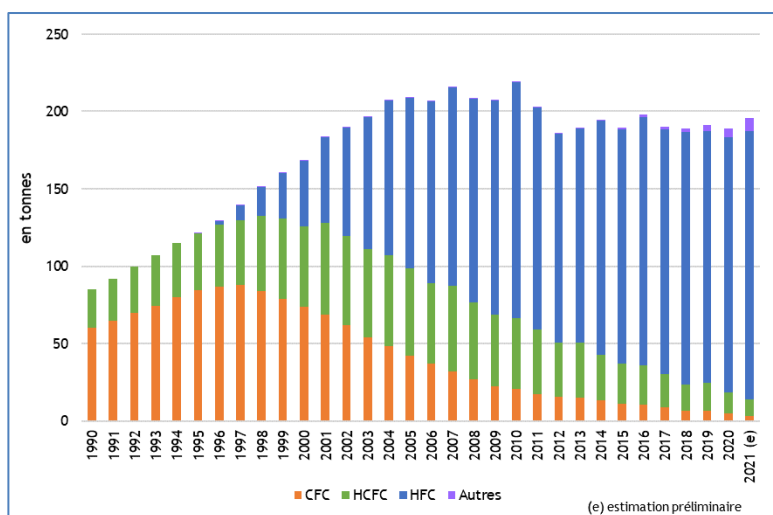


Figure 63 : Besoin pour la maintenance dans le secteur du transport frigorifique

Tableau 42 : Quantités pour la maintenance 2020

Fluide	2020 (en t)
R-12	4,6
Total CFC	4,6
R-22	13,9
Total HCFC	13,9
R-134a	107,8
R-404A	24,9
R-407C	0,27
R-410A	0,16
R-452A	5,8
R-456A	5,3
R-513A	15,8
R-513B	5,3
Total HFC	165,1
R-290	0,00
R-717	0,15
R-744	5,2
Total Autres	5,3
Total général	188,9

3.3 Emissions

3.3.1 Emissions totales

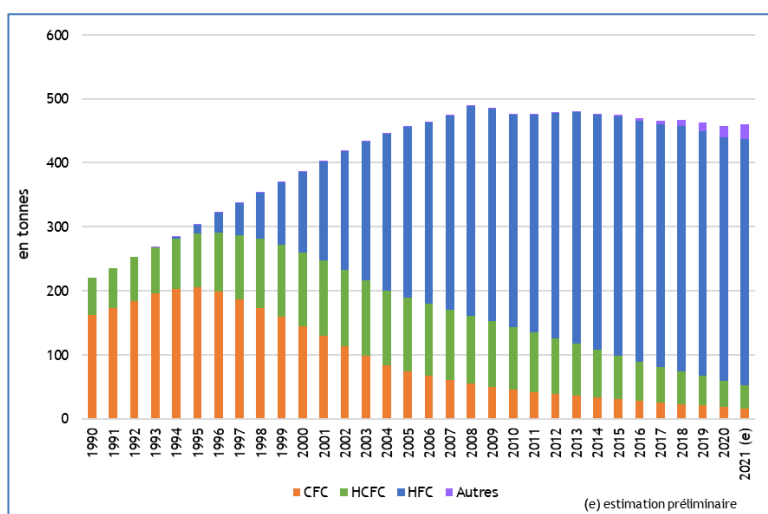


Figure 64 : Emissions totales du transport frigorifique

Tableau 43 : Emissions totales 2020

Fluide	2020 (en t)
R-12	18,2
Total CFC	18,2
R-22	41,3
Total HCFC	41,3
R-134a	230,8
R-404A	53,3
R-407C	0,49
R-410A	0,29
R-450A	0,9
R-452A	23,6
R-456A	14,2
R-513A	42,7
R-513B	14,2
Total HFC	380,6
R-290	0,01
R-717	0,34
R-744	17,4
Total Autres	17,8
Total général	457,8

Le niveau 2020 des émissions totales dues à l'ensemble du secteur du transport frigorifique est estimé à environ 458 tonnes de fluides frigorigènes (Tableau 43) dont plus de 80 % proviennent du transport maritime. Les émissions 2020 sont dominées à plus de 83 % par le HFC.

Contrairement à la banque qui est en augmentation constante, on constate une diminution des émissions du secteur (Figure 64), en lien avec la baisse des taux d'émission fugitifs des équipements, les émissions fugitives représentant 91% des émissions totales du secteur.

3.3.2 Emissions CO₂ équivalentes

Alors qu'elles culminaient à plus de 2 millions de tonnes de CO₂ en 1990, les émissions du transport frigorifique ne représentent plus que 910 milliers de tonnes de CO₂ en 2020 grâce à l'introduction des nouveaux réfrigérants et à la baisse des taux d'émissions fugitives (Figure 65).

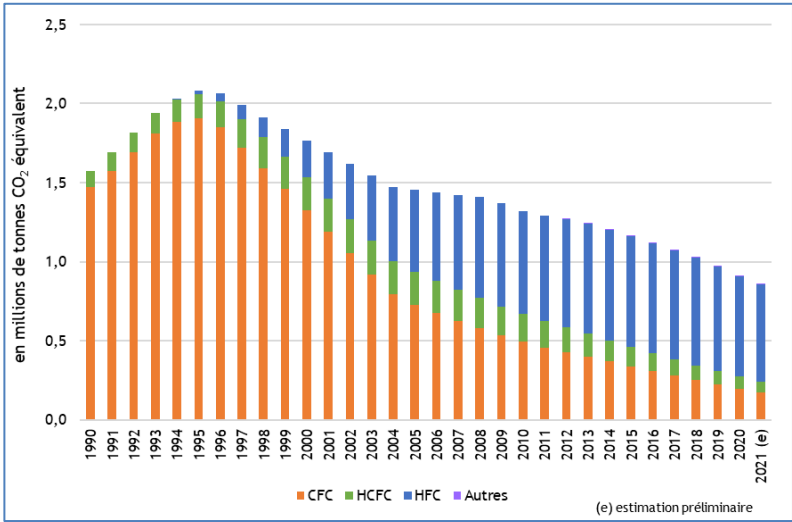


Figure 65 : Emissions CO₂ équivalentes du transport frigorifique (millions de tonnes)

Tableau 44 : Emissions CO₂eq. 2020

Fluide	2020 (Mt CO ₂ e)
R-12	0,20
Total CFC	0,20
R-22	0,07
Total HCFC	0,07
R-134a	0,33
R-404A	0,21
R-407C	0,001
R-410A	0,001
R-450A	0,001
R-452A	0,05
R-456A	0,01
R-513A	0,03
R-513B	0,01
Total HFC	0,64
R-290	0,000
R-744	0,000
Total Autres	0,000
Total général	0,91

VI. Secteur du froid industriel

1. Introduction

Ce secteur a été entièrement revu pour cette édition d'inventaire. La méthode de calcul a été revue et intégrée dans l'outil gaz fluorés du Citepa et de pouvoir prendre en compte la réduction des charges nominales des installations au cours du temps. Une large enquête de terrain auprès des fédérations industrielles a débuté. Les premiers retours, de l'industrie agroalimentaire du lait notamment, sont pris en compte et ont un impact sur l'historique des émissions. Certaines tendances ont été étendues aux autres secteurs agroalimentaires et seront à confirmer l'an prochain. Les résultats de calcul de ce secteur sont donc à prendre avec précaution, ils pourront évoluer dans la prochaine édition avec des compléments d'information en attente de certains sous-secteurs.

Le secteur du froid industriel inclut principalement les installations centralisées de l'industrie agroalimentaire et celles dédiées au refroidissement de certains procédés industriels : chimie, pharmacie et caoutchouc. Il est considéré que le refroidissement des data centers est assuré au moyen de groupes refroidisseurs à eau et est déjà comptabilisé dans le secteur des chillers. Plus généralement, une partie du froid industriel utilise des chillers pour assurer le refroidissement d'une partie du processus de production.

Il convient de souligner que le secteur du froid industriel est marqué d'une forte confidentialité et peu d'informations sont disponibles ou communiquées pour permettre d'améliorer l'estimation de ce secteur ou vérifier l'exhaustivité des procédés à prendre en compte. Cependant, cette année, une collaboration commence à être mise en place avec des fédérations du froid agroalimentaire, de l'industrie du lait et de la viande en particulier.

Ce secteur est décomposé en 7 sous-secteurs :

- l'industrie agroalimentaire de la viande ;
- l'industrie agroalimentaire du lait ;
- les autres industries agroalimentaires, regroupées pour cet inventaire mais qui pourront être décomposées ultérieurement ;
- les entrepôts réfrigérés ;
- l'industrie chimique ;
- l'industrie pharmaceutique ;
- l'industrie du caoutchouc.

Modes de charge

Les installations centralisées des entreprises agroalimentaires, entrepôts et procédés industriels sont chargées sur site.

Modes de maintenance

Les installations de froid industriel ont, le plus souvent, des charges élevées, rendant, en pratique, obligatoires plusieurs contrôles d'étanchéité par an. Il est considéré, dans les hypothèses du modèle, qu'une opération annuelle de maintenance a lieu, au cours de laquelle les quantités rechargées correspondent aux quantités perdues par émissions fugitives la même année.

Durée de vie moyenne

Les installations de froid industriel ont des durées de vie élevées, considérées de 20 ans en moyenne. Une courbe de durée de vie est construite de façon à prendre en compte une variabilité des durées de vie au sein d'un même millésime d'équipements.

2. Données et hypothèses

2.1 Données d'activités

Pour les grandes installations de froid industriel, les besoins en froid peuvent être estimés à partir des productions et de ratios caractéristiques [Ref 5] :

- le ratio de charge en fluide frigorigène par kW (kg/kW) pour les systèmes à détente directe et pour les installations indirectes, en froid positif et en froid négatif ; ces ratios dépendent des systèmes et sont considérés communs à l'ensemble du froid industriel ;
- le ratio de puissance frigorifique nécessaire par tonnage produit (kW/t) ; ce ratio est propre à chaque sous-secteur de l'industrie agroalimentaire ou des procédés industriels et doit être affiné par l'enquête de terrain ;
- la part des systèmes indirects sur l'ensemble des installations (kW indirect/kW total) ;

Ces ratios varient au cours du temps et permettent ainsi de prendre en compte la tendance à la réduction des charges moyennes et la pénétration croissante des systèmes indirects.

2.1.1 Marchés et productions

PRODUCTIONS

Industrie Agroalimentaire (IAA)

Les productions agroalimentaires sont estimées à partir des publications de la base de données de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) [Ref 29]. Celles-ci sont mises à jour avec un certain délai et présentent 1 à 3 ans de décalage par rapport à l'année en cours, selon les productions.

Les productions agroalimentaires prises en compte sont celles de la viande, du lait et produits laitiers et les autres productions agroalimentaires (surgelés, poisson, chocolat, brasseries, etc.). Dans l'attente de données complémentaires issues de l'enquête de terrain, les productions agroalimentaires autres que celles de la viande et du lait ont été rassemblées en un seul sous-secteur « autres productions », les ratios caractéristiques n'ayant pas pu être revus.

Entrepôts réfrigérés

Les entrepôts frigorifiques sont distincts, dans le calcul, de l'industrie agroalimentaire même si une partie des entrepôts est utilisé par l'IAA (8 % en 2010).

Tableau 45 - Répartition des surfaces d'entrepôts frigorifiques en France - Insee 2012

	en milliers de m ²			
	Ensemble	Température		
		Positive	Négative	Mixte*
Ensemble	11 648	6 501	1 026	4 120
IAA (yc agriculture)	925	438	299	187
Industrie	931	867	0	64
Commerce	4 337	2 197	99	2 041
Transports et entreposage (yc conditionnement)	4 943	2 591	628	1 724
Autres services	512	408	0	104

Source : SOeS, enquête entrepôts 2010

* Température mixte : à la fois positive et négative.

De même que pour l'industrie agroalimentaire, la donnée d'activité nécessaire au calcul est composée de la connaissance des surfaces totales et de différents ratios permettant d'aboutir à un ratio de charge moyen en kg/m³ entreposé.

Il est considéré que la part des entrepôts ayant du froid négatif est d'environ 44 % (d'après le Tableau 45, Insee 2012), ce qui représente une forte évolution par rapport aux hypothèses des précédentes éditions d'inventaire où la part des entrepôts réfrigérés en froid négatif était supposée de 70 %.

Le niveau 2020 de la capacité d'entreposage frigorifique en France est estimé à 21 millions de m³ réfrigérés d'après les données de l'USNEF (Union Syndicale Nationale des Exploitations Frigorifiques).

Procédés industriels

Cette catégorie inclut les sous-secteurs des procédés de l'industrie chimique, pharmaceutique et du caoutchouc. L'enquête n'a pas permis cette année d'avoir de nouvelles informations concernant les productions de l'industrie chimique et pharmaceutique, qui sont marquées d'une forte incertitude. Afin de pouvoir mettre à jour ce secteur, il a été intégré dans l'outil GF et les hypothèses ont été reconstituées à partir des résultats d'inventaire jusqu'en 2016 et des publications des rapports d'inventaires associées.

Les démarches auprès des industriels n'ont pas permis de vérifier ou mettre à jour les données, ceci constitue une perspective d'amélioration pour la prochaine édition d'inventaire.

2.1.2 Charge nominale

Dans le cas du froid industriel, la charge installée est estimée à partir du plusieurs ratios de charge selon la méthode utilisée historiquement dans [Ref 5]. On peut résumer l'ensemble de ces ratios à deux principaux :

- Un ratio de charge « équivalent », en kg/kW prenant en compte
 - les caractéristiques générales des systèmes à détente directe et des systèmes directs pour le froid positif et le froid négatif ;
 - la part du froid négatif dans la puissance totale (dans le cas de l'industrie laitière, par exemple, cette part est de 20 %) et l'évolution tendancielle de la part des systèmes indirects, propre à chaque type d'industrie agroalimentaire
- Un ratio traduisant le besoin en froid pour la production, en kW/t, caractéristique du procédé.

Concernant l'industrie agroalimentaire, les entrepôts et les procédés industriels, les charges sont évaluées à partir du besoin en froid nécessaire à la production, exprimé en kW. Plusieurs ratios sont considérés, basés sur les précédentes études d'inventaires. Ces ratios, bien qu'issus d'enquêtes de terrain anciennes sont considérés constants excepté la part des système indirects en croissance. Ces ratios pourront être revus.

Tableau 46 - Ratios frigorifiques caractéristiques par application

	Viande	Lait	Autres	Entrepôts
Besoin frigorifique pour la production (kW/t or kW/m ³)	0,044	0,013	0,044	0,032
Part de froid négatif	30 %	20 %	0 %	40 %

La figure suivante montre l'évolution du ratio de charge (kg/kW) dans le cas de l'industrie laitière et la correction apportée à la suite de l'enquête auprès des fédérations de l'industrie laitière en 2021. Une surestimation de la charge avait été prise en compte jusqu'à présent, l'enquête n'ayant pas été mise à jour depuis plusieurs années.

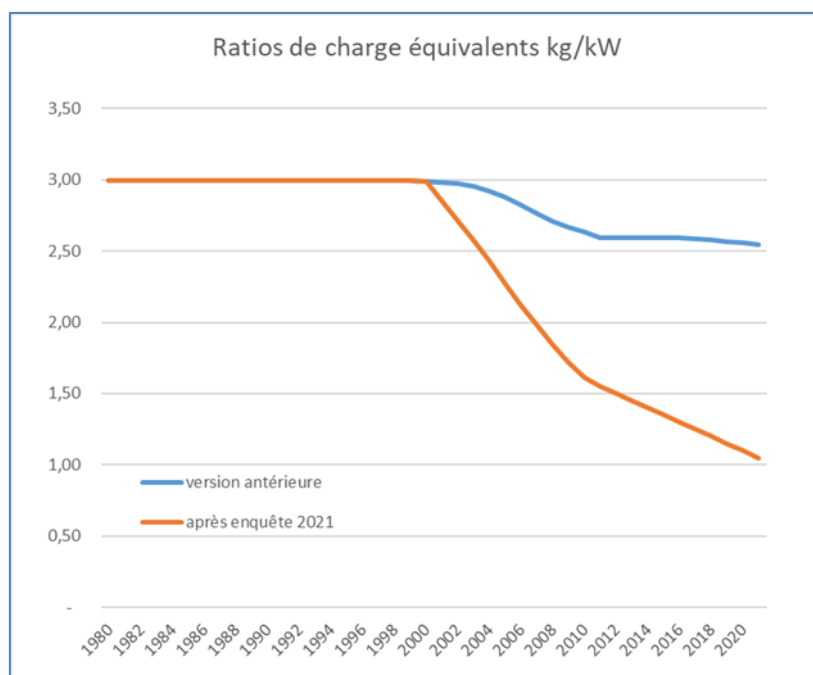


Figure 66 : Ratio de charge équivalent - Exemple de l'industrie laitière

2.1.3 Fluides frigorigènes utilisés

Les principaux fluides frigorigènes utilisés en agroalimentaire ont été, historiquement le CFC-12 et, plus largement le HCFC-22. A partir de 1995, le R-404A a progressivement remplacé le R-22 pour être le seul HFC utilisé de 2000 à 2008. Depuis 2008, l'introduction des systèmes de type cascade R-134a/CO₂ est pris en compte, et plus récemment, celle des systèmes CO₂ trans-critiques. La tendance est la même pour les entrepôts frigorifiques. L'ammoniac (R-717) a toujours été fortement utilisé en agroalimentaire, les retours de l'enquête de terrain menée en 2021 ont montré que la part de l'ammoniac dans les installations agroalimentaires, dans l'industrie du lait notamment, avaient été

sous-estimées. Ce point a été corrigé sur l'historique. Une tendance à une plus forte part d'ammoniac parmi les fluides frigorigènes utilisés sur l'historique a été appliquée à l'ensemble des sous-secteurs agroalimentaires. Ce point reste à confirmer.

2.1.4 Durée de vie

Les courbes ont été établies autour de la durée de vie moyenne de l'installation frigorifique, estimée à 20 ans pour le froid industriel.

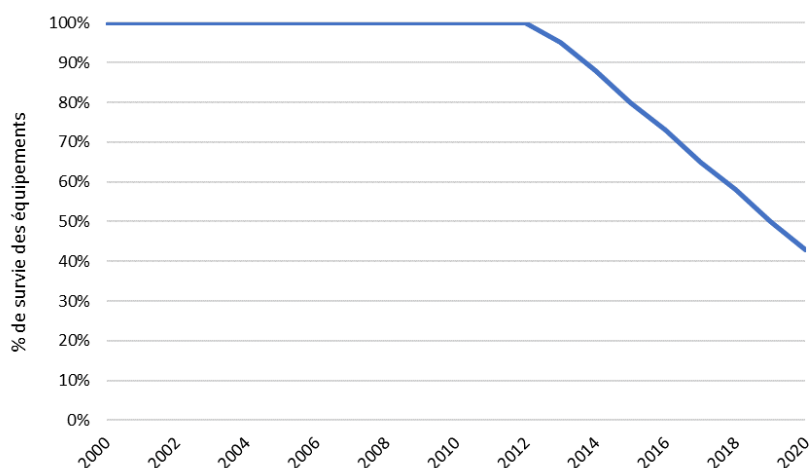


Figure 67 : Courbe de durée de vie pour le froid industriel

2.2 Facteurs d'émissions

2.2.1 A la charge

Les hypothèses de facteurs d'émissions à la charge des installations sont issues des Lignes directrices du GIEC de 1996 [Ref 22] et de 2006 [Ref 10]. Pour les années antérieures à 1996 et les années après 2006, ils sont considérés constants.

Tableau 47 - facteur d'émission à la charge des installations de froid industriel

2020	Toutes applications
Facteur d'émission à la charge	1,5 %

2.2.2 Fugitif

Les facteurs d'émissions à l'usage pour le secteur du froid industriel en 2020 sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 48 - Facteurs d'émissions fugitives par application du froid industriel pour 2020

2020	Agroalimentaire	Entrepôts	Industrie chimique	Industrie pharmaceutique	Industrie caoutchouc
Facteur d'émission fugitif	8 %	13 %	13 %	14 %	15 %

Industrie agroalimentaire et entrepôts

Sur la base des hypothèses des anciennes études d'inventaires [Ref 5], les taux d'émissions fugitives sont supposés de 15 % jusqu'en 2005. A la suite de l'enquête de terrain, les facteurs d'émission fugitifs de l'industrie agroalimentaire ont été revus à la baisse, depuis 2010.

Procédés industriels

Excepté dans le cas de l'industrie du caoutchouc où les quantités utilisées pour la maintenance ont été régulièrement communiquées et les taux d'émissions élevés (jusqu'à 100 % en 2005), les taux d'émissions fugitives sont supposés de l'ordre de 15 %, faute de communication plus précise, et en légère décroissance depuis 2009.

2.2.3 A la maintenance

L'évolution du taux d'émission à la maintenance pour le secteur du froid industriel est donnée sur la figure ci-dessous. Il prend en compte l'amélioration des pratiques depuis 2005.

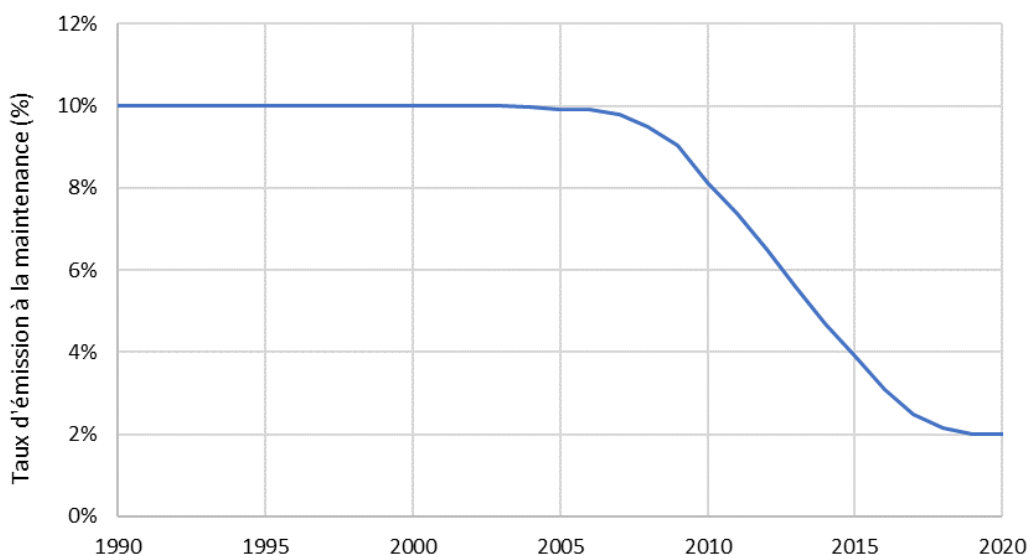


Figure 68 : Taux d'émission à la maintenance - Froid industriel

2.2.4 En fin de vie

Les émissions en fin de vie des équipements dépendent des quantités présentes dans l'équipement au moment de son démantèlement et d'un facteur d'émission fin de vie traduisant l'efficacité des filières de récupération. Pour tous les secteurs, la charge réelle de l'équipement est calculée au cours de sa durée de vie, tenant compte des occurrences de maintenance, permettant de ne pas surestimer les émissions de fin de vie.

Tableau 49 - Facteurs d'émissions 2020 en fin de vie des équipements du froid industriel

2020	Agroalimentaire	Entrepôts	Industrie chimique	Industrie pharmaceutique	Industrie caoutchouc
------	-----------------	-----------	--------------------	--------------------------	----------------------

Facteur d'émission de fin de vie	5 %	10 %	5 %	5 %	10 %
-------------------------------------	-----	------	-----	-----	------

Industrie agroalimentaire

Sur la base des hypothèses des anciennes études d'inventaires [Ref 5], le début de la récupération en fin de vie est pris en compte à partir de 1993, pour atteindre 80 % en 2005 et 95 % en 2013, en considérant que la majorité des installations sont classées ICPE (Installations Classées Pour l'Environnement).

Entrepôts

Sur la base des hypothèses des anciennes études d'inventaires [Ref 5], le début de la récupération en fin de vie est pris en compte à partir de 1993, pour atteindre 70 % en 2005 et 80 % en 2013, et 90 % en 2020.

Procédés industriels

Dans ce secteur, les entreprises sont classées ICPE (Installations Classées Pour l'Environnement) et les installations sont entretenues de façon très stricte, ce qui explique les taux d'émissions de fin de vie particulièrement bas, considérés de 5 % depuis 2013.

3. Résultats

Cette partie présente les résultats du froid industriel hors chillers. Ceux-ci sont présentés de façon indépendante, dans le chapitre suivant. Il est généralement considéré que deux tiers des chillers peuvent être attribués au froid industriel.

3.1 Banque

La banque du froid industriel est estimée à 9 204 tonnes en 2020, constituée à plus de 62 % d'HFC, bien que le secteur agroalimentaire soit fortement utilisateur d'ammoniac. La banque de R-22 s'est réduit progressivement par les fins de vie et retrofits d'installations pour disparaître en 2017 de la banque du froid industriel. Avec les hypothèses révisées à la suite de l'enquête 2020 et étant donnée l'approche de l'interdiction d'utilisation du R-404A dans les installations neuves à partir de 2022, la banque d'ammoniac représente 36 % de la banque totale du froid industriel en 2020.

D'un point de vue sectoriel, l'industrie chimique et les entrepôts constituent les banques les plus importantes avec respectivement 35% et 25% de la banque de froid industriel en 2020. Ces parts sont à confirmer par la suite de l'enquête de terrain attendue en 2022.

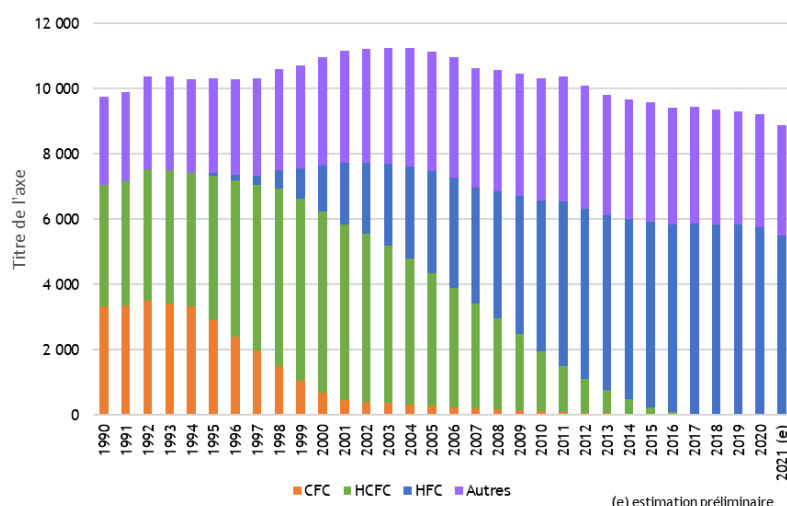


Figure 69 : Banque de fluide dans le secteur du froid industriel

Tableau 50 : Banque 2020

Fluide frigorigène	2020 (en t)
R-134a	2 617,2
R-404A	2 233,4
R-407A	95,7
R-407F	74,2
R-417A	48,3
R-422D	193,4
R-427A	48,3
R-449A	291,5
R-452A	82,4
R-1234yf	22,6
R-1234ze	31,7
Total HFC	5 738,8
R-717	3 313,2
R-744	151,7
Total Autres	3 464,9
Total général	9 203,7

3.2 Demande

3.2.1 Besoin pour les équipements neufs

La demande relative aux nouvelles installations du secteur du froid industriel est dominée en 2020 par le R-134a (45 %), principalement utilisé dans les procédés industriels et l'ammoniac (37 %), principalement utilisé en industrie agroalimentaire et entrepôts.

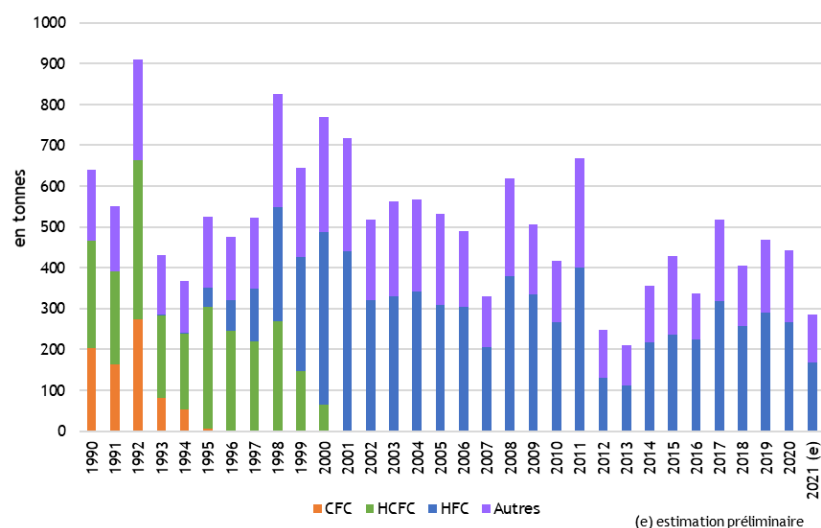


Figure 70 : Besoin en fluides frigorigènes pour les installations neuves du froid industriel

Tableau 51 : Charges sur site 2020

Fluide	2020 (en t)
R-134a	200,5
R-407F	9,0
R-449A	20,8
R-1234yf	18,8
R-1234ze	16,6
Total HFC	265,6
R-717	165,0
R-744	12,6
Total Autres	177,5
Total général	443,2

3.2.2 Besoin pour la maintenance

On observe une diminution des quantités nécessaires à la maintenance dans le secteur du froid industriel du fait de la réduction des taux d'émissions et d'une tendance décroissante de la banque (Figure 69). En 2020, on estime que 66 % des quantités requises pour la maintenance sont des HFC, soit environ 665 tonnes.

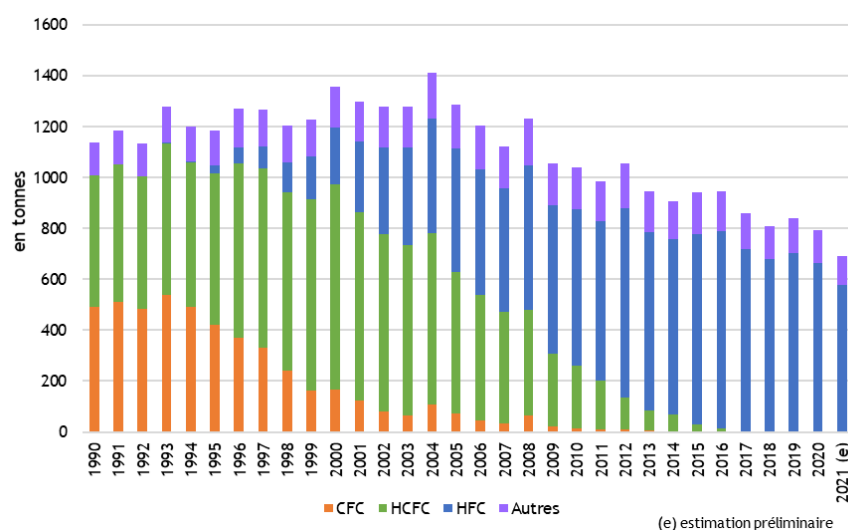


Figure 71 : Quantités requises pour la maintenance dans le secteur du froid industriel

Tableau 52 : Quantités pour la maintenance 2020

Fluide frigorigène	2020 (en t)
R-134a	322,4
R-404A	268,1
R-407A	9,9
R-407F	6,0
R-417A	5,3
R-422D	19,8
R-427A	5,3
R-449A	19,5
R-452A	3,9
R-1234yf	3,0
R-1234ze	1,7
Total HFC	664,9
R-717	110,4
R-744	16,1
Total Autres	126,4
Total général	791,3

3.2.3 Besoin pour le retrofit

Les hypothèses de retrofit des installations au R-404A, à l'approche de l'interdiction réglementaire d'utilisation des HFC de PRG supérieur à 2500 pour la maintenance des installations conduisent à une croissance de la demande pour le retrofit évaluée à 200 tonnes de HFC en 2020.

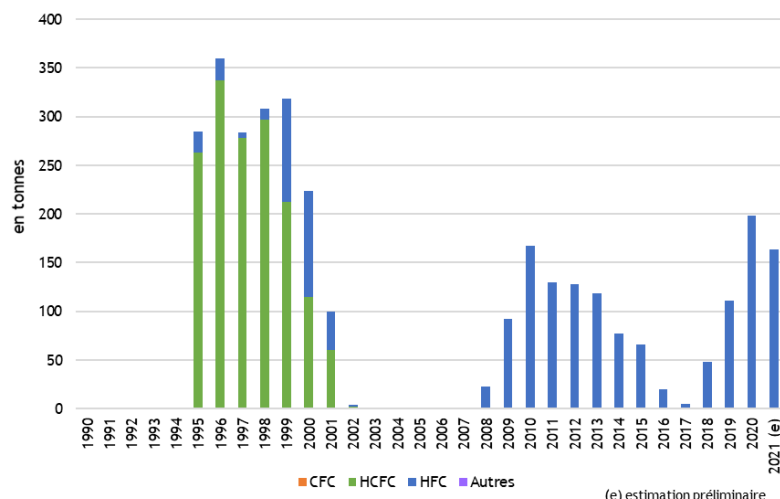


Figure 72 : Besoin pour le retrofit dans le secteur du froid industriel

Tableau 53 - Besoin retrofit 2020

Fluide frigorigène	2020 (en t)
R-448A	100,1
R-449A	36,2
R-452A	61,8
Total HFC	298,2
Total général	298,2

3.3 Emissions

3.3.1 Emissions totales

Les émissions totales du secteur du froid industriel sont estimées à 1 183 t, à 97 % constituées des émissions fugitives du parc des installations. Les taux d'émissions des installations utilisant de l'ammoniac sont plus bas étant données les mesures de sécurité liées à ce type d'installation. A l'image de la banque, les émissions ont tendance à décroître, d'autant plus que les taux d'émissions ont tendance à baisser depuis 2000 et la récupération en fin de vie à être très élevée, une large part des installations étant classées pour l'environnement (ICPE).

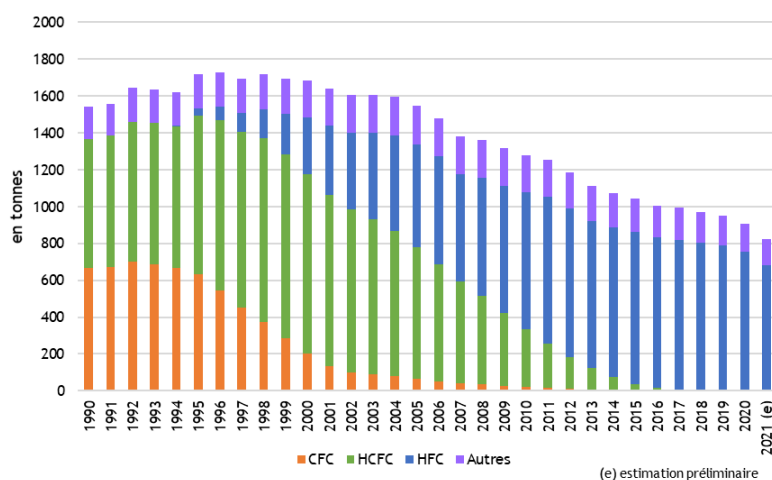


Figure 73 - Emissions totales du froid industriel

Tableau 54 : Emissions totales 2020

Fluide frigorigène	2020 (en t)
R-12	0,070
Total CFC	0,070
R-22	1,54
Total HCFC	1,54
R-134a	358,9
R-404A	295,9
R-407A	12,1
R-407F	9,6
R-417A	3,2
R-422D	19,4
R-427A	3,2
R-449A	37,8
R-452A	5,4
R-1234yf	3,4
R-1234ze	4,2
Total HFC	753,0
R-717	137,1
R-744	16,5
Total Autres	153,6
Total général	908,2

3.3.2 Emissions CO₂ équivalentes

Alors qu'elles culminaient à plus de 8 millions de tonnes de CO₂ en 1995, les émissions de fluides frigorigènes du froid industriel ne représentent plus que 1,9 millions de tonnes de CO₂ en 2020. La tendance décroissante de la banque et la baisse des taux d'émission sont responsables de cette tendance. La baisse de la banque induite par la révision des ratios de charge reste à confirmer pour une partie du secteur. Cette tendance devrait se poursuivre étant donné l'arrêt d'utilisation du R-404A dans les installations neuves depuis 2020 et une généralisation de l'utilisation de fluides à PRG plus faibles, avec une part croissante de l'ammoniac (Figure 74).

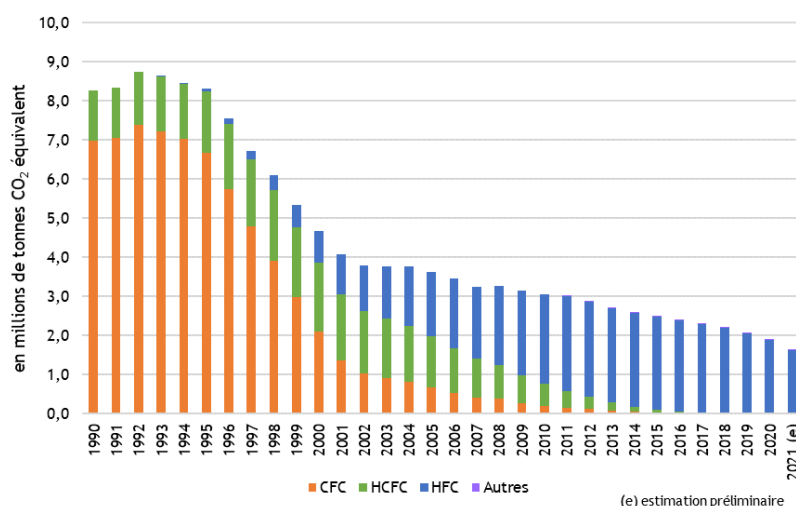


Figure 74 : Emissions CO₂ équivalentes du froid industriel (millions de tonnes)

D'un point de vue sectoriel, l'industrie chimique représente 35% des émissions CO₂ équivalentes du froid industriel, les entrepôts environ 15% et l'agroalimentaire 42 % dont 12% pour l'industrie de la viande et 4% pour l'industrie du lait.

Tableau 55 : Emissions CO₂eq. 2020

Fluide frigorigène	2020 (Mt CO ₂ e)
R-12	0,000
Total CFC	0,000
R-22	0,002
Total HCFC	0,002
R-134a	0,481
R-404A	0,936
R-407A	0,023
R-407F	0,017
R-417A	0,006
R-422D	0,040
R-427A	0,006
R-449A	0,107
R-452A	0,015
R-1234yf	0,000
R-1234ze	0,000
Total HFC	1,631
R-744	0,000
Total Autres	0,000
Total général	1,634

VII. Secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)

1. Introduction

Le secteur est décomposé en quatre types de groupes refroidisseurs d'eau, distincts par leurs technologies de compresseurs et niveaux de puissance. On distingue d'une part les chillers à compresseurs centrifuges et, d'autre part, les chillers à compresseurs volumétriques que l'on choisit de diviser en trois sous-groupes en fonction de la puissance :

- Petite puissance (< 50 kW) ;
- Moyenne puissance ($50 < P < 350$ kW) ;
- Forte puissance (> 350 kW).

Modes de charge

Les groupes refroidisseurs à eau chargés d'usines : ils sont dits pré-chargés.

Modes de maintenance

Il n'y a pas de maintenance annuelle pour ces équipements qui subissent une opération de maintenance dès lors que la quantité de fluide réfrigérant contenue est en deçà d'un certain seuil. Par ailleurs, ces équipements ne nécessitent pas de décharge complète du fluide pendant la maintenance. Ces pratiques sont prises en compte dans les calculs des émissions liées à la maintenance des équipements. Les différentes hypothèses retenues, après entretiens avec des fabricants et experts du secteur [Ref 30] par équipement sont listées ci-dessous :

Tableau 56 - rythme de maintenance des Chillers

Secteur	Sous-secteur	Rythme de maintenance	Seuil
CHILLERS	Centrifugal compressors	selon seuil	95 %
	Small chillers	selon seuil	90 %
	Mid-size chillers	selon seuil	90 %
	Large chillers	selon seuil	90 %

Durée de vie moyenne

La durée de vie moyenne des équipements provient des rapports d'inventaire d'émissions de fluides frigorigènes [Ref 5]. Des échanges récents avec la profession pourrait conduire à faire évoluer ces valeurs, notamment pour le chillers de moyenne puissance dont la durée de vie pourrait se rapprocher de 20 ans. Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs prises en compte pour l'inventaire 2020.

Tableau 57 - durée de vie moyenne des chillers

Sous-secteur	Durée de vie (ans)
Chillers $P < 50$ kW	15
Chillers $50 < P < 350$ kW	15
Chillers $P > 350$ kW	20
Chillers à compresseur centrifuge	25

2. Données et hypothèses

2.1 Données d'activités

2.1.1 Marchés et productions

MARCHES

Le syndicat Uniclimate dispose de données détaillées de marchés par fine gamme de puissance pour les chillers ainsi que des informations sur les fluides frigorigènes utilisés. Ces données sont communiquées chaque année par Uniclimate [Ref 31] au Citepa, ce qui permet d'avoir une vision très précise du marché. Dans le cadre de la reconstitution de la base de données France Métropole, les données ont été transmises sur 2002-2021. Le marché Uniclimate est corrigé de 8 % pour tenir compte du fait que tous les acteurs du marché ne sont pas adhérents à la fédération.

Les marchés sont communiqués pour trois types de chillers à compresseur volumétrique (condensation à eau, condensation à air et condensation par ventilateur centrifuge) et par gamme de puissance ($P < 7$ kW ; $7 < P < 17,5$ kW ; $17,5 < P < 50$ kW ; $51 < P < 100$ kW ; $101 < P < 200$ kW ; $201 < P < 350$ kW ; $351 < P < 500$ kW ; $501 < P < 700$ kW ; $701 < P < 900$ kW ; $P > 900$ kW) permettant d'avoir des informations fines sur ce parc d'équipements en France.

Les marchés des compresseurs centrifuges proviennent des rapports d'inventaires de fluides frigorigènes [Ref 5]. Celui-ci se situe autour des 50 unités par an depuis le début des années 2000.

Les marchés « historiques » (avant 2002) des chillers à compresseur volumétrique ont été reconstitués à partir :

- des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes pour l'année 2002 (2001 étant estimé par la moyenne des marchés entre 2000 et 2002) [Ref 5] ;
- du rapport RTOC 2002 pour l'année 1999 ;
- d'hypothèses sur le début du marché des chillers en France (pris en 1970) et le taux d'accroissement (supposé linéaire entre 1970 et 1999).

Les marchés des compresseurs centrifuges ont été estimés à l'aide des rapports d'inventaires des fluides frigorigènes pour 2000 et 2001 [Ref 5].

PRODUCTIONS

Les chillers sont chargés en usine. La donnée d'activité à prendre en compte pour le calcul des émissions à la charge est donc le nombre d'équipements produits par an.

Les productions annuelles par gamme de puissance en France ne sont pas collectées par une fédération. Par conséquent, ces valeurs sont estimées à partir de communications confidentielles, le plus souvent anciennes et pour une année donnée. Des ratios entre productions d'équipements et marchés sont établis et appliqués sur les autres années. Ces données sont marquées d'une forte incertitude mais n'impactent, en termes d'émissions, que les émissions à la charge.

2.1.2 Charge nominale

La charge moyenne des chillers est calculée en moyenne pondérée par les marchés à partir d'un ratio de charge exprimé en kg de fluide frigorigène par unité de puissance. Ces ratios de charge ont été communiqués par des fabricants d'équipements et sont parfois distincts par fluide. La charge moyenne des compresseurs centrifuge est issue des rapports d'inventaires de fluides frigorigènes [Ref 5] à partir de 2008 (0,3 kg/kW froid). Elle est supposée constante pour les années suivantes. Avant 2008, on utilise le ratio indiqué dans le RTOC 2002 (0,40 kg/kW).

$$Charge\ moyenne(i) = \sum_l Marché_{(i)} * Ratio\ de\ charge_{(i)} * Puissance(i) / Puissance\ totale$$

2.1.3 Fluides frigorigènes utilisés

Pour répondre aux contraintes du « phasedown » imposé par la réglementation (UE) N° 517/2014, le R-1234ze et le R-32 ont été progressivement introduits sur les différentes gammes de chillers en remplacement du R-134a et du R-410A, respectivement. Pour l'année 2020, les fluides frigorigènes à bas PRG sont encore minoritaires.

Pour les chillers à compresseur volumétrique, l'évolution des fluides frigorigènes utilisés dans les équipements a été reconstituée à partir des données sur les réfrigérants communiquées par Uniclimate pour les années les plus récentes (à partir de 2002). Ces données ont nécessité un post-traitement car elles étaient représentatives des types de chillers à condensation (eau vs air) et non des gammes de puissance (format de restitution utilisé dans les inventaires). Sur les années antérieures, l'évolution des fluides frigorigènes utilisés a été reconstituée à partir des rapports du RTOC et les anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 5].

Pour les chillers à compresseur volumétrique forte puissance ($P > 350$ kW), le R-134a est introduit en 1995. Pour les faibles et moyennes puissances, il est considéré que l'intégralité du marché des nouveaux équipements utilise le R-22 à partir de 1990. Pour les compresseurs centrifuge, le R-12 et le R-11 ont été principalement utilisés de 1970 à 1985.

L'arrêt d'utilisation du R-22 dans les équipements neufs de climatisation et chillers est lié à la réglementation européenne 2037/2000. Pour les chillers de forte puissance, il a été pris en compte un arrêt de la production des équipements avec du R-22 à partir de 2000, et 2003 pour les chillers de faible et moyenne puissance. Les réfrigérants de remplacement dans la gamme des petites et moyenne puissance ont été le R-407C et le R-410A, alors que le R-134a a été utilisé pour les chillers de forte puissance en plus du R-407C. La répartition des parts de marchés entre le R-407C et le R-410A a été établie en fonction des informations fournies par Uniclimate. Aujourd'hui, le R-32 est utilisé surtout dans les chillers de petites puissances $< 17,5$ kW et un peu dans la gamme < 50 kW.

Tableau 58 - fluides frigorigènes utilisés sur le marché des chillers en 2020

Sous-secteur	Fluides frigorigènes
Chillers P < 50 kW	98 % R-410A
Chillers 50 < P < 350 kW	2% R-32
Chillers P > 350 kW	40% R-134a
	32% R-410A
	12% R-32
	16% R-1234ze
Chillers à compresseur centrifuge	75 % R-134a
	25% R-1234ze

Durée de vie

Les courbes de durée de vie sont construites à partir des durées de vie moyennes, supposées de 15 ans pour les chillers de petites et moyennes puissances et de 20 et 25 ans respectivement pour les chillers de fortes puissances et les centrifuges.

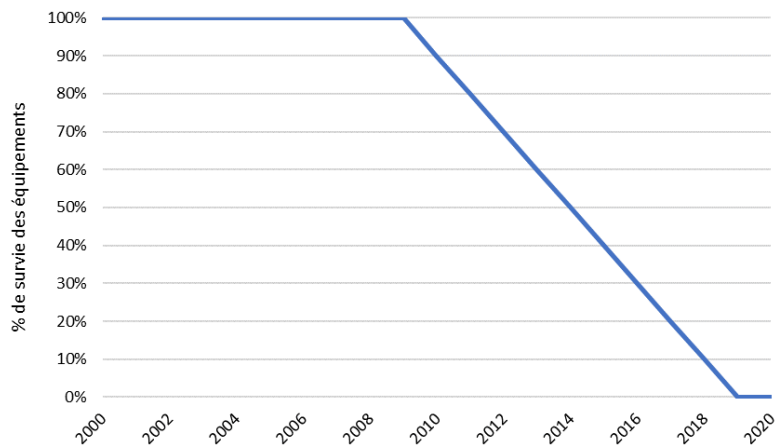


Figure 75 : Courbe de durée de vie des chillers de petites et moyennes puissances

2.2 Facteurs d'émissions

2.2.1 A la charge

Les facteurs d'émission à la charge sont supposés évoluer selon une courbe en S. Celle-ci a été modélisée de prendre en compte l'amélioration continue des pratiques et maîtrises des charges d'équipements. La valeur asymptotique estimée pour l'année 2015 a été calculée à partir des données d'un producteur d'équipements en France et est de l'ordre de 1,5 %. Cette valeur est conservée pour les années suivantes. Ces taux d'émission à la charge pourraient être encore affinés en prenant en compte d'autres producteurs d'équipements en France et en les faisant évoluer annuellement sur la base des déclarations des exploitants dans GEREPE car actuellement ils font apparaître des valeurs supérieures à l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 (entre 0,2 et 1 %).

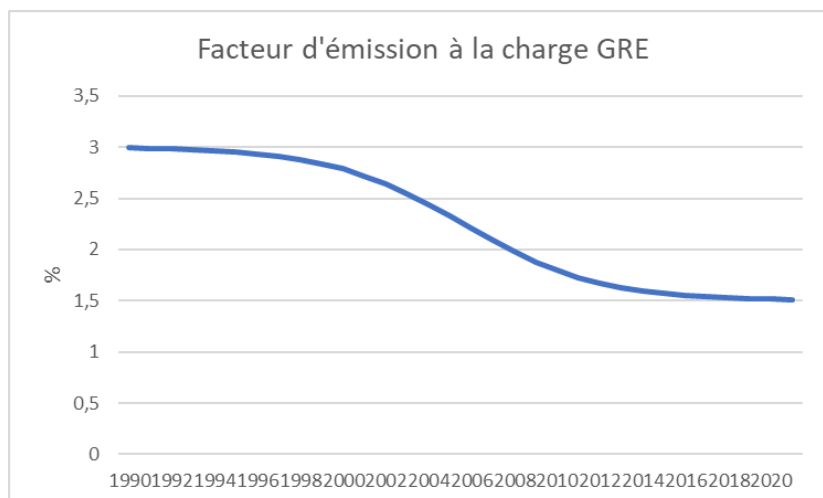


Figure 76 : Facteur d'émission à la charge des chillers (en %)

2.2.2 Fugitif

Pour tous les équipements, le facteur d'émission utilisé en 1990 provient de la tranche haute des Lignes directrices du GIEC 2006 (15 %). Cette valeur est également utilisée pour les années antérieures à 1990. Les valeurs utilisées pour l'année 2016 varient en fonction du type d'équipement et sont extraites du rapport d'inventaire des fluides frigorigènes. On suppose que les taux d'émission pour les chillers à compresseur volumétrique de faible (< 50 kW) et moyenne puissance (50 < P < 350 kW) sont identiques. Les facteurs d'émission estimés sont bien inclus dans l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 (entre 2 et 15 %).

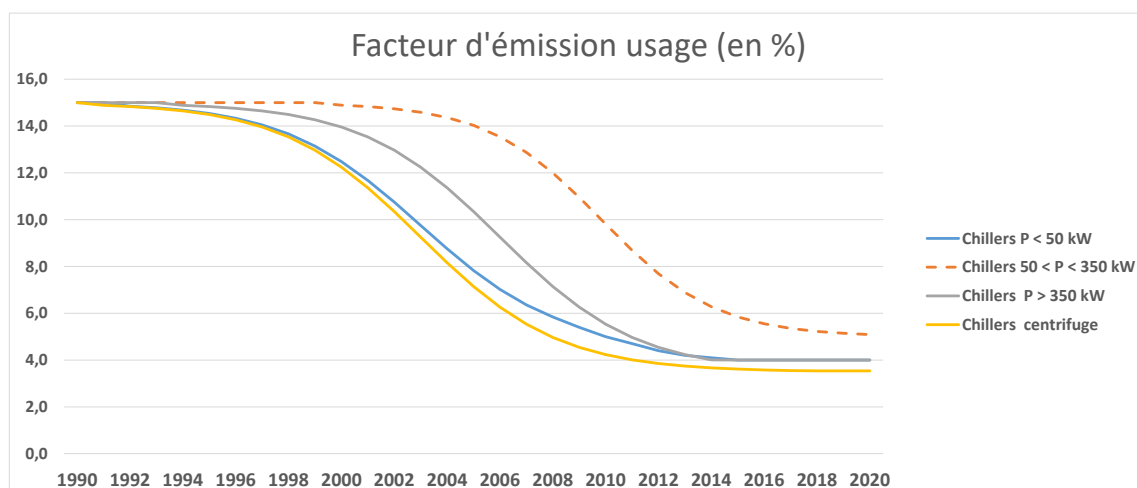


Figure 77 : Facteur d'émission pendant la durée de vie - chillers (en %)

2.2.3 A la maintenance

L'évolution du taux d'émission au cours des opérations de maintenance pour le secteur des groupes refroidisseurs à eau est donnée sur les figures ci-dessous et traduisent l'amélioration des pratiques. Ces taux d'émissions sont appliqués au complément de charge réalisé lors de la maintenance du chiller.

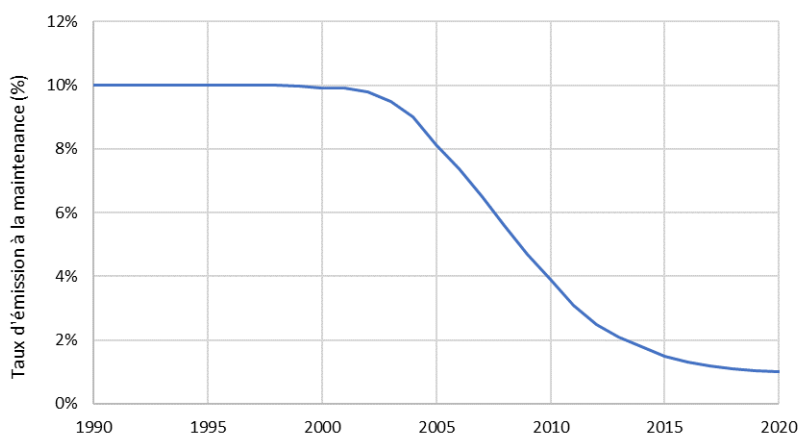


Figure 78 : Taux d'émission à la maintenance - Compresseurs centrifuges

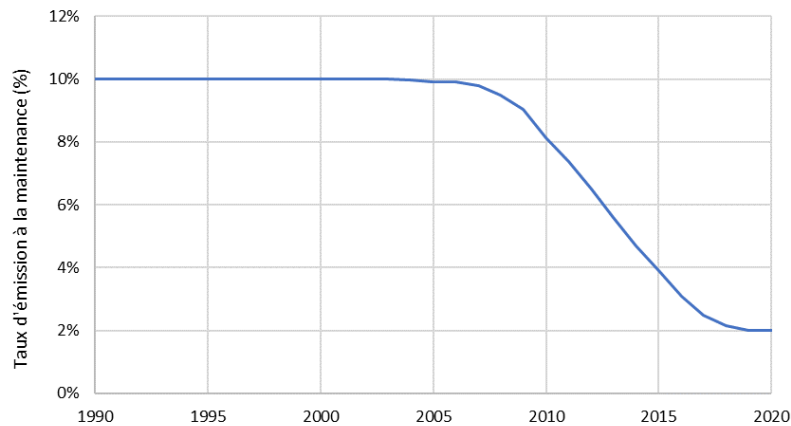


Figure 79 : Taux d'émission à la maintenance - Chillers de petites, moyennes et grandes tailles

2.2.4 En fin de vie

Les émissions en fin de vie des équipements dépendent des quantités présentes dans l'équipement quand il atteint sa fin de vie et d'un facteur d'émission fin de vie traduisant l'efficacité des filières de récupération. Les courbes d'évolution des facteurs d'émission en fin de vie sont établies également sur la base d'une courbe en S. Il est supposé que les chillers centrifuges font partie d'une installation classée pour l'environnement et ont des niveaux d'émissions particulièrement bas.

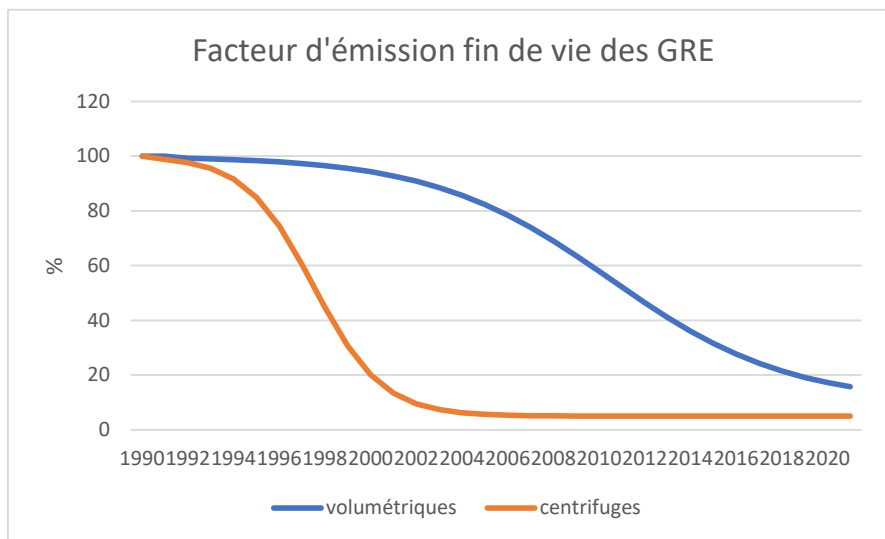


Figure 80 : Efficacité de récupération en fin de vie des chillers (en %)

3. Résultats

3.1 Banque

La banque du secteur des GRE est estimée à 6 030 tonnes en 2020. Hormis les fortes puissances, la tendance des marchés de chillers est décroissante. Associée à la diminution des ratios de (kg,/kW), cela conduit à une décroissance continue de la banque, de 2,3 % par rapport à 2019. Bien que le R-410A soit en forte progression sur le marché neuf, la banque est encore en grande partie constituée de R-134a (en diminution depuis 2018) et de R-407C (en diminution depuis 2014) du fait des durées de vie élevées des installations et des fortes charges au R-134a des chillers de forte puissance. En 2020, le R-134a représentait 34 % et le R-407C 31 % de la banque (Tableau 59). La banque de R-22 est nulle depuis 2018 du fait de nombreux retrofits et renouvellements d'installations depuis 2009. La part résiduelle s'élève à 3 tonnes en 2020, essentiellement de R-11.

Etant donné leur charge moyenne élevée et leur parc, la banque totale des GRE est dominée par celle des chillers volumétriques de puissance supérieure à 350 kW.

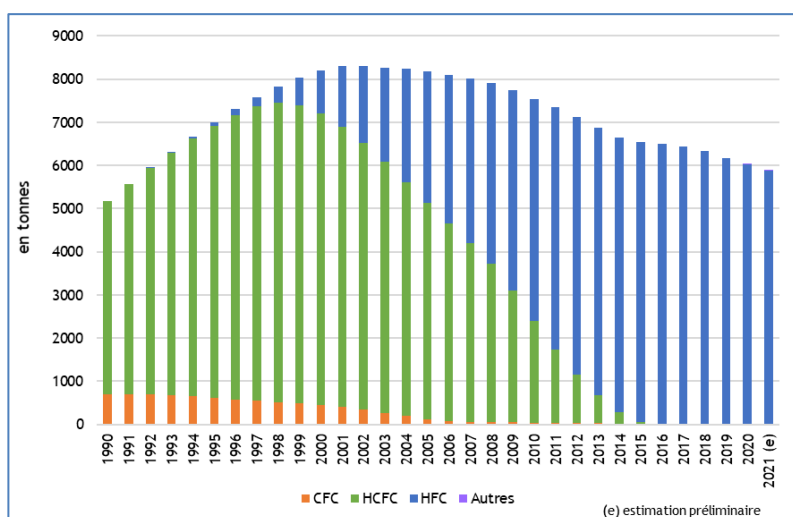


Figure 81 : Banque de fluide dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)

Tableau 59 : Banque de fluide

Fluide	2020 (en t)
R-11	3,5
R-12	0,09
Total CFC	3,5
R-32	35,2
R-134a	2 020,6
R-407C	1 883,4
R-410A	1 654,6
R-422D	201,0
R-427A	86,3
R-1234ze	145,5
Total HFC	6 026,6
R-717	0,09
Total Autres	0,09
Total général	6 030,2

3.2 Demande

3.2.1 Besoin pour les équipements neufs

Le besoin en fluides frigorigènes pour la production des groupes refroidisseurs à eau est à plus de 99% constitué de HFC, notamment de R-134a (32 %), de R-410A (28 %) et de R-1234ze (34 %). En 2020, on estime le besoin total à 407 tonnes.

Concernant les quantités brutes mises sur le marché, on observe une diminution depuis le début des années 2000, avec une forte réduction en 2004-2005, due à la baisse des marchés des chillers de

petite et moyenne puissance (une partie des statistiques pouvait comptabiliser des pompes à chaleur, qui à partir de 2005-2006 ont été comptabilisées à part).

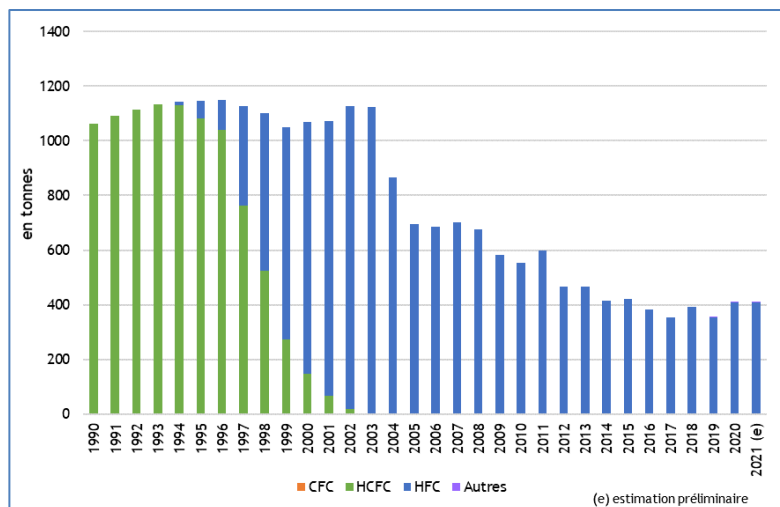


Figure 82 : Quantités nécessaires à la production des groupes refroidisseurs à eau (GRE) en France métropole.

Tableau 60 : Production 2020

Fluide	2020 (en t)
R-12	0,09
Total CFC	0,09
R-22	0,09
Total HCFC	0,09
R-32	27,5
R-134a	130,0
R-407C	0,09
R-410A	112,0
R-1234ze	137,0
Total HFC	406,6
R-717	0,09
Total Autres	0,09
Total général	406,8

3.2.2 Besoin pour la maintenance

A l'instar de la banque de fluide, on observe une diminution des quantités nécessaires à la maintenance des chillers, de façon plus significative, avec la baisse des taux d'émissions (Tableau 61).

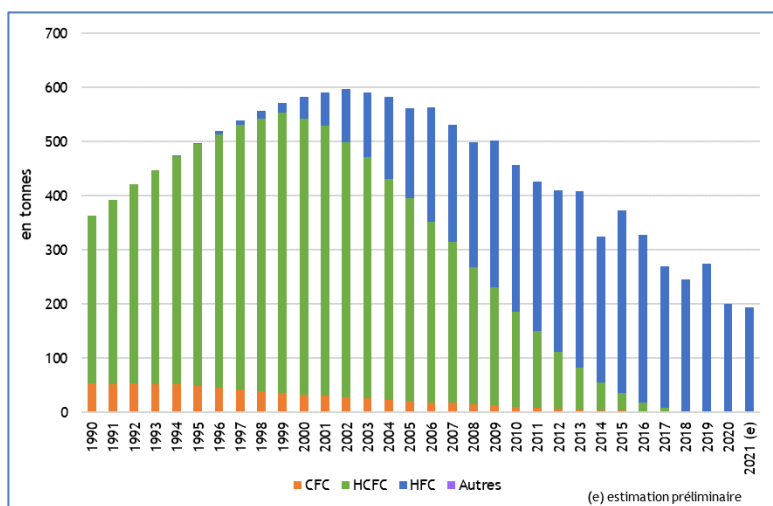


Figure 83 - Besoin pour la maintenance dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)

Tableau 61 : Quantités pour la maintenance 2020

Fluide	2020 (en t)
R-22	0,55
Total HCFC	0,55
R-134a	65,3
R-407C	71,0
R-410A	53,2
R-422D	6,1
R-427A	4,1
R-1234ze	0,2
Total HFC	199,9
Total général	200,4

3.2.3 Besoin pour le retrofit

Le secteur des chillers a été essentiellement concerné par le retrofit des installations au R-22. Plus récemment, les retrofits pourraient concerner des installations au R-134a retrofitées vers un HFO. Ce point n'a pas été pris en compte et est à confirmer.

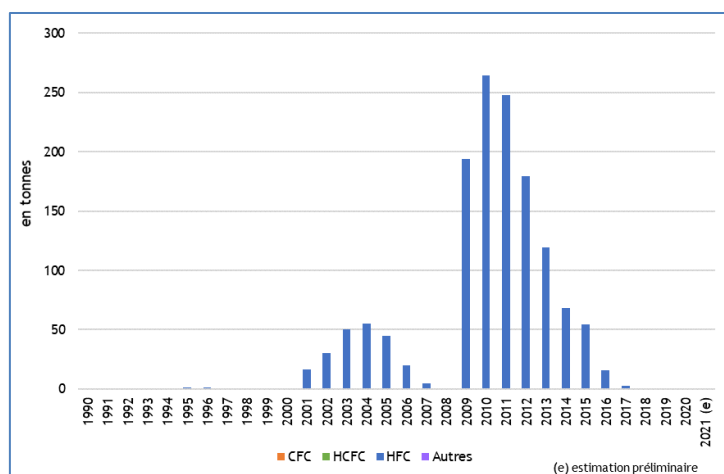


Figure 84 - Besoin pour le retrofit dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)

3.3 Emissions

3.3.1 Emissions totales

Les émissions du secteur des chillers sont en diminution continue depuis 2000 car les taux d'émissions des installations neuves ont fortement diminué et que le parc s'est progressivement renouvelé. Les émissions totales sont estimées à 507 tonnes en 2020 (Tableau 62), dues à 85% aux émissions fugitives. C'est le secteur des chillers de forte puissance qui, à l'image de la banque, domine les émissions, à 54 %.

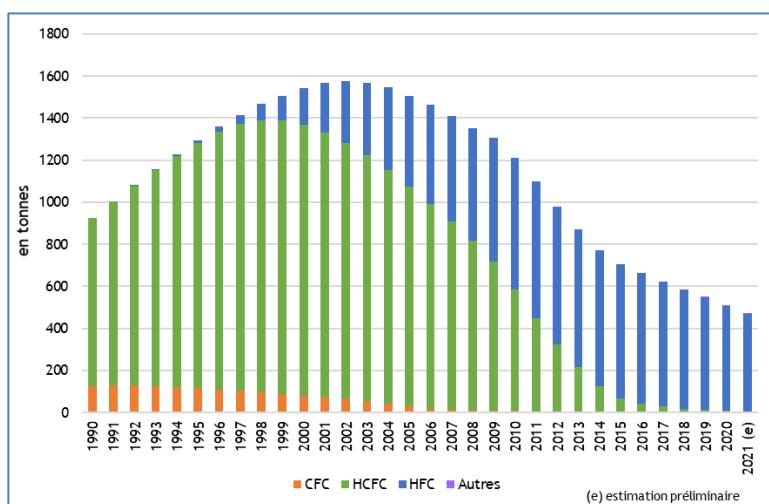


Figure 85 : Emissions totales du secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)

Tableau 62 : Emissions totales 2020

Fluide	2020 (en t)
R-11	0,53
R-12	0,07
Total CFC	0,60
R-22	6,6
Total HCFC	6,6
R-32	1,9
R-134a	170,4
R-407C	202,4
R-410A	105,8
R-422D	7,2
R-427A	3,8
R-1234ze	8,4
Total HFC	500,0
R-717	0,01
Total Autres	0,01
Total général	507,2

3.3.2 Emissions CO₂ équivalentes

Les émissions du secteur des GRE s'élèvent à 870 000 tonnes d'équivalent CO₂ en 2020, également en baisse par rapport à 2019 (- 8 % entre 2019 et 2020). Les fluides utilisés dans le secteur des chillers ayant des PRG relativement proches, la répartition sectorielle des émissions équivalentes CO₂ est assez similaire à celles des émissions totales, dominée par les chillers de forte puissance à 52% puis par les moyennes puissance à 33%.

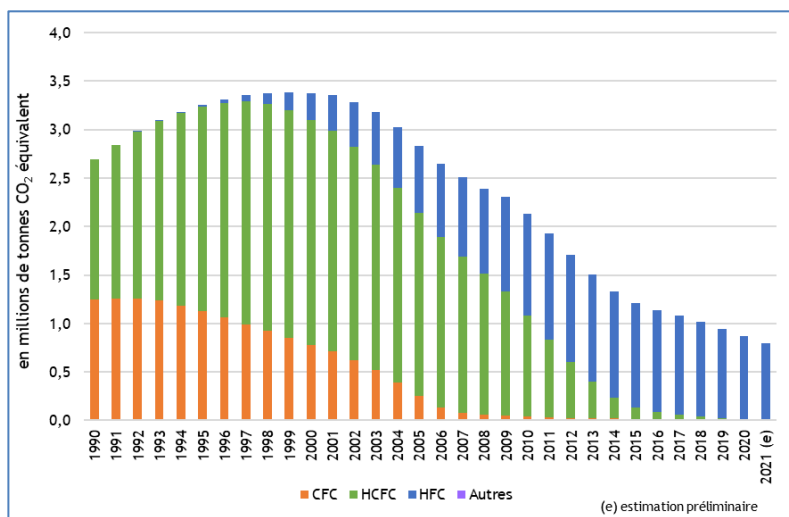


Figure 86 : Emissions CO₂ équivalentes des groupes refroidisseurs à eau (GRE) (millions de tonnes)

Tableau 63 : Emissions CO₂eq. 2020

Fluide	2020 (Mt CO ₂ e)
R-11	0,003
R-12	0,001
Total CFC	0,003
R-22	0,012
Total HCFC	0,012
R-32	0,001
R-134a	0,244
R-407C	0,359
R-410A	0,221
R-422D	0,020
R-427A	0,008
R-1234ze	0,000
Total HFC	0,853
Total général	0,868

VIII. Climatisation à air et PAC air/air

1. Introduction

Les équipements de climatisation à air et pompes à chaleur (PAC) air/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 (> 17,5 kW).

Ce secteur est composé de 9 sous-secteurs, définis par la structuration adoptée par Uniclimate, qui communique chaque année les statistiques des marchés d'équipements.

Climatisation individuelle

- Climatiseur mobile ;
- Climatiseur fenêtre (ou window) ;
- PAC air/air Mono-split ;
- PAC air/air Multi-split ;

Climatisation autonome

- Armoires verticales (ou consoles) ;
- PAC air/air DRV (Débit Réfrigérant Variable) ;
- Systèmes splits centralisés ;
- Roof top ;
- Armoire spéciale (ou cabinet).

Modes de charge

Les équipements de climatisation à air peuvent être chargés en usine (lieux de production) ou sur site (lieux d'installation). Certains équipements, tels que les PAC air/air multi-splits ou les PAC air/air DRV, nécessitent un complément de charge lors de l'installation sur site. Le tableau ci-dessous présente les hypothèses prises en compte pour les différents sous-secteurs.

Tableau 64 - modes de charge des équipements de climatisation à air

Secteur	Sous-secteur	Chargé d'usine (dit <i>pré-chargé</i>)	Chargé sur site	Complément de charge
Climatisation à air et PAC air/air	PAC air/air Mono splits	X		
	PAC air/air Multi-splits	X		50 %
	Systems splits centralisés	X		30 %
	Roof-top	X		
	PAC air/air DRV	X		80 %
	Mobiles	X		
	Windows	X		
	Consoles		X	
	Armoires spéciales		X	

Modes de maintenance

Les fréquences de maintenance dépendent des équipements. Il est considéré qu'une opération de maintenance a lieu dès que la quantité de fluide réfrigérant contenue passe en deçà d'un certain seuil. Par ailleurs, il est supposé que les équipements ne nécessitent pas de décharge complète du

fluide pendant la maintenance. Les différentes hypothèses retenues par équipement, après entretiens avec des fabricants et experts du secteur [Ref 30], sont listées au Tableau 65.

Tableau 65 - Modes de maintenance des équipements de climatisation à air

Secteur	Sous-secteur	Rythme de maintenance	Seuil
Climatisation à air Et PAC air/air	PAC air/air Mono splits	selon seuil	90 %
	PAC air/air Multi-splits	selon seuil	90 %
	Systèmes split centralisés	selon seuil	90 %
	Roof-top	selon seuil	80 %
	PAC air/air DRV	selon seuil	80 %
	Mobiles	Pas de maintenance	-
	Windows	selon seuil	70 %
	Consoles	selon seuil	70 %
	Armoires spéciales	selon seuil	70 %

Durée de vie moyenne

La durée de vie moyenne des équipements varie entre 10 et 20 ans, selon les équipements. Les hypothèses présentées au Tableau 66 sont basées sur les anciens rapports d'inventaire d'émissions de fluides frigorigènes [Ref 5]. Comme pour les autres secteurs, une courbe de durée de vie est appliquée, à partir de ces valeurs moyennes.

Tableau 66 - Durées de vie moyenne des équipements de climatisation à air

Sous-secteur	Durée de vie (ans)
Mobiles	10
Windows	10
PAC air/air Mono split	15
PAC air/air Multi split	15
Armoires verticales	15
PAC air/air DRV	15
Systèmes split centralisé	15
Roof top	20
Armoires spéciales	15

2. Données et hypothèses

2.1 Données d'activités

2.1.1 Marchés et productions

MARCHES

Dans le cadre de la reconstitution de la base de données de la France métropole, les statistiques de marchés d'équipements ont été communiquées par Uniclimate [Ref 31] de 2000 à 2020. La représentativité des adhérents d'Uniclimate est estimée à 92 % à l'exception du sous-secteur des rooftops pour lesquels le marché national est estimé à partir des estimations transmises par le fabricant Lennox à partir de 2015.

Remarque : l'ordre de grandeur de la représentativité donné par Uniclimate a pu varier et être moins élevé par le passé. Cette incertitude pourrait impliquer une légère sous-estimation du parc d'équipements dans l'inventaire.

Les marchés des climatiseurs mobiles, qui ne sont pas suivis par Uniclimate, ont été estimés à partir des données indiquées dans les anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 5]. Faute d'information, les marchés sont supposés constants depuis 2013. Ce sous-secteur est marqué d'une forte incertitude.

Par ailleurs, des données détaillées par gamme de puissances ont été transmises pour les équipements suivants :

- Climatiseur mono-split ;
- Climatiseur multi-split ;
- DRV ;
- Rooftop

Ce qui permet d'affiner l'estimation de la charge moyenne et des quantités de fluides frigorigènes mises sur le marché par sous-secteur.

Les marchés historiques (avant 2002) des équipements de climatisation à air ont été reconstitués à partir des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 5], du rapport RTOC 2002, d'hypothèses sur le début du marché de la climatisation en France (pris en 1970) avec l'hypothèse d'un taux d'accroissement linéaire entre 1970 et 1999.

PRODUCTIONS

Les équipements de grandes puissances sont chargés sur site ou avec un complément de charge sur site et ceux de petites puissances en usine (Tableau 64). Les productions annuelles en France par type d'équipement ne sont pas collectées par une fédération. Elles sont estimées sur la base des hypothèses suivantes.

- Des ratios ont été établis entre les niveaux de production d'équipements et ceux des marchés dans les anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 5]. Ces ratios sont basés sur des communications ponctuelles, le plus souvent pour l'année 2004. Ils conduisent à des

évaluations de la production à 6 % du marché pour les climatisations mobiles, 23 % pour les climatisations fenêtres, 6 % pour les mono-split, 10 % pour les multi-split et 150 % pour les rooftop. Ces valeurs sont prises en compte en première estimation et pourront être corrigées en fonction des retours de fabricants.

- Il est également pris en compte, selon les communications de certains fabricants d'équipements que :
 - o les DRV n'ont pas été fabriqués en France mais sont importés,
 - o les climatisations mobiles et fenêtres ne sont plus produites en France, depuis 2010 et 2011, respectivement.

2.1.2 Charge nominale

Selon les équipements, leur mode de charge, le raffinement des données disponibles et l'évolution au cours du temps, les charges nominales des équipements sont estimées de différentes façons.

- *Charge constante*

Pour les applications présentées au tableau suivant, la charge est considérée constante.

Tableau 67 - hypothèses de charge nominale constante pour certains équipements de climatisation à air

Sous-secteur	Charge moyenne (kg)
Climatiseurs mobiles	0,5
Climatisation de fenêtre	0,6
Armoires verticales	2,8
Armoires spéciales	18

- *Charge variant selon une courbe en S*

Pour les systèmes splits centralisés, les études d'inventaire considéraient jusqu'en 2016 une charge constante de 7,5 kg. Afin de prendre en compte les valeurs historiques données par les rapports du RTOC et les retours de la profession sur les hypothèses, tendant à considérer ce niveau trop élevé sur les années récentes, une réduction de charge selon une courbe en S est supposée pour cette application (Figure 87).

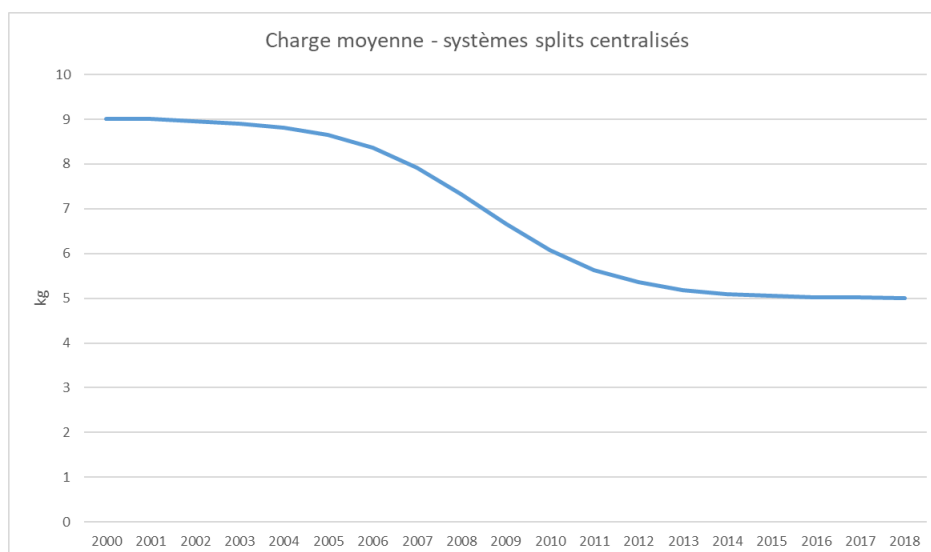


Figure 87 - Evolution de la charge des systèmes splits centralisés

Ces valeurs sont basées sur des communications de fabricants mentionnées dans les anciens rapports d'inventaire [Ref 5].

- *Charge établie à partir du ratio de charge(kg/kW)*

Pour les équipements dont le marché est connu par gamme de puissance, la charge moyenne est calculée à partir d'un ratio de charge, communiqué par les fabricants d'équipements, exprimé en kg de fluide frigorigène par unité de puissance et d'une puissance moyenne calculée sur la base des ventes par gamme de puissance.

$$Charge\ moyenne(i) = \sum_i Marché(i) * Ratio\ de\ charge(i) * Puissance(i) / Puissance\ totale$$

Ce calcul plus fin est réalisé pour les mono-splits, multi-splits, DRV et rooftops.

Tableau 68 - charges nominales 2020 des équipements de climatisation à air

Sous-secteur	Charge moyenne 2020 (kg)
PAC air/air Mono-splits	1,2 (R-410A) 1,07 (R-32)
PAC air/air Multi-splits	1,9 (R-410A) 1,7 (R-32)
PAC air/air DRV	6,6
rooftops	17 (R-410A) 15,3 (R-32)

- *Complément de charge*

Certains équipements chargés d'usines nécessitent un complément de charge au moment de l'installation. C'est notamment le cas des systèmes splits centralisés, des multi-splits et des DRV. Le complément de charge s'applique aux charges nominales d'usine (Tableau 68).

Pour les DRV, ce complément de charge varie en fonction de la puissance de l'équipement et a été calculé à partir des données d'un fabricant. Un complément de charge d'environ 78 % de la charge initiale a été calculé. Ce complément de charge est supposé constant pour toutes les années.

Pour les multi-splits, un complément de charge de 50 % est pris en compte dans les calculs, 30 % pour les systèmes split centralisés.

2.1.3 Fluides frigorigènes utilisés

La réglementation (UE) N° 517/2014 impose une interdiction de mise sur le marché des équipements de type split utilisant un HFC dont le PRG > 750 à partir de 2025 et une interdiction des climatisations mobiles utilisant des HFC dont le PRG > 150 à partir de 2020. Le R-32 est progressivement introduit dans la plupart des sous-secteurs d'équipements et représente la quasi-totalité du marché des mono-splits et multi-splits. Le HC-290 a remplacé en 5 ans le R-410A dans les équipements de type mobile.

L'évolution des fluides frigorigènes utilisés a été reconstituée sur le passé à partir des données communiquées par Uniclimate [Ref 31] pour les années les plus récentes (à partir de 2000 pour la

majorité des équipements). Il s'agit du nombre d'équipements mis sur le marché par type de réfrigérant. Cette information permet d'obtenir une tendance et pourrait être plus précise si Uniclimate pouvait transmettre les quantités totales de réfrigérants mises sur le marché par type d'équipement. Ces données annuelles ont été transmises pour les équipements suivants :

- PAC air/air Mono-split ;
- PAC air/air Multi-split ;
- Systèmes split centralisés ;
- Rooftop ;
- PAC air/air DRV.

Pour les autres équipements, les hypothèses concernant les réfrigérants utilisés sont issues des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes (de 1999 à 2016) [Ref 5] et sont linéarisées en cas de manque d'information. Depuis 2017, les données sont estimées sur la base des tendances des années précédentes.

Les hypothèses pour l'année 2020 sont récapitulées au tableau suivant.

Tableau 69 - Fluides frigorigènes utilisés sur les marchés neufs des équipements de climatisation à air en 2020

Sous-secteur	Fluides frigorigènes utilisés en 2020
Mobiles	100% R-290
Windows	100% R-410A
PAC air/air Mono split	3% R-410A 97% R-32
PAC air/air Multi split	3% R-410A 97% R-32
Armoires verticales	96% R-410A 4% R-407C
PAC air/air DRV	100% R-410A
Systèmes split centralisé	95% R-401A 5% R-32
Roof top	90% R-410A 10% R-32
Armoires spéciales	100% R-410A

Les hypothèses sur les années antérieures à 2001 ont été établies à partir des rapports du RTOC et de données d'experts. Il est considéré :

- que l'intégralité du marché des nouveaux équipements est au R-22 à partir de 1990 ;
- que le R-407C a été utilisé à partir de 2000 comme substitut du R-22, puis le R-410A a été introduit progressivement.

2.1.4 Durée de vie

Dans le secteur de la climatisation à air, 2 types de courbes de durée de vie ont été établis, en fonction des durées de vie moyennes qui caractérisent jusqu'à présent les équipements : 15 ans pour les mono-splits, multi-splits, armoires verticales, DRV, splits centralisés, rooftop et armoires spéciales et 10 ans pour les climatiseurs fenêtres et mobiles. Elles sont présentées Figure 88 et Figure 89.

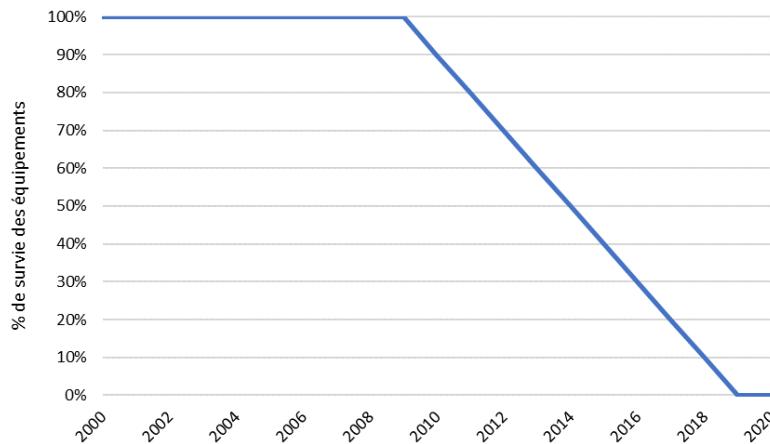


Figure 88 : Courbe de durée de vie des PAC air/air mono splits, PAC air/air multi splits, armoires verticales, PAC air/air DRV, centrale AC, rooftop et armoires spéciales

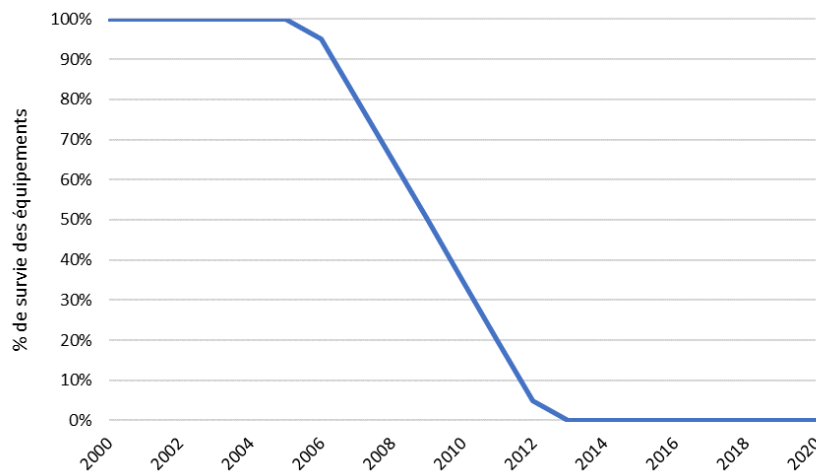


Figure 89 : Courbe de durée de vie des climatiseurs fenêtres et climatiseurs mobiles

2.2 Facteurs d'émissions

2.2.1 A la charge

Pour estimer les facteurs d'émission à la charge, on distingue si les équipements sont chargés d'usine ou sont chargés sur site.

Les facteurs d'émission à la charge sont supposés décroître selon une courbe en S. Celle-ci a été modélisée pour les deux modes de charges à partir d'une valeur seuil à atteindre à l'horizon 2015 afin de prendre en compte l'amélioration continue des pratiques et maîtrise des charges d'équipements. La valeur asymptotique estimée pour l'année 2015 a été calculée à partir des données d'un producteur d'équipements en France (équipement chargé d'usine) et la même allure est adoptée pour les équipements chargés sur site.

Ces taux d'émission à la charge pourraient être affinés en prenant en compte d'autres producteurs d'équipements en France et en les faisant évoluer annuellement sur la base des déclarations des exploitants dans GEREPE.

Remarque : les facteurs d'émission calculés montrent des valeurs supérieures à l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 (entre 0,2 et 1 %).

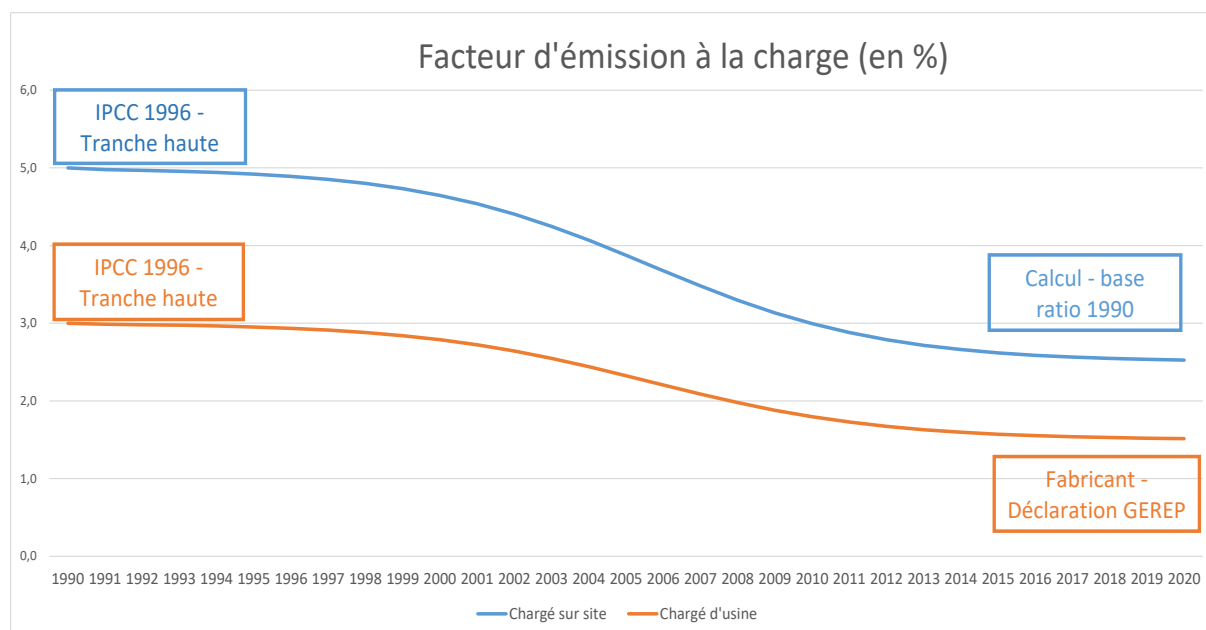


Figure 90 : Facteur d'émission à la charge (en %) des équipements de climatisation à air

2.2.2 Fugitif

Les taux d'émission pendant le fonctionnement de l'équipement sont également supposés évoluer selon une courbe en S (Figure 91).

Pour la majorité des équipements de PAC et de climatisation, le facteur d'émission utilisé en 1990 provient de la tranche haute des Lignes directrices du GIEC 2006 (10 %). Cette valeur est également utilisée pour les années antérieures à 1990. Les courbes ont été construites à partir des valeurs utilisées pour l'année 2016 selon le rapport d'inventaire des fluides frigorigènes.

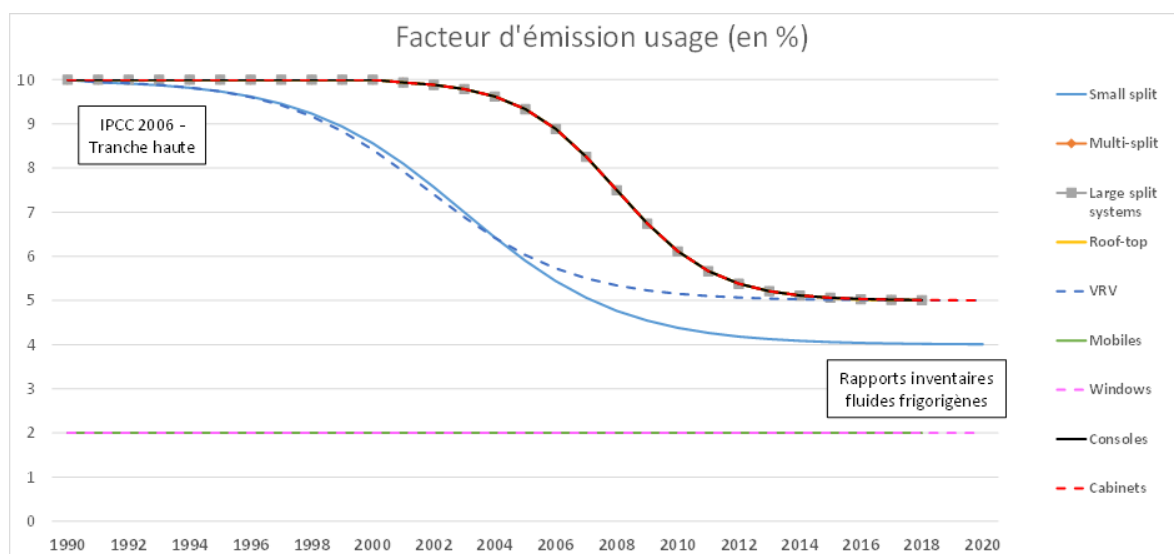


Figure 91 : Facteur d'émission pendant la durée de vie - PAC air/air et climatisation fixe (en %)

Pour les climatisations mobiles et les climatisations « fenêtres », un taux d'émission constant et égal à 2 % est pris en compte dans les calculs afin de tenir compte des pertes accidentelles.

Remarque : ces hypothèses conduisent à des facteurs d'émissions compris dans l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 (entre 1 et 10 %).

2.2.3 A la maintenance

L'évolution du taux d'émission à la maintenance pour le secteur de la climatisation à air est donnée sur les figures ci-dessous. Elle suppose un taux d'émission évoluant de 10 % à 2 % entre 1990 et 2020.

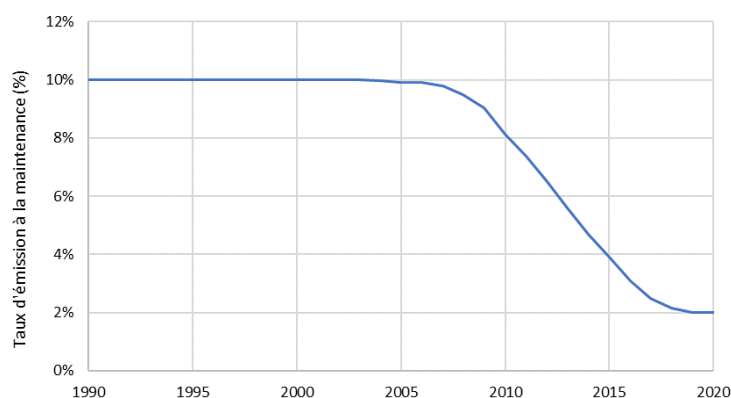


Figure 92 - Taux d'émissions à la maintenance des équipements de climatisation à air

2.2.4 En fin de vie

Pour la climatisation stationnaire, quatre courbes d'évolution sont proposées afin de prendre en compte au mieux les pratiques de récupération des fluides dans les divers équipements. Ces courbes sont établies de manière identique sur la base d'une courbe en S comportant une année de démarrage de la récupération et une année asymptotique projetée à l'horizon 2030. Ils diffèrent en fonction du type d'équipement étudié.

- **Modèle 1 :**

Ce modèle est représentatif des climatisations domestiques qui sont gérées par la filière DEEE créée en 2003. Les particuliers doivent faire récupérer et traiter leurs équipements en fin de vie par ces organismes. Les équipements concernés par ce modèle sont les climatisations de type mobiles et fenêtres.

Hypothèses de ce modèle :

- Année de démarrage : 2006 (année des premiers retours de la filière de récupération) ;
- Taux de récupération estimé en 2030 : 60 %.

- **Modèle 2 :**

Ce modèle est représentatif des climatisations utilisées dans le résidentiel/tertiaire et pour lesquelles un technicien intervient pour le remplacement de l'équipement en vue de l'envoyer en filière DEEE. Les équipements concernés par ce modèle sont les climatisations de type console, cabinet, mono-split et multi-split.

Hypothèses de ce modèle :

- Année de démarrage : 2006 (année des premiers retours de la filière de récupération) ;
- Taux de récupération estimé en 2030 : 80 %.

- *Modèle 3 :*

Ce modèle est représentatif des climatisations et PAC utilisées dans le tertiaire et pour lesquelles les interventions sont faites par des opérateurs spécialisés. Les équipements concernés par ce modèle sont les climatisations de type PAC air/air DRV, rooftop et système split centralisé.

Hypothèses de ce modèle :

- Année de démarrage : 1992 (correspond aux débuts de la réglementation sur la récupération en France et à la convention volontaire de 1993 signée par la filière du froid, le ministère et l'ADEME pour favoriser la récupération des fluides des équipements en fin de vie.) ;
- Taux de récupération estimé en 2030 : 90 %.

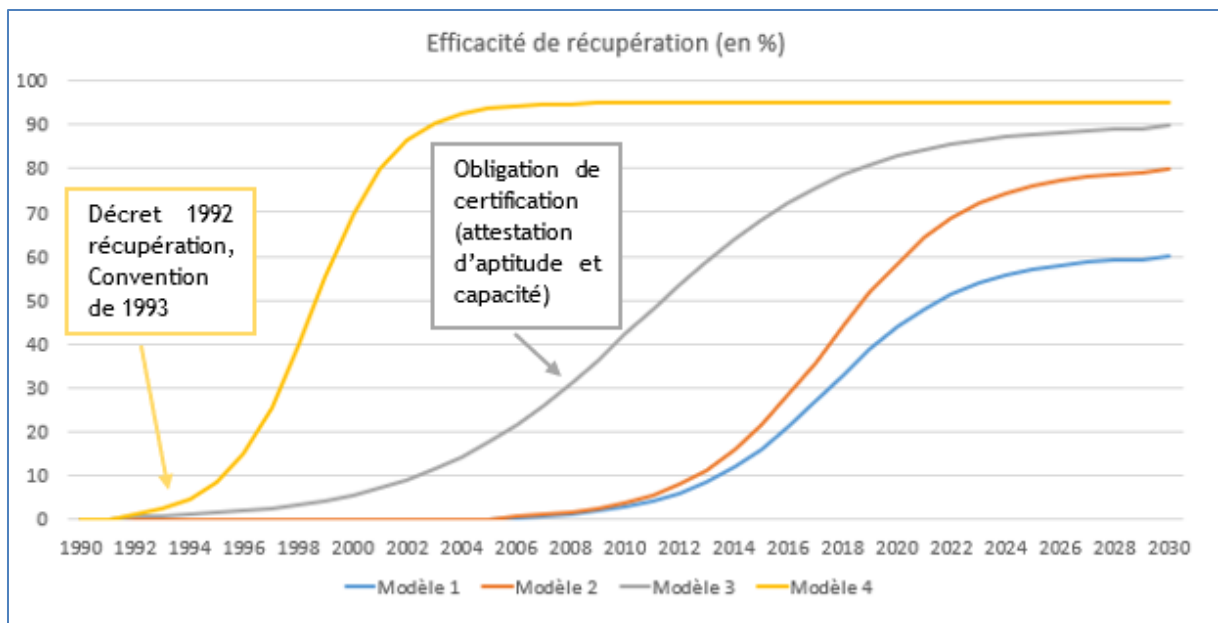


Figure 93 : Efficacité de récupération en fin de vie (en %) des équipements de la climatisation et PAC à air

3. Résultats

3.1 Banque

La banque des équipements de climatisation à air et des PAC air/air est en croissance continue, de plus de 4 % entre 2019 et 2020. Elle s'élève à 13 567 tonnes et est constituée de près de 80 % de R-410A. La banque d'hydrocarbures est faible et ne concerne que les équipements hermétiques de type mobile devant satisfaire, pour l'ensemble du marché, à compter de 2020, à l'exigence réglementaire de n'utiliser que des fluides frigorigènes de PRG<150 (Tableau 70).

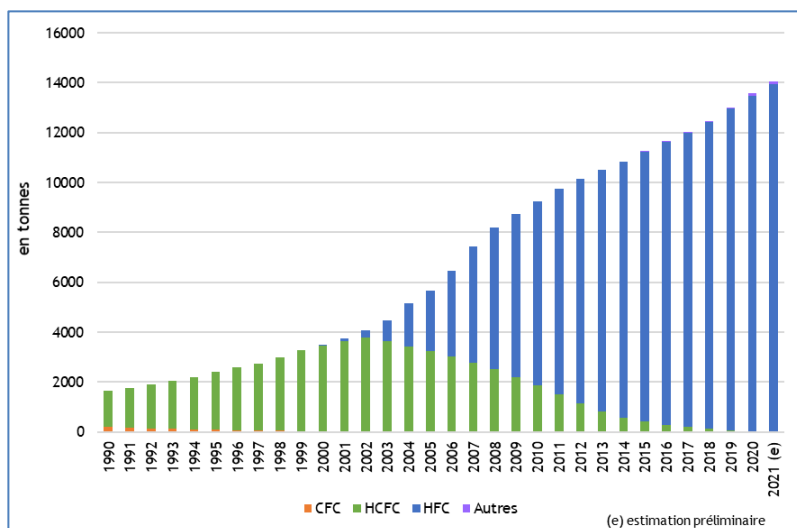


Figure 94 : Banque de fluide dans le secteur de la climatisation à air et PAC air/air

Tableau 70 : Banque de fluide

Fluide frigorigène	2020 (en t)
R-22	21
Total HCFC	21
R-32	1 729
R-134a	19
R-407C	893
R-410A	10 727
R-417A	44
R-422D	28
R-427A	21
Total HFC	13 460
R-290	86
Total Autres	86
Total général	13 567

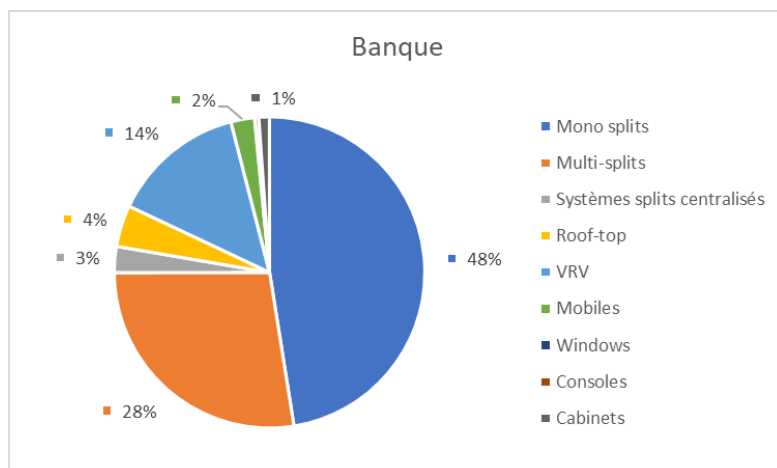


Figure 95 - Répartition sectorielle de la banque 2020 de la climatisation à air et PAC air/air

D'un point de vue sous-sectoriel, la banque est dominée par des équipements de type mono-splits (48 %) et multisplits (28 %).

3.2 Demande

3.2.1 Besoin pour les équipements neufs

La demande relative à la charge dans le secteur de la climatisation fixe et des PAC air/air est dans sa totalité constituée de HFC, notamment de R-32 (48 % du total des fluides) et de R-410A (52 % du total des fluides). En 2020, on estime cette quantité à 392,5 tonnes

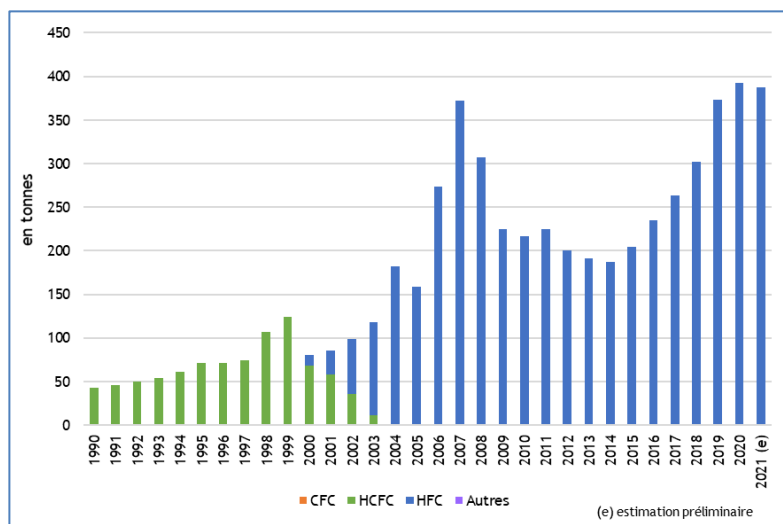


Figure 96 : Quantités nécessaires à la charge des équipements de la climatisation fixe

Tableau 71 : Besoin pour la charge 2020

Fluide	2020 (en t)
R-32	187,4
R-410A	205,2
Total HFC	392,5
Total général	392,5

L'allure du besoin pour la production des équipements de climatisation et PAC air/air en France est identique, constituée uniquement de HFC (125,2 tonnes) et principalement de R-32 (72 %).

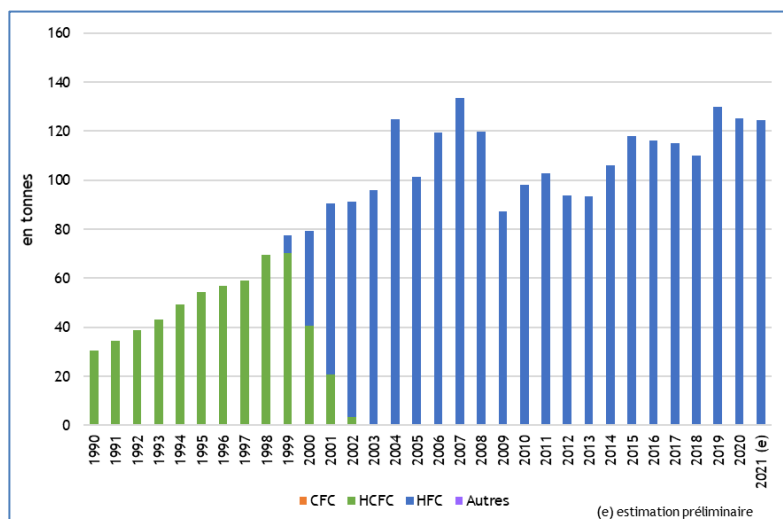


Figure 97 : Quantités nécessaires à la production dans le secteur de la climatisation et PAC air/air fixe

Tableau 72 : Besoin pour la production 2020

Fluide	2020 (en t)
R-32	88,6
R-410A	36,6
Total HFC	125,2
Total général	125,2

Les comparaisons de la demande et du marché de R-32 tendent cependant à montrer que la production d'équipements préchargés au R-32 en France pourrait être surestimée.

3.2.2 Besoin pour la maintenance

En 2020, le besoin pour la maintenance des installations présentes sur le parc de France métropole est évalué à 330 tonnes dont plus grande partie est du R-410A (90%). Malgré une croissance continue de la banque, une baisse générale du besoin pour la maintenance est observée, liée à l'amélioration des niveaux d'émissions.

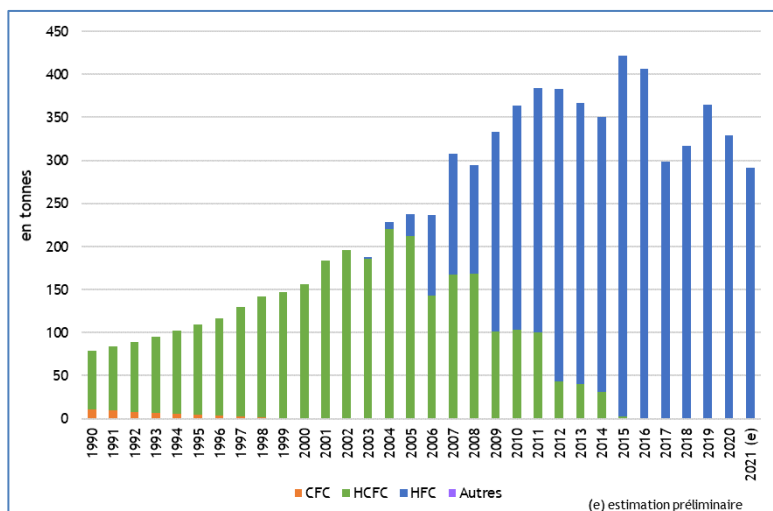


Figure 98 : Quantités nécessaires à la maintenance dans le secteur de la climatisation et PAC air/air fixe

Tableau 73 : Quantités pour la maintenance 2020

Fluide	2020 (en t)
R-32	1,2
R-407C	28,4
R-410A	295,0
R-417A	1,37
R-422D	0,55
R-427A	0,46
Total HFC	328,5
Total général	328,5

3.2.3 Besoin pour le retrofit

Ces dernières années, il n'est pas pris en compte de retrofit sur les installations de la climatisation et PAC air/air fixe.

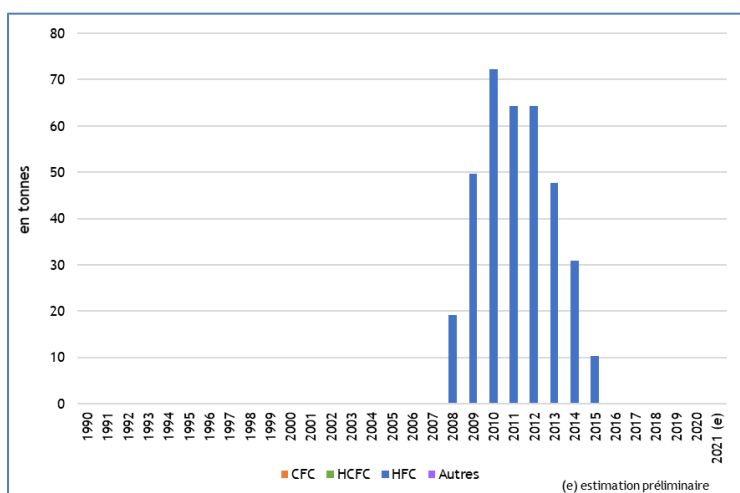


Figure 99 : Quantités requises pour le retrofit dans le secteur de la climatisation et PAC air/air fixe

3.3 Emissions

3.3.1 Emissions totales

Les émissions totales du secteur de la climatisation et PAC à air sont estimées à 964 tonnes pour 2020, en diminution par rapport à 2020. Comme la banque, les émissions sont dominées par le R-410A (78 %). Le parc d'installations au R-22 n'étant pas encore totalement parvenu à sa fin de vie, ayant un taux d'émissions plus élevé du fait de l'âge des équipements, les émissions de R-22 représentent encore 1,6 % du total (Tableau 74).

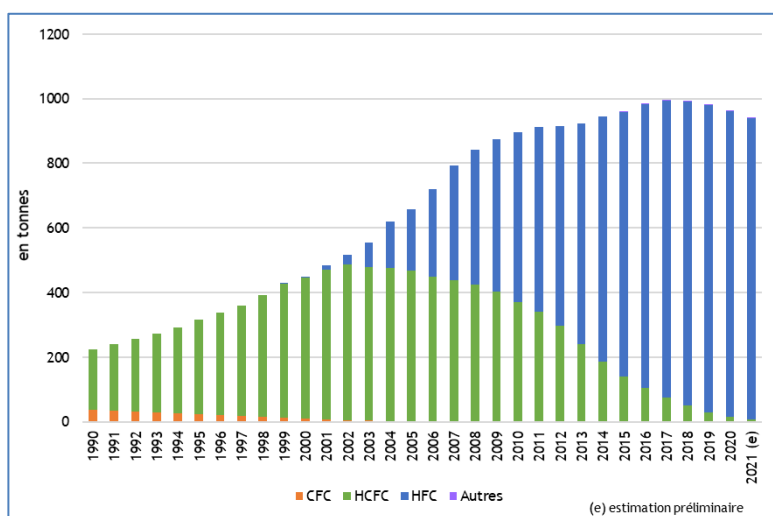


Figure 100 : Emissions totales du secteur de la climatisation et PAC air/air fixe

Tableau 74 : Emissions totales 2020

Fluide	2020 (en t)
R-22	15,6
Total HCFC	15,6
R-32	83,6
R-134a	2,3
R-407C	125,2
R-410A	729,1
R-417A	2,4
R-422D	2,4
R-427A	1,6
Total HFC	946,6
R-290	1,7
Total Autres	1,7
Total général	963,9

Les émissions fugitives de la climatisation et PAC air/air fixe constituent la majeure partie des émissions du secteur : 690 tonnes en 2020 soit 72 %. Les émissions de fin de vie des équipements de la climatisation et PAC air/air fixe représentent une part non négligeable des émissions totales (27 % en 2020), du fait, notamment des équipements de climatisation et chauffage domestique.

3.3.2 Emissions CO₂ équivalentes

En équivalent CO₂, les émissions du secteur de la climatisation et PAC à air s'élèvent à 1,85 millions de tonnes. Celles-ci sont en diminution depuis 2017, où un pic d'émissions a été atteint (2 millions de tonnes). Les PRG des principaux fluides utilisés dans ce secteur sont proches, ce qui explique que les évolutions des émissions CO₂ (Figure 101) et des émissions totales (Figure 100) aient la même allure. Les émissions équivalentes CO₂ sont donc également dominées par le R-410A (PRG = 2 100 selon le 4^{ème} rapport du GIEC) à 82 %.

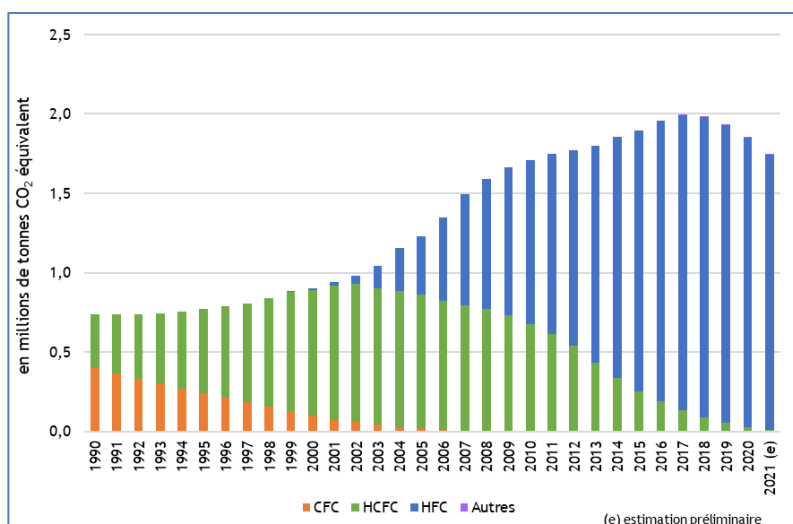


Figure 101 : Emissions CO₂ équivalentes de la climatisation et PAC air/air fixe

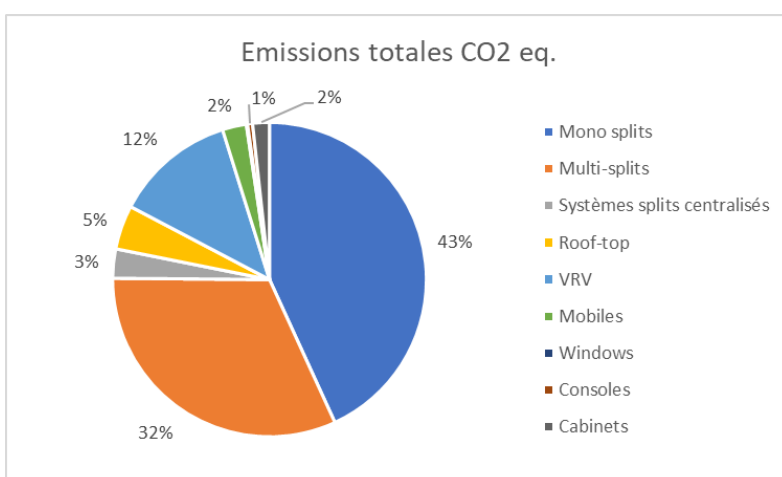


Figure 102 - répartition sectorielle des émissions de la climatisation et PAC à air en 2020

Tableau 75 : Emissions CO₂eq. 2020

Fluide	2020 (Mt CO ₂ e)
R-22	0,028
Total HCFC	0,028
R-32	0,056
R-134a	0,003
R-407C	0,222
R-410A	1,522
R-417A	0,006
R-422D	0,007
R-427A	0,004
Total HFC	1,819
R-290	0,000
Total Autres	0,000
Total général	1,848

Les taux d'émissions des différents équipements étant assez proches et les PRG des fluides frigorigènes utilisés en climatisation et PAC à air également, l'allure sectorielle des émissions CO₂ équivalentes est assez proche de celle de la banque, dominée par les splits et multi-splits (Figure 102).

IX. Pompes à chaleurs réversibles

1. Introduction

Le secteur des pompes à chaleur réversibles (PAC) est composé de 5 sous-secteurs :

- Les PAC Air/Eau ;
- Les PAC Sol/Sol ;
- Les PAC Sol/Eau ;
- Les PAC Eau/Eau ;
- Les chauffe-eaux thermodynamiques.

Les PAC air/air sont prises en compte dans la climatisation à air et sont devenues majoritaires sur le marché depuis 2010.

Modes de charge

Les pompes à chaleurs réversibles sont des équipements chargés d'usine.

Modes de maintenance

Il est considéré que les PAC subissent une opération de maintenance dès lors que leur charge passe en deçà du seuil de 90% de la charge nominale. Ces équipements ne nécessitent pas de décharge complète du fluide pendant la maintenance.

Durée de vie moyenne

La durée de vie moyenne des équipements est supposée de 15 ans, cette hypothèse provient des anciens rapports d'inventaire d'émissions de fluides frigorigènes [Ref 5]. Comme pour l'ensemble des équipements une courbe de durée de vie est prise en compte (Figure 103).

2. Données et hypothèses

2.1 Données d'activités

2.1.1 Marchés et productions

2.1.1.1 Données

MARCHES

Les statistiques des marchés des PAC Air/Eau proviennent des données de l'AFPAC (l'association française pour la pompe à chaleur) jusqu'en 2013 puis d'Uniclimate [Ref 31] pour différentes gammes de puissance. Aucun facteur correctif n'a été appliqué sur les marchés AFPAC, il est supposé être représentatif du marché français.

Les marchés par type de PAC géothermiques ont été reconstitués en utilisant les rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 5] jusqu'en 2007 puis les données Uniclimate à partir de 2008.

Les données de marchés des chauffe-eaux thermodynamique sont également issues de l'AFPAC [Ref 32] et d'Uniclimate [Ref 31]. Ce marché a démarré en 2008.

Pour la reconstitution de la base de données, il est supposé que le marché des PAC a débuté en 1996. Les marchés avant 2002 proviennent de deux sources : l'association française pour la pompe à chaleur [Ref 32] et les rapports d'inventaires de fluides frigorigènes [Ref 5].

PRODUCTIONS

Les productions annuelles en France ne sont pas collectées par une fédération. Par conséquent, ces valeurs sont estimées sur la base d'une information extraite du rapport d'inventaire des fluides frigorigènes [Ref 5] qui évalue, à partir d'une communication confidentielle, la production de PAC à 10 % du marché excepté pour les PAC Air/Eau où elle est estimée à 30 % du marché.

Toutes les données concernant les productions françaises sont marquées d'une forte incertitude. Cependant, les émissions durant la fabrication des équipements sont très faibles par rapport aux émissions totales du secteur.

2.1.2 Charge nominale

Les hypothèses de charges nominales des différents types de PAC sont basées sur des communications de fabricants mentionnées dans les anciens rapports d'inventaire [Ref 5]. Pour les PAC Air/Eau, des informations complémentaires fournies par Uniclimate ont permis d'évaluer la puissance moyenne des équipements mis sur le marché et, considérant un ratio de 0,23kg/kW, de calculer une évolution de la charge moyenne au cours du temps. Par ailleurs, il est considéré que la charge des PAC air/eau fonctionnant au R-32 est de 10% inférieure à celle du R-410A. Pour les autres sous-secteurs, les valeurs sont considérées constantes. Les valeurs des charges moyennes pour l'année 2020 sont présentées au Tableau 76.

Tableau 76 - charges nominales des PAC en 2020

Sous-secteur	Charge moyenne 2020 (kg)
PAC Air/Eau	2,7 pour le R-410A 2,4 pour le R-32
PAC Eau/Eau	2,5
PAC Sol/Eau	15
PAC Sol/Sol	15
CET	0,5

2.1.3 Fluides frigorigènes utilisés

Depuis 2006, les hypothèses concernant les réfrigérants utilisés sont basées sur les données d'Uniclimate. Sur les années antérieures, les hypothèses proviennent des rapports d'inventaire de fluides frigorigènes.

Pour les CET, seul le R-134a est pris en compte jusqu'en 2020.

Dans la reconstitution de l'évolution des fluides utilisés par le passé, il est supposé que le R-22 a été le seul fluide frigorigène utilisé dans les pompes à chaleur avant les années 2000. La réglementation n°2037/2000 interdisant la production d'équipement au R-22 à partir du 1er janvier 2004 pour les PAC, il a été supposé un arrêt progressif entre 2002 et 2004 et une utilisation généralisée du R-410A

et R-407C. L'introduction du R-32 est prise en compte à partir de 2018. Les hypothèses 2020 sont présentées au tableau suivant.

Tableau 77 - Fluides frigorigènes utilisés sur le marché neuf des PAC en 2020

Sous-secteur	Fluides frigorigènes
PAC Air/Eau	85% R-410A 15% R-32
PAC Eau/Eau	87% R-410A
PAC Sol/Eau	13% R-407C
PAC Sol/Sol	
CET	100% R-134a

2.1.4 Durée de vie

Pour tous les sous-secteurs des PAC réversibles, il est pris en compte la courbe de durée de vie ci-dessous, basée sur une durée de vie moyenne de 15 ans.

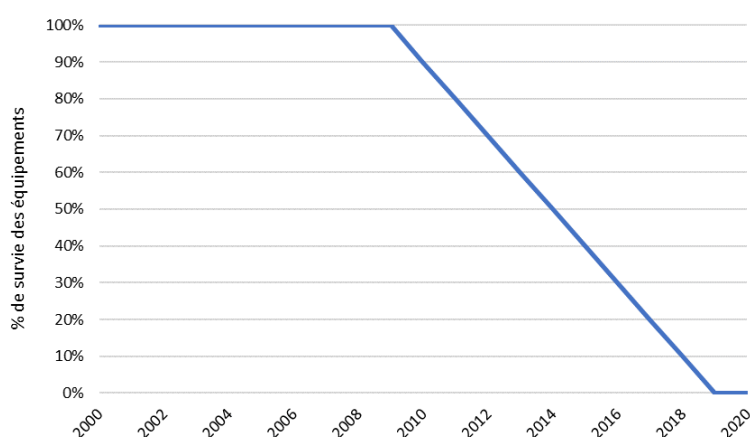


Figure 103 - Courbe de durée de vie des pompes à chaleurs réversibles

2.2 Facteurs d'émissions

2.2.1 A la charge

Les mêmes hypothèses que pour les équipements de climatisation à air chargés d'usine sont pris en compte (Figure 90).

2.2.2 Fugitif

Les taux d'émission fugitifs sont supposés évoluer selon une courbe en S à l'exception des CET pour qui le même facteur d'émission que les équipements de réfrigération domestique est appliqué (0,01 %, constant). Les courbes sont construites en considérant la tranche haute des Lignes directrices

du GIEC 2006 (10 %) pour le facteur d'émission en 1990 et les valeurs données pour l'année 2016 dans l'ancien rapport d'inventaire des fluides frigorigènes.

Remarque : les facteurs d'émission estimés pour les années récentes sont inclus dans l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 (entre 1 et 10 %)

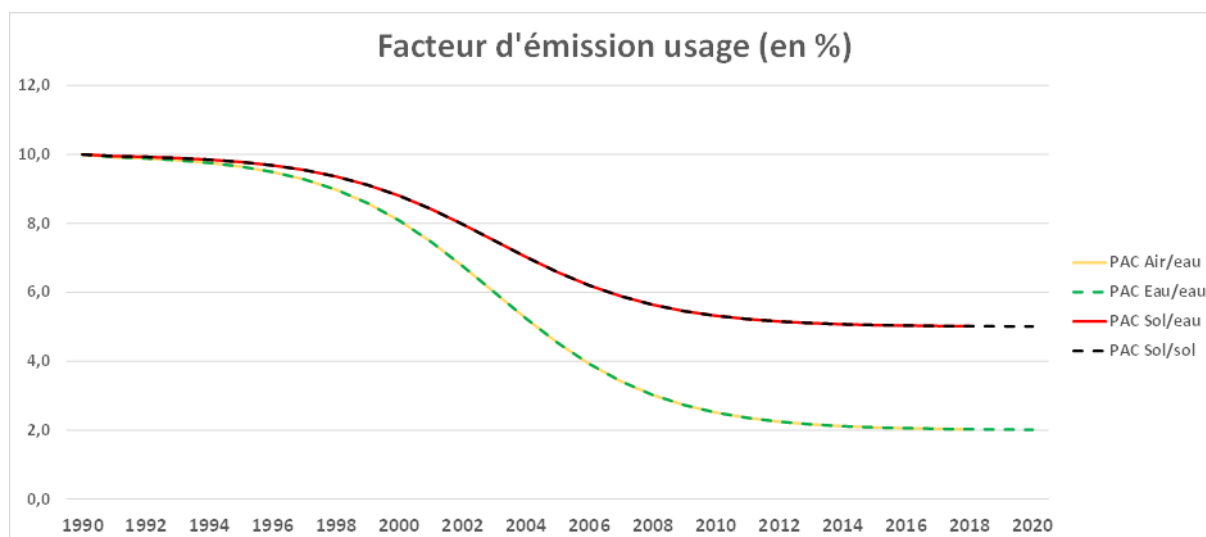


Figure 104 : Facteur d'émission fugitif - pompes à chaleurs réversibles (en %)

2.2.3 A la maintenance

L'évolution du taux d'émission à la maintenance pour le secteur des pompes à chaleurs réversibles est la même que pour les équipements de climatisation à air, évolue de 10 % à 2 % entre 1990 et 2020 (Figure 92).

2.2.4 En fin de vie

Le facteur d'émission en fin de vie des pompes à chaleur résidentielles est supposé suivre le modèle 1 (climatisation domestique) des courbes en S proposées pour les équipements de climatisation, Figure 93. L'efficacité de récupération de la filière est évaluée à 45 % en 2020.

3. Résultats

3.1 Banque

La banque des pompes à chaleur résidentielles est en croissance continue du fait de celle des marchés d'équipements et est estimée à 4 300 tonnes en 2020. Elle représente actuellement seulement 7 % de la banque totale de fluides frigorigènes en France mais elle a augmenté de plus de 6% par an ces deux dernières années, du fait de la forte hausse du marché des PAC air/eau. Elle est dominée par le R-410A à 74 %. La progression des PAC utilisant le propane est relativement lente du fait des barrières règlementaires, la banque d'hydrocarbures ne représente que 0,18 % de la banque des PAC 2020.

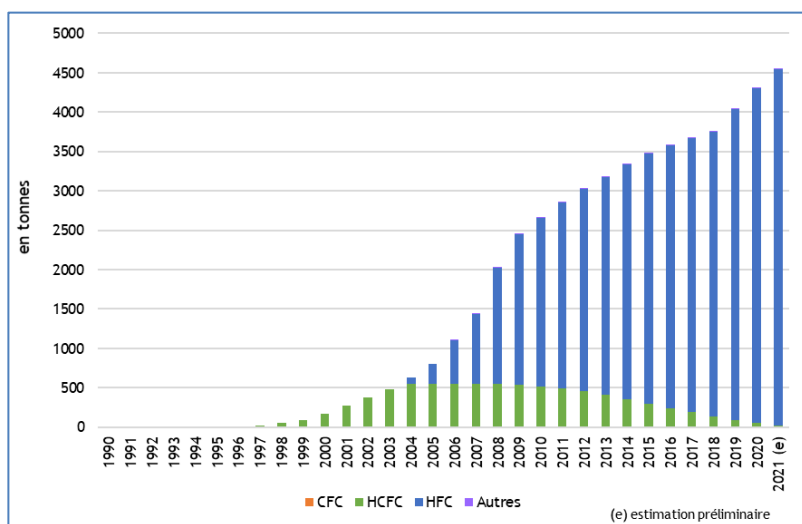


Figure 105 : Banque de fluide dans le secteur des pompes à chaleur

Tableau 78 : Banque de fluide

Fluide	2020 (en t)
R-22	53,8
Total HCFC	53,8
R-32	117,5
R-134a	396,6
R-404A	26,1
R-407C	517,4
R-410A	3 188,4
Total HFC	4 246,1
R-290	7,5
R-744	0,7
Total Autres	8,1
Total général	4 308,0

3.2 Demande

3.2.1 Besoin pour les équipements neufs

Le besoin pour les équipements neufs concerne la production en France, les PAC étant chargées d'usine. La totalité de la demande est constituée de HFC, notamment de R-410A (72 % du total des fluides). En 2020, cette quantité est faible, estimée à 82 tonnes.

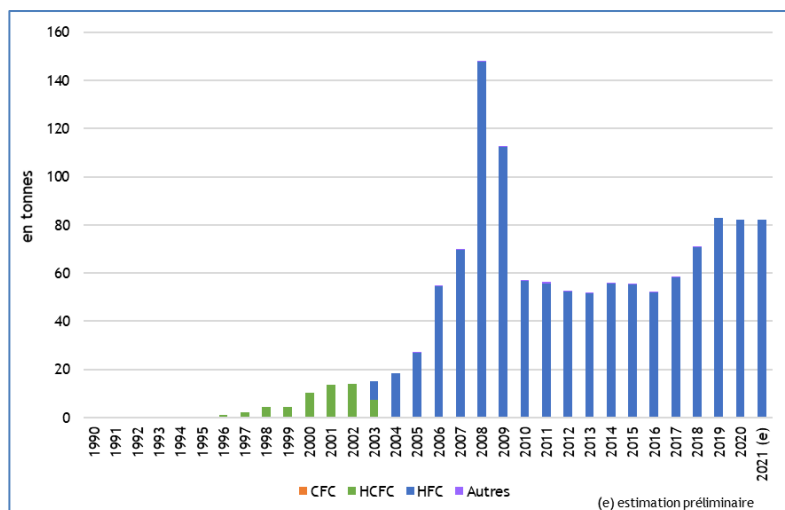


Figure 106 : Quantités requises à la production dans le secteur des pompes à chaleur

Tableau 79 : Besoin production 2020

Fluide	2020 (en t)
R-32	17,5
R-134a	5,1
R-407C	0,34
R-410A	59,1
Total HFC	82,0
Total général	82,0

3.2.2 Besoin pour la maintenance

Dans ce secteur, la maintenance des équipements n'étant pas annuelle, la demande en fluides frigorigènes pour la maintenance annuelle est très variable. Les taux d'émissions étant par ailleurs faibles, le besoin pour la maintenance l'est aussi. Le besoin pour la maintenance dans le secteur des pompes à chaleur est estimé à 32 tonnes en 2020, essentiellement composé de R-410A (74 %).

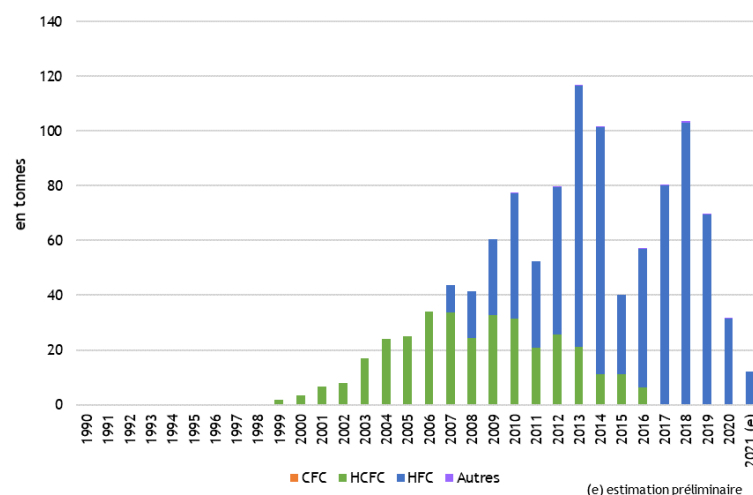


Figure 107 : Quantités requises pour la maintenance dans le secteur des pompes à chaleur

Tableau 80 : Quantités pour la maintenance 2020

Fluide	2020 (en t)
R-134a	0,07
R-404A	0,20
R-407C	7,8
R-410A	23,4
Total HFC	31,5
Total général	31,5

3.2.3 Besoin pour le retrofit

Il n'est pas pris en compte d'opérations de retrofit pour les installations du secteur des pompes à chaleur réversibles.

3.3 Emissions

3.3.1 Emissions totales

Les premières PAC mises sur le marché français datent de 1997-1998 et le marché croît significativement seulement à partir de 2005. Avec une durée de vie moyenne de 15 ans, le nombre d'équipements parvenant à leur fin de vie commence à être significatif.

Les émissions présentées Figure 108 sont désormais dominées par les émissions en fin de vie à 52 % puis par les émissions fugitives à 47 %.

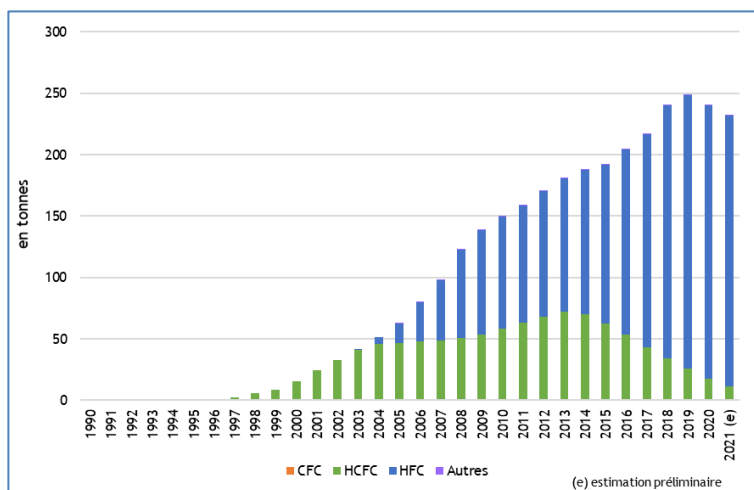


Figure 108 : Emissions totales du secteur des pompes à chaleur

Les émissions totales, à l'image de la banque sont composées essentiellement de R-410A (92 %).

Tableau 81 : Emissions totales 2020

Fluide	2020 (en t)
R-22	17,8
Total HCFC	17,8
R-32	2,7
R-134a	1,1
R-404A	1,2
R-407C	51,5
R-410A	165,5
Total HFC	222,1
R-290	0,31
R-744	0,04
Total Autres	0,36
Total général	240,3

3.3.2 Emissions CO₂ équivalentes

L'impact du secteur des PAC sur les émissions CO₂ équivalentes est faible, de seulement 477 000 tonnes, les parcs d'équipements étant parvenus en fin de vie étant encore peu nombreux et les charges nominales et taux d'émissions des équipements étant faibles.

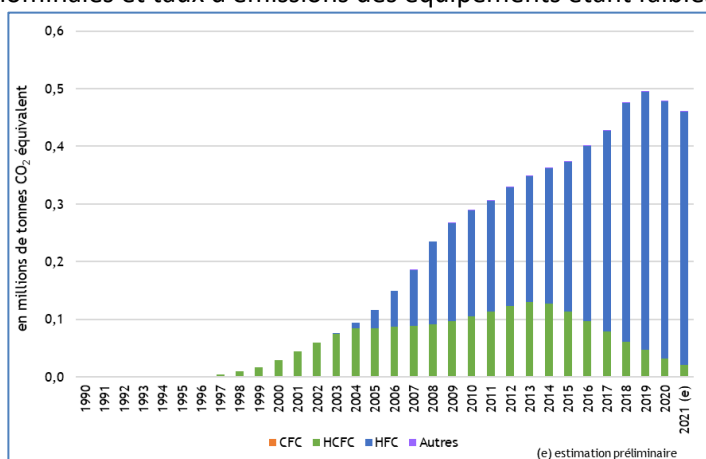


Figure 109 : Emissions CO₂ équivalentes des pompes à chaleur (millions de tonnes)

Tableau 82 : Emissions CO₂eq. 2020

Fluide	2020 (Mt CO ₂ e)
R-22	0,032
Total HCFC	0,032
R-32	0,002
R-134a	0,002
R-404A	0,005
R-407C	0,091
R-410A	0,346
Total HFC	0,445
R-290	0,000
R-744	0,000
Total Autres	0,000
Total général	0,477

XI. Climatisation mobile / Clim auto

1. Introduction

Le secteur de la climatisation embarquée se divise en quatre sous-secteurs, déterminés par les technologies utilisées et les modes de transport :

- La climatisation automobile : elle comprend les circuits de climatisation des véhicules particuliers et utilitaires légers (VUL), jusqu'à 5 t ;
- Les véhicules industriels : ils regroupent les camions de plus de 5 t. Ce sous-secteur est proche de celui de la climatisation automobile, seule la cabine du conducteur est climatisée, par des systèmes de technologie identique.
- Les cars et bus : ils présentent des systèmes de climatisation différents, plus puissants, où tout le véhicule est rafraîchi.
- Le transport ferroviaire : il comprend les trains/TGV, les tramways, les RER et les métros. Les technologies sont spécifiques, avec des climatisations dans les cabines de conduites et des climatisations pour les segments voyageurs. Les sous-secteurs tramways, métros et RER constituent une part minoritaire du parc ferroviaire.

Modes de charge

Tous ces équipements sont chargés en usine.

Modes de maintenance

Dans le modèle de calcul, il est considéré que ces équipements subissent une opération de maintenance lorsque la charge réelle du système de climatisation passe en deçà d'un certain seuil à partir duquel la climatisation du véhicule fonctionne moins bien. Les différentes hypothèses retenues dans le modèle sont listées Tableau 83.

Tableau 83 - hypothèses concernant les conditions de maintenance des systèmes de climatisation automobile

Sous-secteur	Rythme de maintenance	Seuil	Décharge complète lors de la maintenance ?
Climatisation automobile	si la charge passe en dessous du seuil	60 %	Oui
Véhicules industriels	si la charge passe en dessous du seuil	60 %	Oui
Car et bus	si la charge passe en dessous du seuil	60 %	Oui
Transport ferroviaire	si la charge passe en dessous du seuil	50 %	Non

Durée de vie moyenne

Les durées de vie moyenne des équipements de climatisation mobile sont présentées au Tableau 84. Elles sont cohérentes avec les hypothèses des précédentes études d'inventaires [Ref 5].

Tableau 84 - Durées de vie moyennes par sous-secteur de la climatisation automobile

Sous-secteur	Durée de vie (ans)
Climatisation automobile	12
Véhicules industriels	12
Car et bus	15
Transport ferroviaire	15

Une courbe de durée de vie est associée aux durées de vie moyenne afin de prendre en compte une variation réaliste de la durée de vie pour les véhicules d'un même millésime.

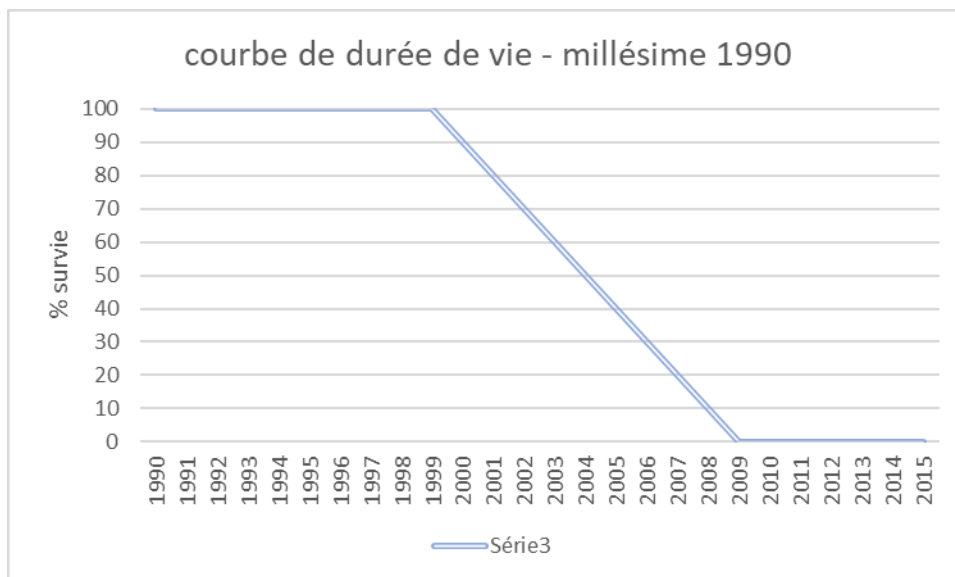


Figure 110 : Courbe de fin de vie climatisation automobile

2. Données et hypothèses

2.1 Données d'activités

2.1.1 Marchés et productions

2.1.1.1 Données

MARCHES

Deux paramètres sont nécessaires pour reconstituer le parc de climatisation embarquée :

- Les ventes annuelles (ou nombre d'immatriculations neuves) de véhicules ;
- Le taux de climatisation du marché des nouveaux équipements.

Climatisation automobile

Le marché de véhicules en France est communiqué chaque année par le Comité des Constructeurs Français d'Automobiles (CCFA) [Ref 33] pour toute la période à partir de 1990.

La courbe de pénétration de la climatisation sur le marché automobile français a été reconstituée à partir des données du modèle COPERT, logiciel européen de calcul des émissions de véhicules et d'informations annuelles provenant des principaux constructeurs automobiles en France [Ref 34] et [Ref 35].

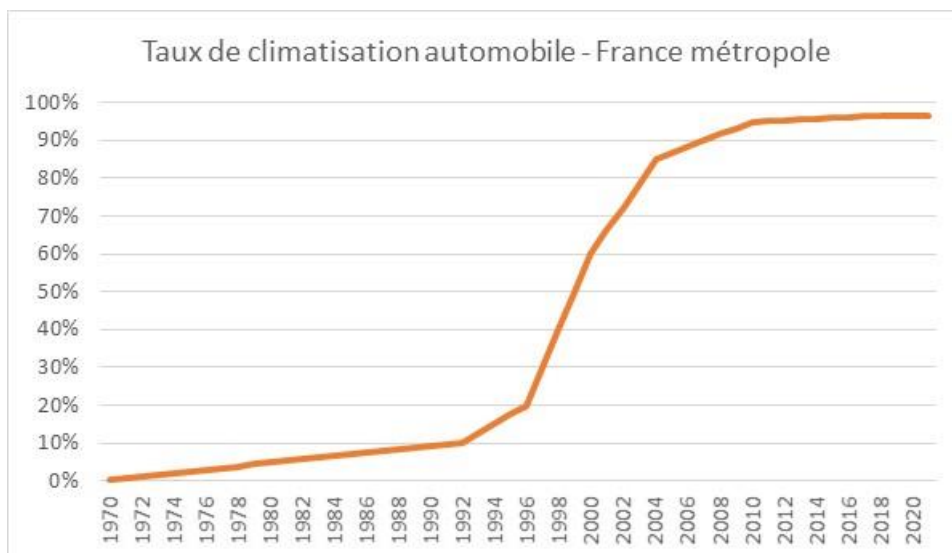


Figure 111 : Evolution du taux de climatisation automobile en France métropole (en %)

Véhicules industriels

Le marché de véhicules industriels supérieurs à 5t en France est connu par les données du CCFA [Ref 33] pour toute la période à partir de 1990.

Le taux de climatisation est supposé être identique à celui de la climatisation automobile (Figure 111) à la différence qu'il continue à progresser à partir de 2010 pour atteindre 99% en 2018 selon un fabricant [Ref 36].

Car et bus

Le marché de cars et bus en France est connu à l'aide des données du CCFA [Ref 33] pour toute la période à partir de 1990.

La courbe de pénétration de la climatisation a été reconstituée à partir d'informations issues des rapports inventaires de fluides frigorigènes [Ref 5] et de données fabricants [Ref 37]. La courbe ainsi générée conduit à un niveau de 80 % de véhicules climatisés mis sur le marché en 2020.

Transport ferroviaire

Les marchés des équipements de climatisation utilisés dans le transport ferroviaire ont été reconstitués à partir de données :

- Sur les parcs de moteurs et de remorques (ou rames) de trains et TGV publiées par le ministère chargé de l'écologie [Ref 38].
- Sur les données précisant les équipements types par mode de transport :
 - pour les tramways, il est considéré une climatisation par cabine et une autre climatisation pour 2 remorques (rapport inventaire des fluides frigorigènes [Ref 5]) ;
 - pour les trains/TGV, un ratio du nombre de climatisation par cabine et remorque pour chaque type de trains a été établi à partir des données SNCF (description du parc d'équipements 2013);
 - pour les métros, sur la base des informations transmises par l'exploitant des transport parisiens [Ref 39] il est considéré un pourcentage de rames dotées d'une climatisation appliqué à l'ensemble des métros nationaux et que chaque cabine conducteur est équipée d'une climatisation.

PRODUCTIONS

Le CCFA fournit les statistiques de production de véhicules en France pour les véhicules particuliers, utilitaires, industriels, cars et bus. Pour le sous-secteur « transport ferroviaire », la production des équipements de climatisation pour les trains, métros, RER et tramways est considérée égale aux marchés annuels.

2.1.2 Charge nominale

Le secteur de la climatisation automobile est marqué par une forte évolution de la charge nominale des équipements. Les données historiques ont été reconstituées à partir de publications et les données récentes mises à jour par des enquêtes de terrain et calculs en fonction des meilleures ventes de véhicules. Pour l'année 2020, les niveaux moyens de charge par application sont donnés au Tableau 85.

Tableau 85 - Charges nominales 2020 - Climatisation mobile

2020	Charge nominale (kg)
Climatisation automobile	0,46
Véhicules industriels	0,92
Cars et bus	10
Trains	14,5

Climatisation automobile

La charge moyenne des véhicules automobiles (Véhicules particuliers (VP) et Véhicules Utilitaires légers (VUL)) est calculée chaque année à partir des données caractéristiques fournies par les équipementiers ([Ref 40] et [Ref 41]) et des trente meilleures ventes de véhicules [Ref 33].

La charge moyenne calculée diminue au cours du temps. Le niveau s'élevait à presque 900 g de réfrigérant par véhicule dans les années 1990 alors qu'il se situe aujourd'hui en-dessous de 500 g. La charge estimée ces dernières années est donc inférieure à l'intervalle indiqué dans les Lignes directrices du GIEC 2006 [Ref 10] mais ces données sont issues de calculs fins et spécifiques au pays et tiennent compte des progrès réalisés par les équipementiers et la profession automobile.

Véhicules industriels

Les charges moyennes sont estimées sur la base d'informations transmises par deux producteurs français [Renault Truck, Scania].

Les niveaux de charge varient ainsi au cours du temps avec une constante diminution de 1310 g de réfrigérant par véhicule en 1990 à 920 g en 2020. Ces valeurs sont comprises dans l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 (de 500 à 1500 g de réfrigérant par véhicule) [Ref 10].

Car et bus

La quantité de réfrigérant contenu dans les systèmes de climatisation des bus et cars dépend notamment de la longueur et du type de bus (si seule la cabine du chauffeur est climatisée ou bien le bus entièrement). La courbe d'évolution de la charge moyenne de ces équipements a été reconstituée à partir d'informations tirées du rapport RTOC [Ref 42] et de données fabricant [Ref 37].

Transport ferroviaire

Pour les trains, un ratio du nombre de climatisations par cabine et remorque pour chaque type de trains a été établi en 2013 à l'aide de l'état des lieux du principal opérateur ferroviaire en France [SNCF]. Ce ratio a ensuite été utilisé pour déduire le parc d'équipements pour les autres années. Les quantités de réfrigérant estimées sont les suivantes :

- Environ 3 kg par cabine de TGV climatisée ;
- Environ 2 kg par cabine climatisée pour les autres trains ;
- Environ 19 kg par remorque voyageur TGV climatisée ;
- Environ 23 kg par remorque voyageur pour les autres trains climatisés.

Pour les tramways, RER et métros, les informations utilisées proviennent de la RATP [Ref 39] et sont les suivantes :

- Entre 1 et 2 kg par cabine de métro climatisée ;
- Environ 2,5 kg par cabine de tramways climatisée ;
- Environ 5 kg par cabine de RER climatisée ;
- Environ 11,5 kg par remorque voyageur tramway climatisée ;
- Entre 13 et 17 kg par remorque voyageur métro climatisée.

2.1.3 Fluides frigorigènes utilisés

La directive 2006/40/CE du 17 mai 2006 concernant les émissions provenant des systèmes de climatisation des véhicules à moteur (Directive MAC, Mobile Air Conditioning) interdit pour les véhicules neufs l'utilisation de fluide frigorigène dont le PRG est supérieur à 150 à compter du 1er janvier 2017. Cette directive européenne concerne les véhicules particuliers et non les véhicules utilitaires légers. De même, la production des véhicules destinés à l'exportation hors Europe n'est pas concernée.

Climatisation automobile

Au cours du temps, trois principaux fluides frigorigènes se sont succédé dans les climatisations des véhicules : le R-12 (CFC), le R-134a (HFC) rapidement à partir de 1995 [Ref 43] et le R-1234yf (HFO), progressivement introduit sur les véhicules neufs mis sur le marché Européen depuis 2015-2016.

Selon des informations du producteur de HFC-134a, en 2017 la réglementation européenne a été respectée et la totalité des véhicules particuliers ont été mis sur le marché européen avec des systèmes de climatisations fonctionnant au R-1234yf. En revanche, la progression du R-1234yf en remplacement du R-134a n'a eu lieu que très tardivement. Peu de véhicules utilisant le R-1234yf ont été mis sur le marché européen avant 2014 et la part du R-1234yf n'a été significative qu'à partir de 2016. A partir de 2016, on évalue le nombre de VP et VUL mis sur le marché avec du R-1234yf à l'aide des données de production d'un fabricant automobile [Ref 44].

Véhicules industriels

Deux fluides frigorigènes ont été utilisés dans cette sous-application : le R-12 et le R-134a. Il est supposé que la transition entre ces deux fluides s'est faite comme pour la climatisation automobile en deux ans, entre 1992 et 1994. La transition avec le R-1234yf se fera plus lentement que pour les VP et VUL, selon les producteurs.

Car et bus

L'évolution historique des fluides frigorigènes utilisés dans cette application a été reconstituée à partir des données des rapports RTOC [voir rapport NIR 2020]. Comme pour les véhicules industriels, il est supposé que le R-134a est le seul fluide frigorigène utilisé pour les années récentes, la transition avec le R-1234yf n'étant pas encore amorcée.

Transport ferroviaire

Pour les trains et TGV, selon la SNCF, les équipements de climatisation utilisent le R-134a ou le R-407C, selon qu'ils équipent les TGV ou les TER et les postes de cabine ou wagon voyageur. Pour les RER, tramways et métros, le fluide utilisé en remplacement du R-22 est le R-134a [Ref 39].

2.1.4 Durée de vie

Les courbes de durée de vie (Figure 112, Figure 113) ont été établies pour les différents sous-secteurs en se basant, sur les durées de vie moyenne de 12 et 15 ans, selon les types de véhicules.

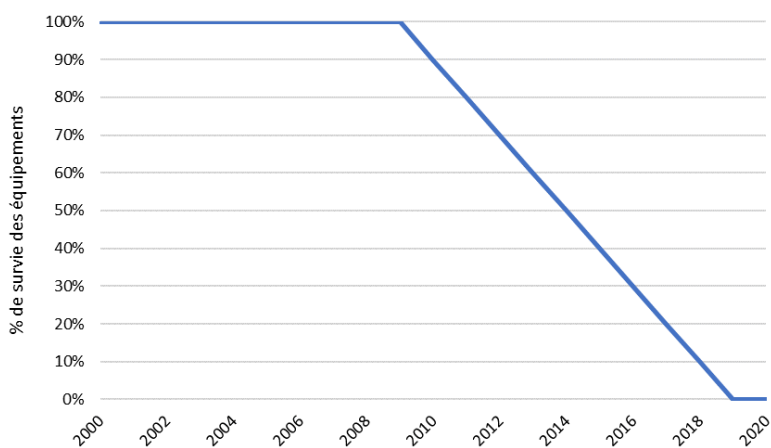


Figure 112 : Courbe de durée de vie des car, bus et du transport ferroviaire

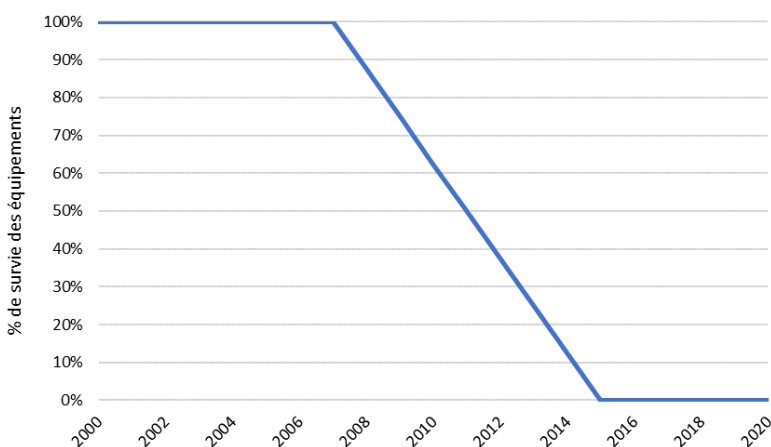


Figure 113 : Courbe de durée de vie de la climatisation et des véhicules industriels

2.2 Facteurs d'émissions

2.2.1 A la charge

Les taux d'émission à la charge des équipements de climatisation mobile sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 86 - facteurs d'émissions à la charge des systèmes de climatisations automobiles

2020	Climatisation automobile	Véhicules industriels	Cars et bus	Trains
Facteur d'émission à la charge	0,23 %	0,23 %	0,13 %	1,50 %

Climatisation automobile

Le facteur d'émission à la production des véhicules est estimé sur la base d'informations transmises par deux producteurs automobiles. Dans les années 1990, le facteur d'émission est estimé à environ 3 % puis diminue pour se situer entre 0,2 et 0,3 % ces dernières années. Le facteur d'émission national calculé pour les années récentes est donc compris dans l'intervalle des facteurs d'émission indiqués dans les Lignes directrices du GIEC 2006 (entre 0,2 et 0,5 %) [Ref 10].

Véhicules industriels

Les facteurs d'émission à la production des véhicules industriels sont très faibles, et sont considérés identiques à ceux de la climatisation automobile.

Car et bus

Le facteur d'émission à la charge des cars et bus est spécifique, déterminé par l'estimation par bilan matière d'un producteur pour les années 2018 et 2019 (respectivement 0,12 et 0,13 %). Ce ratio est inférieur à la gamme des Lignes directrices du GIEC 2006 [Ref 10] mais a été estimé pour deux années successives et récentes et considéré comme niveau moyen depuis 2018. Pour les années antérieures à 2018, faute de données spécifiques aux cars et bus, les valeurs estimées pour la climatisation automobile sont utilisées.

Transport ferroviaire

Le facteur d'émission à la charge dans le transport ferroviaire est pris égal à celui utilisé dans le modèle des climatisations stationnaires chargées d'usine (entre 3 % pour les années anciennes et 1,5 % pour les années récentes).

2.2.2 Fugitif

Les taux d'émission fugitif par sous-secteur sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 87

2020	Climatisation automobile	Véhicules industriels	Cars et bus	Trains
Facteur d'émission fugitif	8 %	8 %	10 %	5 %

La courbe en S d'évolution des facteurs d'émission pendant le fonctionnement des véhicules est établie à partir des valeurs suivantes tirées des Lignes directrices du GIEC 2006 [Ref 10] :

Tableau 88 - Données GIEC sur les taux d'émission fugitifs en climatisation automobile

	Intervalle		
	Haut	Bas	Moy
1ère génération	20%	10%	15,0%
2ème génération	10,6%	5,3%	8,0%

L'hypothèse retenue dans les calculs correspond à la moyenne des intervalles de la deuxième génération à partir de la fin des années 2000 et à la moyenne de la première génération jusqu'en 1996. Il faut attendre une dizaine d'années pour que le parc se renouvelle et se rapproche de 100% de véhicules équipés de climatisation de seconde génération et donc d'un facteur d'émission moyen de 8%.

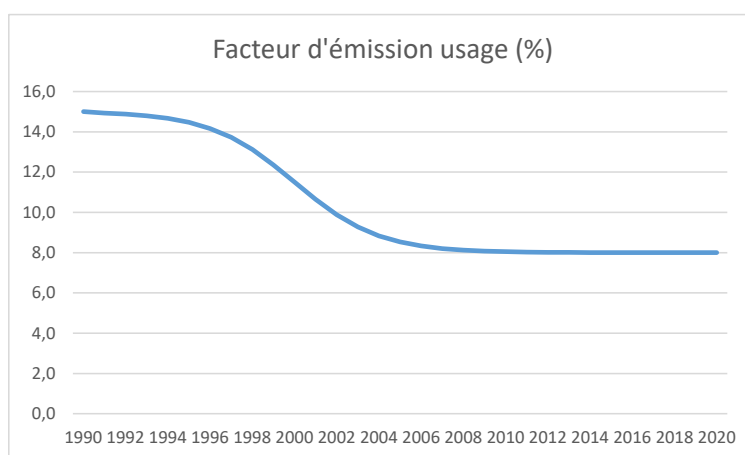


Figure 114 : Facteur d'émission fugitif des véhicules (en %) en moyenne sur la flotte de véhicules

Véhicules industriels

Des facteurs d'émission identiques à ceux utilisés pour la climatisation automobile sont pris en compte pour les véhicules industriels.

Car et bus

Les hypothèses retenues dans cette application proviennent du rapport RTOC 2010 [Ref 45] : les taux de pertes annuelles pour les cars et bus sont d'environ 10 % de la charge nominale et, pour les engins construits avant 2000, ce facteur d'émission est deux fois plus élevé. Il a été considéré une régression linéaire entre 2000 et 2010.

Transport ferroviaire

La courbe d'évolution des facteurs d'émission fugitifs pour le transport ferroviaire a été construite à l'aide d'une courbe en S allant d'un maximum de 15 % en 1995 (rapport RTOC [1109]) à un taux de 5 % dans les années 2010 [Ref 5] et maintenu constant, faute d'information complémentaire.

2.2.3 A la maintenance

L'évolution du taux d'émission à la maintenance pour le secteur de la climatisation mobile est donnée sur les figures ci-dessous. Elle prend en compte l'amélioration des pratiques. Les niveaux 2020 restent à confirmer.

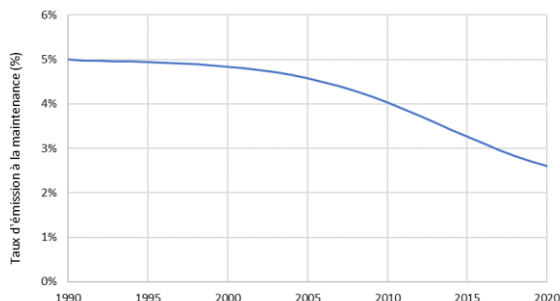


Figure 115 : Taux d'émission à la maintenance - Bus, cars et véhicules industriels

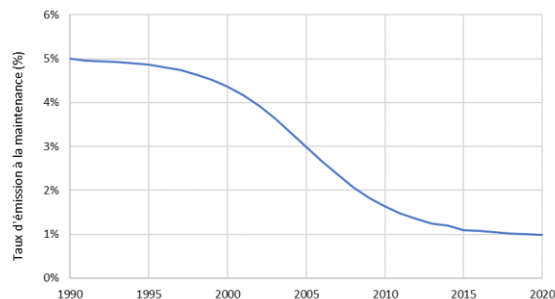


Figure 116 : Taux d'émission à la maintenance - Climatisation automobile et trains

2.2.4 En fin de vie

Les taux d'émission en fin de vie des équipements sont présentés dans le tableau ci-dessous, par sous-secteur.

Tableau 89 - taux d'émission en fin de vie des véhicules automobiles en 2020

2020	Climatisation automobile	Véhicules industriels	Cars et bus	Trains
Facteur d'émission de fin de vie	46 %	92 %	92 %	12 %

Climatisation automobile

Les émissions en fin de vie dépendent directement des quantités de gaz fluorés qui sont récupérées dans les véhicules hors d'usage (VHU) avant leur destruction. La directive 2000/53/CE du Parlement européen et du Conseil du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage (dite directive VHU) fixe des objectifs en termes de :

- Promotion des politiques de prévention des déchets lors des phases de conception et de construction des véhicules ;
- Création d'un système de collecte des VHU ;
- Conditions de traitement des VHU ;
- Réutilisation et valorisation des VHU ;
- Obligations de communication des différents acteurs.

Parmi les matières à valoriser, on recense notamment les fluides frigorigènes utilisés dans les climatisations. Dès 2005, l'ADEME a mis en place le suivi de la filière des véhicules hors d'usage en créant l'observatoire des VHU dans le cadre de la mise en œuvre de l'arrêté du 19 janvier 2005 portant sur la communication d'informations relatives à la mise sur le marché des automobiles en France, aux opérations de dépollution, de traitement et de broyage des véhicules hors d'usage. L'objectif étant de suivre les performances de la filière globale des VHU. L'ADEME rapporte ainsi chaque année dans son rapport les quantités de fluides frigorigènes récupérées par les filières de traitement des VHU. Cependant, ces données ne sont pas exploitables pour l'inventaire car les

quantités de fluides récupérées sont estimées, et non mesurées, sur la base d'une quantité moyenne de fluide (0,54 kg) multipliée par le nombre de VHU. Ces quantités sont donc largement surestimées car d'une part tous les VHU ne sont pas climatisés, d'autre part, ceux qui le sont ont perdu une part de fluide pendant leur fonctionnement, et enfin la quantité moyenne de fluide contenue dans les véhicules dépend de la période de mise sur le marché.

Cependant, à la suite des revues internationales, il a été constaté que le taux d'émissions de fin de vie estimé pour la France était bien supérieur aux niveaux des autres pays européens alors que la filière VHU n'y est pas davantage mise en place. Des discussions lors des revues avaient également mis en évidence que la part exportée des véhicules en fin de vie n'était pas prise en compte et semblait significative.

Par conséquent, une correction a été apportée dans l'inventaire 2019 et un taux de récupération a été recalculé à partir de 2012 tenant compte :

- de la quantité de VHU traités par les casses annuellement,
- du gisement potentiel estimé à partir des données sur les marchés et la durée de vie moyenne des véhicules,
- et d'un taux de récupération des HFC au sein des VHU traités, sa tendance d'évolution étant évaluée à partir d'hypothèses sur l'amélioration des comportements, bonnes pratiques et hausse récente des prix des HFC.

$$\text{Efficacité_Récupération (\%)}_N = \text{Part VHU pris en charge}_N * \text{Part des fluides traités dans les VHU}_N$$

Avec :

$$\text{Part VHU pris en charge}_N (\%) = \frac{\text{Nombre VHU traités}_N}{\text{Nombre véhicules mis sur le marché}_{N-12} - \text{Nombre véhicules exportés}_N}$$

Pour les années antérieures, le taux de récupération n'a pas été modifié [Ref 5].

Le nombre de VHU traités chaque année est communiqué dans les rapports VHU de l'ADEME [Ref 46] de même que les exportations. Le nombre de véhicules mis sur le marché à l'année N-12 (durée de vie moyenne des véhicules) est connu précisément dans les rapports du CCFA [Ref 33]. La part des fluides traités dans les VHU pris en charge par les casses est estimée sur la base d'hypothèses et augmente chaque année. Celle-ci a été estimée à 25% en 2013 et 50% en 2017. Des enquêtes terrains auprès des casses pourraient valider l'ordre de grandeur de ces hypothèses. Les niveaux 2019-2020 ont été estimés tendanciuellement, pour atteindre 56 % d'efficacité de récupération, tenant compte des exportations, en 2020.

Véhicules industriels et cars & bus

Les taux de récupération des fluides frigorigènes en fin de vie de ces véhicules sont supposés rester bas, faute d'information complémentaire. Les niveaux des anciens rapports d'inventaires [Ref 5] sont maintenus.

Transport ferroviaire

D'après le service de maintenance de la SNCF, la récupération en fin de vie des équipements de climatisation des trains est équivalente à celle réalisée lors des opérations de maintenance. La progression de l'efficacité de récupération est estimée à partir d'une courbe en S démarrant en 1990 pour atteindre 90 % dans les années 2020.

3. Résultats

3.1 Banque

La banque de la climatisation embarquée est stable depuis 2012, la croissance du parc étant compensée par la réduction des charges moyennes des véhicules. Elle est estimée à 14 543 tonnes en 2020, constituée exclusivement de HFC, la banque de CFC étant éliminée depuis 2006. La banque de R-1234yf, remplaçant du R-134a, se constitue progressivement depuis 2012 et représente environ 35 % de la banque de climatisation embarquée en 2020 (Tableau 90).

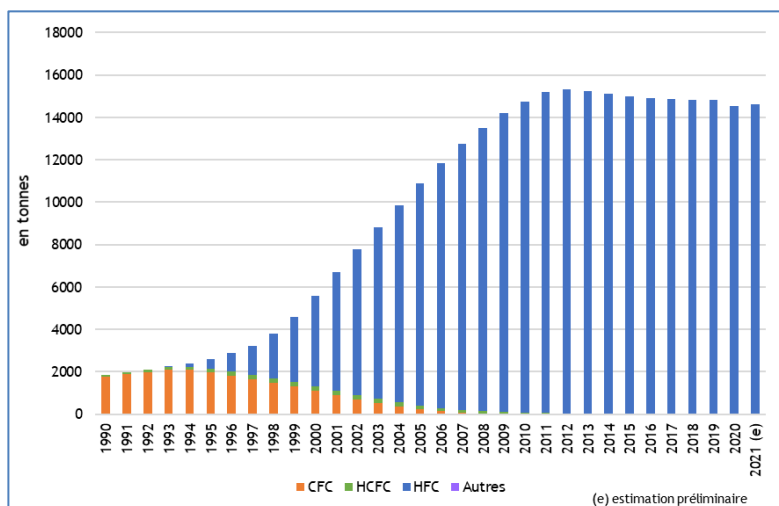


Figure 117 : Banque de fluides frigorigènes en France métropole dans le secteur de la climatisation automobile

Tableau 90 : Banque 2020

Fluide	2020 (en t)
R-134a	9 254,3
R-407C	196,8
R-1234yf	5 091,6
Total HFC	14 542,7
Total général	14 542,7

3.2 Demande

3.2.1 Besoin pour les équipements neufs

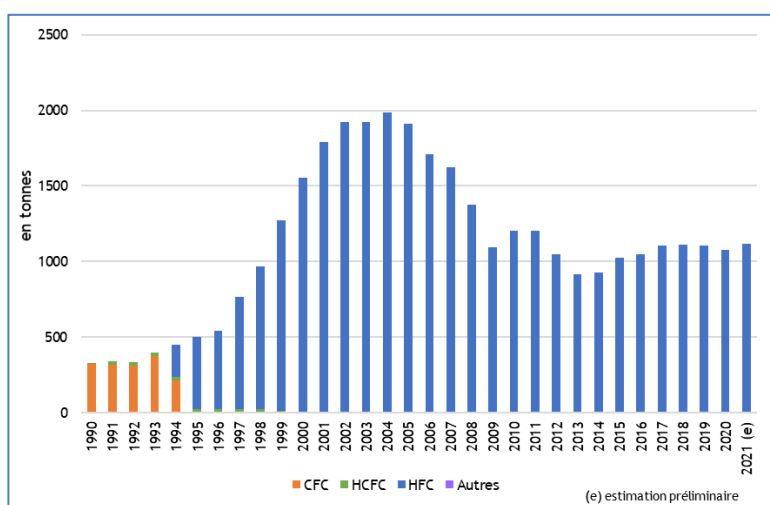


Figure 118 : Quantités nécessaires à la production dans le secteur de la climatisation mobile

Tableau 91 : production 2020

Fluide	2020 (en t)
R-134a	339,5
R-407C	11,4
R-1234yf	724,5
Total HFC	1 075,4
Total général	1 075,4

La demande relative à la production dans le secteur de la climatisation automobile est dans sa totalité constituée de HFC, principalement de R-1234yf (67 % du total des fluides). En 2020, on estime le besoin pour la production à 1 075 tonnes.

3.2.2 Besoin pour la maintenance

Le besoin évalué pour la maintenance dans le secteur de la climatisation automobile est estimé à 510 tonnes en 2020. Comme pour la climatisation à air, le besoin estimé pour la maintenance est irrégulier car évalué en fonction de l’atteinte d’un seuil de charge. Etant donné que le R-1234yf n’est apparu sur le marché neuf des équipements qu’en 2016 et que les taux d’émission des véhicules sont considérés bas, de 8 %, la charge réelle des premiers millésimes mis sur le marché n’atteint pas encore le niveau seuil de charge de 60 % pris pour hypothèse.

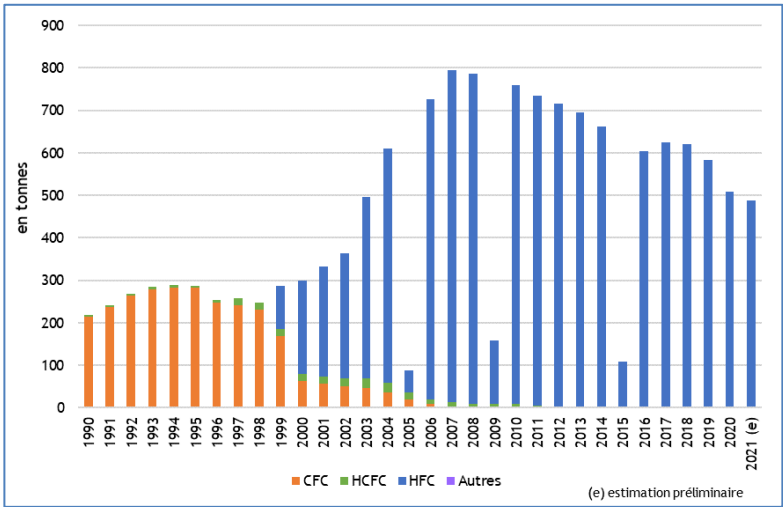


Figure 119 : Quantités requises pour la maintenance dans le secteur de la climatisation automobile

Tableau 92 : Besoin pour la maintenance 2020

Fluide	2020 (en t)
R-134a	505,0
Total HFC	509,0
Total général	509,0

3.2.3 Besoin pour le retrofit

On ne considère pas de retrofit sur les systèmes de climatisation mobile.

3.3 Emissions

3.3.1 Emissions totales

Les émissions du secteur de la climatisation mobile sont en décroissance depuis 2014, le parc étant renouvelé avec des véhicules aux taux d’émissions fugitifs de plus en plus bas. Elles sont estimées à 1 694 tonnes en 2020. Il est important de souligner qu’un quart des émissions du secteur est désormais du R-1234yf.

Les émissions sont constituées en grande partie des émissions fugitives de la climatisation automobile (72 %) et dans une moindre mesure des émissions en fin de vie (27 %) depuis que la part des véhicules exportée est pris en compte dans le calcul.

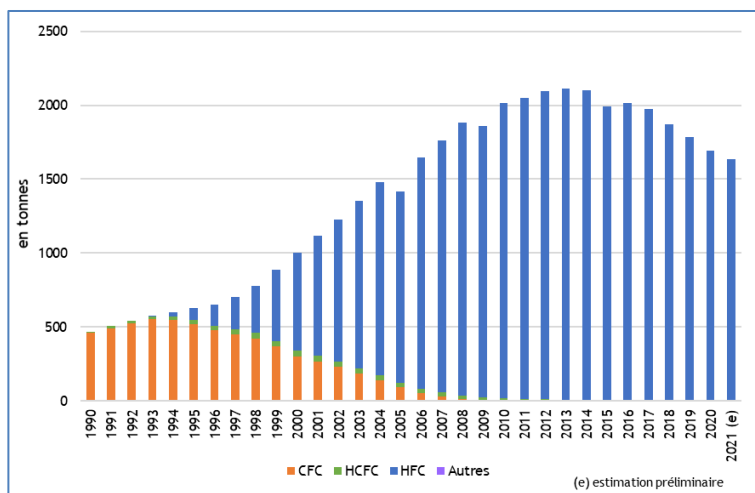


Figure 120 : Emissions totales du secteur de la climatisation mobile

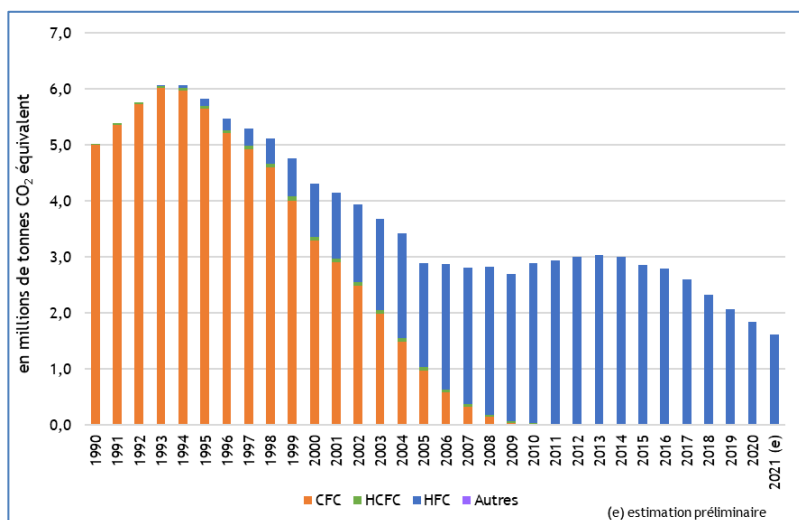
Tableau 93 : Emissions totales 2020

Fluide	2020 (en t)
R-134a	1 269,4
R-407C	12,4
R-1234yf	412,3
Total HFC	1 694,1
Total général	1 694,1

3.3.2 Emissions CO₂ équivalentes

La pénétration du R-1234yf sur le parc automobile commence à impacter significativement les émissions CO₂ équivalentes du secteur, en baisse de 10% par an sur les 3 dernières années.

Les émissions de R-1234yf représentant en 2020 près d'un quart des émissions du secteur, elles permettent de réduire les émissions CO₂ équivalentes de près de 600 000 tonnes, soit d'environ 25 % en 2020.

Figure 121 : Emissions CO₂ équivalentes de la climatisation automobile (millions de tonnes)Tableau 94 : Emissions CO₂eq. 2020

Fluide	2020 (Mt CO ₂ e)
R-134a	1,8
R-407C	0,02
R-1234yf	0,00
Total HFC	1,8
Total général	1,8

Les émissions du secteur de la climatisation mobile sont estimées à 1,8 millions de tonnes de CO₂ en 2020 alors qu'elles culminaient à 6,1 millions de tonnes de CO₂ en 1994. Elles représentent aujourd'hui 19 % des émissions de fluides frigorigènes de la France métropole en équivalent CO₂.

XII. Annexes

1. PRG du 4ème rapport du GIEC (AR4)

Tableau 95 - PRG des fluides frigorigènes pris en compte dans le calcul (AR4)

Fluide frigorigène	GWP4
R-11	4 750
R-12	10 900
R-123	77
R-1233zd	5
R-1234yf	4
R-1234ze	7
R-125	3 500
R-134a	1 430
R-143a	4 470
R-152a	124
R-22	1 810
R-290	3
R-32	675
R-401A	975
R-404A	3 922
R-407A	2 107
R-407C	1 774
R-407F	1 825
R-408A	3 152
R-410A	2 088
R-417A	2 346
R-422A	3 143
R-422D	2 729
R-427A	2 138
R-448A	1 387
R-449A	2 178
R-450A	605
R-452A	2 140
R-454C	148
R-455A	148
R-456A	687
R-502	4 657
R-507	3 985
R-513A	631
R-513B	596
R-600a	3
R-717	0
R-744	1

2. Emissions déclarées pour le secteur 2F1

Cette annexe présente les résultats des émissions de HFC pour les secteurs du froid et de la climatisation (2F1) à la Commission Européenne et à la CNUCCC. Ces déclarations officielles sont décomposées en fluides primaires et réalisées au « périmètre Kyoto » soit en France métropole et Territoires d'outre-mer soumis à la réglementation européenne (anciennement « DOM »).

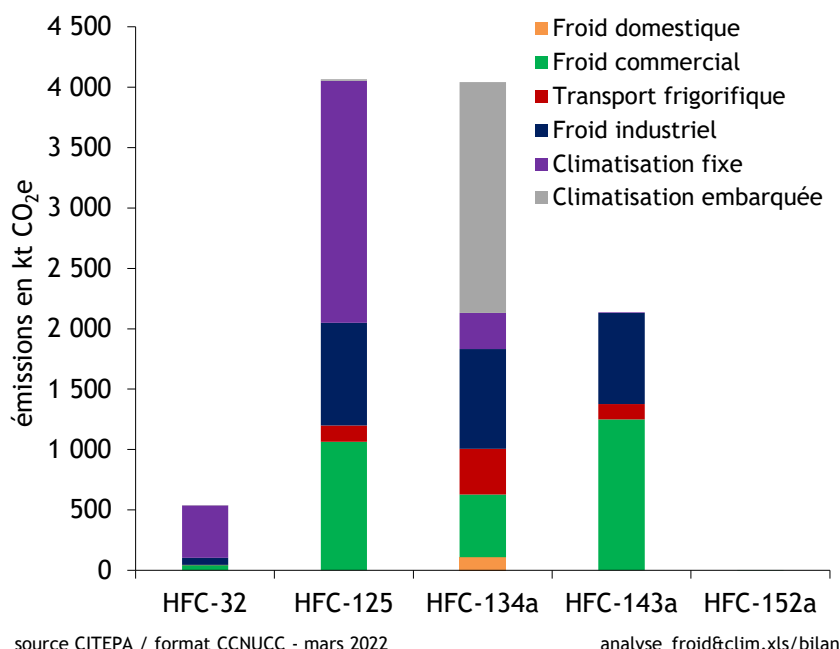
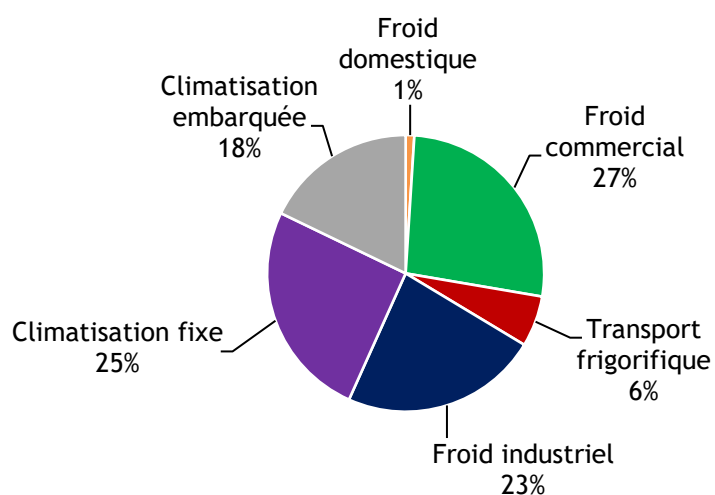


Figure 122 - Distribution des émissions de HFC en CO₂e du CRF 2F1 en 2020 (périmètre Kyoto)



source CITEPA / format CCNUCC - mars 2022

analyse_froid&clim.xls/bilan

Figure 123 - Contribution des secteurs aux émissions de HFC en CO₂e de la catégorie CRF 2F1 en 2020 (périmètre Kyoto)

3. Acronymes et abréviations

AR4	Assessment Report 4 (valeurs données par le 4 ^{ème} rapport du GIEC)
CCNUCC	Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique
CE	Commission Européenne
CFC	ChloroFluoroCarbures
HC	HydroCarbures
HCFC	HydroChloroFluoroCarbures
HFC	HydroFluoroCarbures
HFO	HydroFluoroOléfines (HFC à bas PRG)
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (pour IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change)
GF	Gaz fluorés
PRG	Potentiel de Réchauffement Global (pour GWP en anglais, Global Warming Potential)
UE	Union Européenne
UTCATF	Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Forêt

4. Table des figures

Figure 1 - Les gaz à effet de serre.....	8
Figure 2 - Tables « CRF » (Common Reporting Format) ou mode de déclaration des émissions de HFC auprès de la CNUCC.....	10
Figure 3 - Extrait des lignes directrices du GIEC 2006	13
Figure 4 - Principes de la méthode de calcul des émissions de fluides frigorigènes	14
Figure 5 - Calcul des émissions à la charge (GIEC, 2006).....	14
Figure 6 - Calcul des émissions à la charge.....	15
Figure 7 - Calcul des émissions au cours de la durée de vie (GIEC, 2006)	16
Figure 8 - Calcul des émissions de fin de vie (GIEC, 2006)	17
Figure 9 - Calcul des émissions conteneurs (GIEC, 2006).....	17
Figure 10 - Ordres de grandeur de la charge moyenne et des facteurs d'émissions par grand secteur (extrait lignes directrices 2019 du GIEC).	19
Figure 11 - Répartition des émissions de GES en CO ₂ équivalent en France, périmètre Kyoto (France métropole & territoires d'outre-mer inclus dans l'UE). <i>Source : Citepa, données Secten 2022.</i>	22
Figure 12 - Evolution des émissions de gaz fluorés (HFC, PFC, SF ₆ , NF ₃) en France de 1990 à 2020, Périmètre Kyoto (France métropole et territoires d'Outre-mer inclus dans l'UE). <i>Source : Citepa, rapport CNUCC 2022.</i>	22
Figure 13 - Evolution en tonnes des émissions de fluides frigorigènes en France métropole (1990-2021)	23
Figure 14 - Répartition sectorielle des émissions de HFC (exprimées en tonnes) en France métropole en 2020	23
Figure 15 - Evolution, en tonnes de CO ₂ équivalent, des émissions de fluides frigorigènes en France métropole	25
Figure 16 - Répartition sectorielle des émissions CO ₂ équivalentes de fluides frigorigènes en France métropole en 2020.....	25
Figure 17 - Evolution des parts sectorielles des émissions CO ₂ équivalentes de fluides frigorigènes	25
Figure 18 - Evolution de la banque totale de fluides frigorigènes en France métropole	26
Figure 19 - Répartition sectorielle de la banque de R-134a en 2020 en France métropole	26
Figure 20 - Répartition sectorielle de la banque de HFC en France métropole en 2020.	27
Figure 21 - Répartition sectorielle de la banque équivalente CO ₂ de HFC en France métropole en 2020	27
Figure 22 - Demande totale en fluides frigorigènes pour la France métropole	28
Figure 23 - Besoin en fluides frigorigènes pour la production d'équipements pré-chargés en France métropole	29
Figure 24 - Besoin en fluides frigorigènes pour la charge d'équipements sur site en France métropole	29
Figure 25 - Evolution du besoin estimé pour la maintenance des installations sur le parc d'équipements en France.....	30
Figure 26 - Evolution du besoin estimé pour le retrofit des installations utilisant des HFC à fort PRG en France.....	30
Figure 27 - Comparaison de la demande totale calculée aux marchés déclarés au SNEFCCA.....	31
Figure 28 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-410A.....	31
Figure 29 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-407C.....	31
Figure 30 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-134a.....	32
Figure 31 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-404A.....	32
Figure 32 - Comparaison des données sur la récupération en France métropole	33
Figure 33 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés sur le marché des réfrigérateurs domestiques	38
Figure 34 : Courbe de durée de vie pour les réfrigérateurs, congélateurs et caves à vin	39
Figure 35 : Courbe de durée de vie pour les sèche-linges avec pompe à chaleur	39

Figure 36 : Banque de fluide dans le secteur du froid domestique	41
Figure 37 : Demande en fluides frigorigènes pour la production dans le secteur du froid domestique	42
Figure 38 : Emissions totales du froid domestique	42
Figure 39 : Emissions CO ₂ équivalentes du froid domestique (millions de tonnes)	43
Figure 40 - courbe de durée de vie des équipements du froid commercial	46
Figure 41 : Ratios de charge surfacique en supermarchés et hypermarchés	48
Figure 42 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les nouvelles installations des hypermarchés	49
Figure 43 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés en supermarchés	50
Figure 44 : Courbe de durée de vie pour le froid commercial	51
Figure 45 : Facteurs d'émission à l'usage dans le secteur du froid commercial (en %)	52
Figure 46 : Taux d'émission à la maintenance - Froid commercial.....	53
Figure 47 : Efficacité de récupération en fin de vie des équipements dans le secteur du froid commercial	54
Figure 48 : Banque de fluide dans le secteur du froid commercial	55
Figure 49 : Quantités requises pour la production d'équipements en France dans le secteur du froid commercial	56
Figure 50 : Besoin en fluides frigorigènes pour la charge sur site des équipements neufs pour le secteur du froid commercial	56
Figure 51 : Besoin en fluides frigorigènes pour la maintenance du parc d'installations dans le secteur du froid commercial	57
Figure 52 : Besoin en fluides frigorigènes pour le retrofit d'installations dans le secteur du froid commercial	58
Figure 53 : Emissions totales du froid commercial	58
Figure 54 : Emissions CO ₂ équivalentes du froid commercial (millions de tonnes)	59
Figure 55 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les conteneurs frigorifiques (transport maritime).....	65
Figure 56 : Courbe de durée de vie pour les reefers.....	65
Figure 57 : Courbe de durée de vie pour les conteneurs frigorifiques.....	66
Figure 58 : Courbe de durée de vie pour le transport frigorifique routier.....	66
Figure 59 : Taux d'émissions à la maintenance - transports frigorifiques.....	67
Figure 60 : Banque de fluide dans le secteur du transport frigorifique	69
Figure 61 : Quantités nécessaires à la production dans le secteur du transport frigorifique	70
Figure 62 : Quantités nécessaires à la charge des équipements sur site pour le secteur du transport frigorifique	70
Figure 63 : Besoin pour la maintenance dans le secteur du transport frigorifique	71
Figure 64 : Emissions totales du transport frigorifique	71
Figure 65 : Emissions CO ₂ équivalentes du transport frigorifique (millions de tonnes)	72
Figure 66 : Ratio de charge équivalent - Exemple de l'industrie laitière	77
Figure 67 : Courbe de durée de vie pour le froid industriel	78
Figure 68 : Taux d'émission à la maintenance - Froid industriel	79
Figure 69 : Banque de fluide dans le secteur du froid industriel.....	81
Figure 70 : Besoin en fluides frigorigènes pour les installations neuves du froid industriel	82
Figure 71 : Quantités requises pour la maintenance dans le secteur du froid industriel	82
Figure 72 : Besoin pour le retrofit dans le secteur du froid industriel	83
Figure 73 - Emissions totales du froid industriel.....	83
Figure 74 : Emissions CO ₂ équivalentes du froid industriel (millions de tonnes).....	84
Figure 75 : Courbe de durée de vie des chillers de petites et moyennes puissances.....	89
Figure 76 : Facteur d'émission à la charge des chillers (en %)	89
Figure 77 : Facteur d'émission pendant la durée de vie - chillers (en %).....	90

Figure 78 : Taux d'émission à la maintenance - Compresseurs centrifuges	90
Figure 79 : Taux d'émission à la maintenance - Chillers de petites, moyennes et grandes tailles	91
Figure 80 : Efficacité de récupération en fin de vie des chillers (en %).....	91
Figure 81 : Banque de fluide dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)	92
Figure 82 : Quantités nécessaires à la production des groupes refroidisseurs à eau (GRE) en France métropole.	93
Figure 83 - Besoin pour la maintenance dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)	93
Figure 84 - Besoin pour le retrofit dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)	94
Figure 85 : Emissions totales du secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE).....	94
Figure 86 : Emissions CO ₂ équivalentes des groupes refroidisseurs à eau (GRE) (millions de tonnes)	95
Figure 87 - Evolution de la charge des systèmes splits centralisés	100
Figure 88 : Courbe de durée de vie des mono splits, multi splits, armoires verticales, DRV, centrale AC, rooftop et armoires spéciales	103
Figure 89 : Courbe de durée de vie des climatiseurs fenêtres et climatiseurs mobiles.....	103
Figure 90 : Facteur d'émission à la charge (en %) des équipements de climatisation à air	104
Figure 91 : Facteur d'émission pendant la durée de vie - climatisation fixe (en %).....	104
Figure 92 - Taux d'émissions à la maintenance des équipements de climatisation à air	105
Figure 93 : Efficacité de récupération en fin de vie (en %) des équipements de la climatisation à air	106
Figure 94 : Banque de fluide dans le secteur de la climatisation fixe.....	107
Figure 95 - Répartition sectorielle de la banque 2020 de la climatisation à air	107
Figure 96 : Quantités nécessaires à la charge des équipements de la climatisation fixe	108
Figure 97 : Quantités nécessaires à la production dans le secteur de la climatisation fixe	108
Figure 98 : Quantités nécessaires à la maintenance dans le secteur de la climatisation fixe	109
Figure 99 : Quantités requises pour le retrofit dans le secteur de la climatisation fixe.....	109
Figure 100 : Emissions totales du secteur de la climatisation fixe.....	110
Figure 101 : Emissions CO ₂ équivalentes de la climatisation fixe	111
Figure 102 - répartition sectorielle des émissions de la climatisation à air en 2020	111
Figure 103 - Courbe de durée de vie des pompes à chaleurs réversibles	115
Figure 104 : Facteur d'émission fugitif - pompes à chaleurs réversibles (en %)	116
Figure 105 : Banque de fluide dans le secteur des pompes à chaleur	117
Figure 106 : Quantités requises à la production dans le secteur des pompes à chaleur	118
Figure 107 : Quantités requises pour la maintenance dans le secteur des pompes à chaleur	118
Figure 108 : Emissions totales du secteur des pompes à chaleur	119
Figure 109 : Emissions CO ₂ équivalentes des pompes à chaleur (millions de tonnes)	119
Figure 110 : Courbe de fin de vie climatisation automobile	122
Figure 111 : Evolution du taux de climatisation automobile en France métropole (en %).....	123
Figure 112 : Courbe de durée vie des car, bus et du transport ferroviaire	126
Figure 113 : Courbe de durée de vie de la climatisation et des véhicules industriels	126
Figure 114 : Facteur d'émission fugitif des véhicules (en %) en moyenne sur la flotte de véhicules	128
Figure 115 : Taux d'émission à la maintenance - Bus, cars et véhicules industriels	129
Figure 116 : Taux d'émission à la maintenance - Climatisation automobile et trains	129
Figure 117 : Banque de fluides frigorigènes en France métropole dans le secteur de la climatisation automobile.....	131
Figure 118 : Quantités nécessaires à la production dans le secteur de la climatisation mobile	131
Figure 119 : Quantités requises pour la maintenance dans le secteur de la climatisation automobile	132
Figure 120 : Emissions totales du secteur de la climatisation mobile	133
Figure 121 : Emissions CO ₂ équivalentes de la climatisation automobile (millions de tonnes)	133
Figure 122 - Distribution des émissions de HFC en CO₂e du CRF 2F1 en 2020 (périmètre Kyoto)	136

Figure 123 - Contribution des secteurs aux émissions de HFC en CO₂e de la catégorie CRF 2F1 en 2020 (périmètre Kyoto)..... 136

5. Table des tableaux

Tableau 1 - Structure de la base de données des secteurs du froid et de la climatisation.....	12
Tableau 2 - Données d'activité nécessaires par application et par an pour le calcul des émissions de réfrigérants	18
Tableau 3 - Emissions 2020	23
Tableau 4 - Emissions CO ₂ eq. 2020	25
Tableau 5 - Banque 2020.....	26
Tableau 6 - Demande 2020	28
Tableau 7 - Production 2020.....	29
Tableau 8 - Charge 2020	29
Tableau 9 - Besoin maintenance	30
Tableau 10 - Besoin retrofit	30
Tableau 11 - Hypothèses de charges nominales des équipements de froid domestiques en 2020	37
Tableau 12 - Facteur d'émission à la charge des équipements de froid domestique	39
Tableau 13 - facteur d'émission fugitif des équipements de froid domestique	40
Tableau 14 - Facteur d'émission de fin de vie des équipements de froid domestique.....	40
Tableau 15 : Banque de fluide	41
Tableau 16 : Production 2020	42
Tableau 17 : Emissions totales 2020.....	42
Tableau 18 : Emissions CO ₂ eq. 2020.....	43
Tableau 19 - Catégories de magasin prises en compte dans les équipements des petits commerces	45
Tableau 20 - Modes de maintenance des équipements de froid commercial.....	46
Tableau 21 - Charges moyennes en super et hypermarchés	48
Tableau 22 - Charges moyennes des équipements par type de petits commerces	48
Tableau 23 - hypothèses de facteurs d'émission à la charge des équipements de froid commercial.	51
Tableau 24 : Banque 2020	55
Tableau 25 : Production 2020	56
Tableau 26 : Charges 2020.....	56
Tableau 27 : Quantités pour la maintenance 2020	57
Tableau 28 : Quantités pour le retrofit 2020.....	58
Tableau 29 : Emissions totales 2020.....	58
Tableau 30 : Emissions CO ₂ eq. 2020.....	59
Tableau 31 - prise en compte de la maintenance dans la méthode de calcul pour le transport frigorifique.....	61
Tableau 32 : Productions estimées des groupes frigorifiques pour le transport routier	63
Tableau 33 : Flotte mondiale de navires réfrigérés et de conteneurs frigorifiques	63
Tableau 34 - Evolution des niveaux de charge nominale des équipements frigorifiques du transport routier	63
Tableau 35 - charges nominales des équipements frigorifiques du transport maritime.....	63
Tableau 36 - Facteurs d'émissions à la charge pour le transport frigorifique	66
Tableau 37 - Facteurs d'émissions fugitives 2020 pour les applications du transport frigorifique	67
Tableau 38 - Facteurs d'émission en fin de vie des équipements du transport frigorifique.....	68
Tableau 39 : Banque 2020	69
Tableau 40 : production 2020	70
Tableau 41 : charges sur site 2020	70
Tableau 42 : Quantités pour la maintenance 2020	71
Tableau 43 : Emissions totales 2020.....	71
Tableau 44 : Emissions CO ₂ eq. 2020.....	72

Tableau 45 - Répartition des surfaces d'entrepôts frigorifiques en France - Insee 2012	76
Tableau 46 - Ratios frigorifiques caractéristiques par application.....	77
Tableau 47 - facteur d'émission à la charge des installations de froid industriel	78
Tableau 48 - Facteurs d'émissions fugitives par application du froid industriel pour 2020	78
Tableau 49 - Facteurs d'émissions 2020 en fin de vie des équipements du froid industriel.....	79
Tableau 50 : Banque 2020	81
Tableau 51 : Charges sur site 2020	82
Tableau 52 : Quantités pour la maintenance 2020	82
Tableau 53 - Besoin retrofit 2020.....	83
Tableau 54 : Emissions totales 2020.....	83
Tableau 55 : Emissions CO ₂ eq. 2020.....	84
Tableau 56 - rythme de maintenance des Chillers	86
Tableau 57 - durée de vie moyenne des chillers	86
Tableau 58 - fluides frigorigènes utilisés sur le marché des chillers en 2020	88
Tableau 59 : Banque de fluide	92
Tableau 60 : Production 2020	93
Tableau 61 : Quantités pour la maintenance 2020	93
Tableau 62 : Emissions totales 2020.....	94
Tableau 63 : Emissions CO ₂ eq. 2020.....	95
Tableau 64 - modes de charge des équipements de climatisation à air.....	97
Tableau 65 - Modes de maintenance des équipements de climatisation à air	98
Tableau 66 - Durées de vie moyenne des équipements de climatisation à air	98
Tableau 67 - hypothèses de charge nominale constante pour certains équipements de climatisation à air	100
Tableau 68 - charges nominales 2020 des équipements de climatisation à air	101
Tableau 69 - Fluides frigorigènes utilisés sur les marchés neufs des équipements de climatisation à air en 2020	102
Tableau 70 : Banque de fluide	107
Tableau 71 : Besoin pour la charge 2020	108
Tableau 72 : Besoin pour la production 2020	108
Tableau 73 : Quantités pour la maintenance 2020	109
Tableau 74 : Emissions totales 2020.....	110
Tableau 75 : Emissions CO ₂ eq. 2020.....	111
Tableau 76 - charges nominales des PAC en 2020	114
Tableau 77 - Fluides frigorigènes utilisés sur le marché neuf des PAC en 2020.....	115
Tableau 78 : Banque de fluide	117
Tableau 79 : Besoin production 2020.....	118
Tableau 80 : Quantités pour la maintenance 2020	118
Tableau 81 : Emissions totales 2020.....	119
Tableau 82 : Emissions CO ₂ eq. 2020.....	119
Tableau 83 - hypothèses concernant les conditions de maintenance des systèmes de climatisation automobile.....	121
Tableau 84 - Durées de vie moyennes par sous-secteur de la climatisation automobile	121
Tableau 85 - Charges nominales 2020 - Climatisation mobile	124
Tableau 86 - facteurs d'émissions à la charge des systèmes de climatisations automobiles.....	127
Tableau 87	127
Tableau 88 - Données GIEC sur les taux d'émission fugitifs en climatisation automobile	128
Tableau 89 - taux d'émission en fin de vie des véhicules automobiles en 2020	129
Tableau 90 : Banque 2020	131
Tableau 91 : production 2020	131
Tableau 92 : Besoin pour la maintenance 2020	132

Tableau 93 : Emissions totales 2020.....	133
Tableau 94 : Emissions CO ₂ eq. 2020.....	133
Tableau 95 - PRG des fluides frigorigènes pris en compte dans le calcul (AR4).....	135

6. Références bibliographiques

Ref 1 - Lignes directrices du GIEC 1996

Ref 2 - Thèse Sabine Saba, MINES-ParisTech, 2009 Global inventories and direct emissions estimation of greenhouse gases of the refrigeration systems

Ref 3 - RTOC 2018 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 4 - Gifam (Groupement des marques d'appareils pour la maison).
<https://www.gifam.fr/accueil/gem/refrigerateur/#chiffres-clis>

Ref 5 - Centre Efficacité énergétique des Systèmes de l'Ecole des Mines de Paris - Inventaire annuel des émissions des fluides frigorigènes en France jusqu'en 2016

Ref 6 - WHIRLPOOL - Communication interne

Ref 7 - Revue spécialisée Entreprendre - "Cave à vin : EuroCave leader mondial... et 100 % made in France" - 29/10/2014

Ref 8 - Eurocave - Communication interne

Ref 9 - Enquête terrain Citepa - fluide frigorigène équipements domestiques

Ref 10 - Lignes directrices du GIEC 2006 - Volume 3 - Chapitre 7 - Tableaux 7.9

Ref 11 - ADEME - Rapports annuels Equipement Electriques et Electroniques

Ref 12 - Nielsen - Retour sur 40 ans de distribution française

Ref 13 - INSEE - Les points de vente du commerce de détail 1982 à 1992

Ref 14 - INSEE - Base de données : évolution du commerce 1992 - 2004

Ref 15 - INSEE - Base de données : hyper super 2004 à 2009

Ref 16 - INSEE - Enquête d'établissement dans le commerce 1980

Ref 17 - ACOSS - Les dénombrements annuels selon la NAF 732

Ref 18 - LSA - Communication interne

Ref 19 - Perifem - Communication interne

Ref 20 - European Partnership for Energy and the Environment - Communication interne

Ref 21 - RTOC 1998 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 22 - Lignes directrices du GIEC 1996 - Volume 3 - Chapitre 2.17

Ref 23 - Mines ParisTech - La F-GasII et son impact sur les émissions de fluides frigorigènes en France à l'Horizon 2035 - S. Barrault, M. NEMER

Ref 24 - Fédération Française de Carrosserie (FFC) - Communication interne

Ref 25 - Container Handbook

Ref 26 - Petit Forestier - Communication interne

Ref 27 - RTOC 2002 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 28 - Annuaire du Syndicat National des patinoires,

<https://www.syndicatdespatinoires.com/annuaire/>

Ref 29 - FAO (Food and Agriculture Organization of the united Nations), statistics Division,

<http://www.fao.org/faostat/fr/#home>

Ref 30 - Informations d'experts - Daikin et Denis Clodic

Ref 31 - Uniclimate - extractions annuelles de données internes

Ref 32 - AFPAC - La Pompe à Chaleur : De nos ambitions 2030 à nos perspectives 2050 - Mars 2018

Ref 33 - CCFA - Rapports annuels Analyse statistiques

Ref 34 - PSA - Communication interne

Ref 35 - Renault - Communication interne

Ref 36 - Scania - Communication interne

Ref 37 - Iveco - Communication interne

Ref 38 - CGDD - Chiffres clés du transport - Edition 2019

Ref 39 - RATP - Communication interne

Ref 40 - Base Behr Hella Service - Quantité de remplissage d'huile et réfrigérant VL/VUL/PL

Ref 41 - NRF - Airconditioning Filling Chart - R134a/R1234yf

Ref 42 - RTOC 2014 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 43 - RTOC 1998 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 44 - Renault - Communication interne

Ref 45 - RTOC 2010 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 46 - ADEME - Rapports annuels Automobile (VHU)



© Citepa 2022
www.citepa.org
infos@citepa.org
42, rue de Paradis
75010 PARIS