



Inventaire des émissions de fluides frigorigènes pour la France métropole

Résultats 2021 et estimation provisoire 2022

Rapport AFCE

Juillet 2023



Inventaire des émissions de fluides frigorigènes pour la France métropole

Résultats 2021 et estimation provisoire 2022
Juillet 2023

<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>	Ariane Druart, gestionnaire bases de données	Citepa

Pour citer ce document :

AFCE / Citepa, 2023. Inventaire des émissions de fluides frigorigènes pour la France métropole.
Résultats 2021 et estimation provisoire 2022

© Citepa 2023

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 la Transition Ecologique (MTE).

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 2021

I.	APPROCHE UTILISEE.....	7
1.	INTRODUCTION	8
2.	RESUME DE LA METHODE DE CALCUL.....	12
II.	RESULTATS TOTAUX 2021 – FRANCE METROPOLE	17
1.	PREAMBULE : LES EMISSIONS DE GAZ FLUORES PARMI LES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE	18
2.	BANQUE TOUS SECTEURS FRANCE METROPOLE	20
3.	EMISSIONS DE FLUIDES FRIGORIGENES - TOUS SECTEURS - FRANCE METROPOLE	21
4.	DEMANDE TOUS SECTEURS	25
5.	VERIFICATION DE COHERENCE.....	28
III.	SECTEUR 1 – LES APPLICATIONS DOMESTIQUES	31
1.	INTRODUCTION	32
2.	DONNEES ET HYPOTHESES – FROID DOMESTIQUE.....	32
3.	RESULTATS FROID DOMESTIQUE	38
IV.	SECTEUR DU FROID COMMERCIAL.....	41
1.	INTRODUCTION	42
2.	DONNEES ET HYPOTHESES.....	44
3.	RESULTATS	52
V.	SECTEUR DES TRANSPORTS FRIGORIFIQUES	56
1.	INTRODUCTION	57
2.	DONNEES ET HYPOTHESES.....	58
3.	RESULTATS	65
VI.	SECTEUR DU FROID INDUSTRIEL	69
1.	INTRODUCTION	70
2.	DONNEES ET HYPOTHESES.....	71
3.	RESULTATS	78
VII.	SECTEUR DES GROUPES REFROIDISSEURS A EAU (GRE)	82
1.	INTRODUCTION	83
2.	DONNEES ET HYPOTHESES.....	84
3.	RESULTATS	90
VIII.	CLIMATISATION A AIR ET PAC AIR/AIR	94

1.	INTRODUCTION	95
2.	DONNEES ET HYPOTHESES.....	97
3.	RESULTATS	105
IX.	POMPES A CHALEURS REVERSIBLES.....	110
1.	INTRODUCTION	111
2.	DONNEES ET HYPOTHESES.....	111
3.	RESULTATS	115
X.	CLIMATISATION MOBILE / CLIM AUTO	118
1.	INTRODUCTION	119
2.	DONNEES ET HYPOTHESES.....	120
3.	RESULTATS	129
XI.	ANNEXES	132
1.	PRG DONNES PAR LE 4 ^{EME} & 5 ^{EME} RAPPORT DU GIEC (AR4 – AR5)	133
2.	EMISSIONS DECLAREES POUR LE SECTEUR 2F1	134
3.	ACRONYMES ET ABREVIATIONS.....	135
4.	TABLE DES FIGURES	136
5.	TABLE DES TABLEAUX	140
6.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	143

I. Approche utilisée

1. Introduction

1.1 Contexte réglementaire

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, de l'amendement de Doha et de l'Accord de Paris, la France doit réaliser chaque année l'inventaire de ses émissions de gaz à effet de serre.

Les substances devant être inventoriées sont les sept gaz à effet de serre direct qui constituent le « panier Kyoto » : dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4), protoxyde d'azote (N_2O), les deux familles de substances halogénées, à savoir les hydrofluorocarbures (HFC) et perfluorocarbures (PFC), l'hexafluorure de soufre (SF_6) ainsi que le trifluorure d'azote (NF_3). 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.

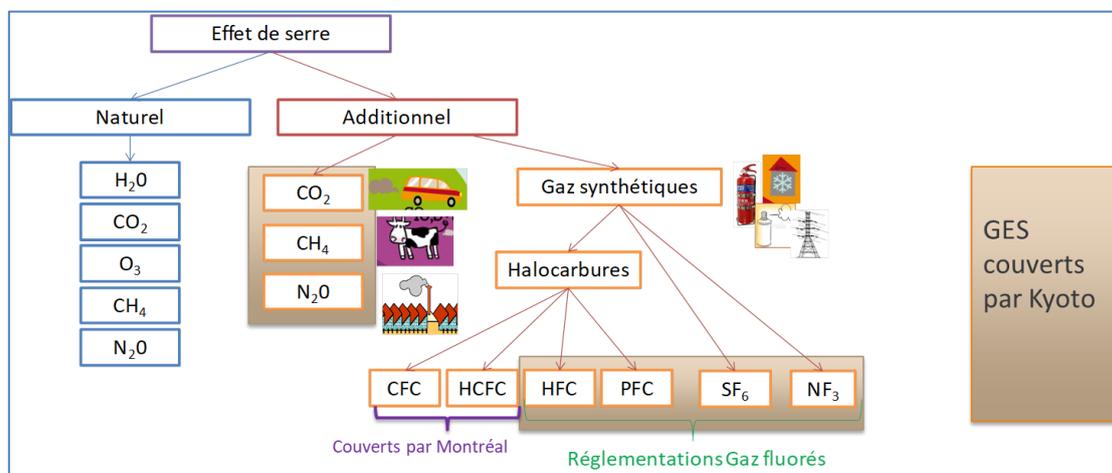


Figure 1 - Les gaz à effet de serre

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). Dans ce cadre, il réalise les émissions de l'ensemble des gaz à effet de serre, incluant les HFC, et en particulier ceux utilisés dans les secteurs du froid et de la climatisation.

Les études d'inventaires d'émissions de fluides frigorigènes sont réalisées chaque année pour évaluer les émissions de HFC des secteurs du froid et de la climatisation. Dans le cadre des obligations de rapportage, ces émissions sont déclarées au secteur 2F1 des tables CRF (Common Reporting Format) de la CCNUCC.

La Figure 2 présente les données devant être déclarées lors du rapportage des émissions de HFC. Elles sont de deux types : les données d'activité et les émissions.

- Les données d'activité sont, pour chaque HFC, de trois types :
 - o les quantités chargées dans les nouveaux équipements,
 - o la banque, soit les quantités présentes dans les équipements formant le parc français,
 - o et, les quantités restant dans les équipements parvenant en fin de vie.
- Les émissions sont décomposées en trois parties : les émissions à la charge, les émissions liées à la banque, se produisant au cours de la vie de l'équipement, et les émissions de fin de vie.
- Elles sont décomposées par HFC primaire :
 - o HFC-32,
 - o HFC-125,
 - o HFC-134a,
 - o HFC-143a
 - o et HFC-152a ;

Les HFC contenus dans les mélanges HCFC-HFC doivent être pris en compte. En revanche, les HFO ne sont pas encore soumis à déclaration.

- Les déclarations doivent être réalisées pour chacun des 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 2021), à chaque édition d'inventaire.

Tables CRF

Quantité de fluide introduite dans les nouveaux équipements
Banque
Quantité de fluide dans les équipements fin de vie
Emissions à la charge des nouveaux équipements
Emissions durée de vie
Emissions fin de vie

GREENHOUSE GAS SOURCE AND SINK CATEGORIES	Gas (please specify) <i>One row per substance</i>	ACTIVITY DATA			IMPLIED EMISSION FACTORS ⁽¹⁾			EMISSIONS ⁽²⁾			
		Amount	Amount	Amount	Product manufacturing factor	Product life factor	Disposal loss factor	From manufacturing	From stocks	From disposal	Recovery ⁽³⁾
		(t)	(t)	(t)	%	%	%	(t)	(t)	(t)	(t)
F. Product uses as substitutes for ODS											
1. Refrigeration and air-conditioning											
Commercial refrigeration											
HFC-32	HFC-32	NO	IE	NO	NO	IE	NO	IE	NO	NO	NO
HFC-125	HFC-125	NO	IE	NO	NO	IE	NO	IE	NO	NO	NO
HFC-134a	HFC-134a	NO	IE	NO	NO	IE	NO	IE	NO	NO	NO
HFC-143a	HFC-143a	NO	IE	NO	NO	IE	NO	IE	NO	NO	NO
C3F8	C3F8	NO	IE	NO	NO	IE	NO	IE	NO	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	14,33	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

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 ou l'outil à utiliser 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, lors des opérations de retrofit, et 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 comportements, pratiques et performances sur le terrain, en incluant les dysfonctionnements et les pertes accidentelles qui peuvent pénaliser les moyennes.

1.2 La demande de l'AFCE

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 les résultats du calcul d'inventaire de 1990 à 2022 par famille de fluide frigorigène (CFC, HCFC, HFC, autres fluides non fluorés) et par fluide pour l'année 2021, les résultats de l'année 2022 n'étant qu'une estimation provisoire. Le calcul ne permet pas de différencier les parts de marchés des fluides « équivalents » en termes de PRG. Cette année les résultats ont donc été regroupés pour les fluides frigorigènes de même type (par exemple R-448A/R-449A pour les mélanges de PRG autour de 1300).

La structure du rapport est la suivante : l'approche utilisée pour le calcul des émissions de fluides frigorigènes est présentée, puis la synthèse des résultats totaux et des chapitres sectoriels présentent les hypothèses et principaux résultats (émissions, banques et demandes en fluides frigorigènes) par secteur. Les graphes présentent les résultats par famille de fluides frigorigènes de 1990 à 2021, l'estimation provisoire pour 2022, 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 (2021).

Le rapport de 2022 avait apporté un niveau de détail important sur la reconstitution de la base de données des hypothèses, par secteur, étant donné que c'était le premier rapport s'appuyant sur les résultats donnés par le nouvel outil de calcul et la base de données du Citepa. Le rapport de cette année présente un résumé de la méthode de calcul et s'attache principalement à détailler les hypothèses de l'année en cours. Pour plus d'information, se reporter à [Ref 2].

Ce rapport est un outil de travail pour améliorer l'évaluation des émissions de fluides frigorigènes. Il peut permettre de favoriser les échanges entre ceux qui réalisent l'inventaire des émissions de fluides frigorigènes et la profession, qui pourra 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 et des nouvelles sources de données qui seront communiquées. Nous tenons à remercier les membres de l'AFCE pour leurs premiers retours sur le rapport d'inventaire 2021 qui permet à la fois d'améliorer le calcul des émissions et d'adapter le rapport pour qu'il soit plus utile à la profession.

1.3 Evolution des PRG (Potentiel de Réchauffement Global) utilisés

Les PRG (Potentiel de réchauffement Global) ou GWP (Global Warming Potential), en anglais, sont des indices caractérisant l'impact des gaz à effet de serre (GES) sur le réchauffement climatique en comparaison du CO₂ (dont le PRG est 1). Ils permettent, notamment, de convertir les émissions de HFC en équivalents CO₂. Les PRG sont réévalués régulièrement et publiés dans les rapports du GIEC. Les obligations internationales et les réglementations peuvent choisir de s'appuyer sur l'une ou l'autre de ces évaluations.

La dernière évaluation est celle du 6^{ème} rapport du GIEC (AR6) paru en 2022.

Pour l'inventaire des émissions de GES, la CCNUCC a imposé d'utiliser :

- l'évaluation du 2nd rapport (SAR) du GIEC sur la première période d'engagement du Protocole de Kyoto (2008-2012)
- puis celle du 4^{ème} rapport (AR4) sur la deuxième période d'engagement (2012-2020)
- et, à partir de l'inventaire 2021, celle du 5^{ème} rapport du GIEC (AR5), bien que paru en 2014.

L'inventaire 2021 a donc pris en compte les valeurs des PRG données par le 5^{ème} rapport du GIEC alors que l'inventaire 2020 prenait en compte celles du 4^{ème} rapport. Comme le montre le tableau ci-dessous, la tendance est principalement à la baisse entre ces deux évaluations.

Tableau 1 - Evolution des PRG des principaux CFC, HCFC et HFC utilisés en réfrigération et climatisation [Ref 6]

Industrial designation or common name	Chemical formula	GWP values for 100-year time horizon		
		Second Assessment Report (SAR)	Fourth Assessment Report (AR4)	Fifth Assessment Report (AR5)
Substances controlled by the Montreal Protocol				
CFC-11	CCl ₃ F	3,800	4,750	4,660
CFC-12	CCl ₂ F ₂	8,100	10,900	10,200
HCFC-22	CHClF ₂	1,500	1,810	1,760
Hydrofluorocarbons (HFCs)				
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	1,300	1,430	1,300
HFC-143a	CH ₃ CF ₃	3,800	4,470	4,800
HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	140	124	138
HFC-125	CHF ₂ CF ₃	2,800	3,500	3,170
HFC-32	CH ₂ F ₂	650	675	677
HFC-23	CHF ₃	11,700	14,800	12,400

Dans l'inventaire, les émissions sont réévaluées chaque année sur toute la période temporelle, depuis 1990. Par conséquent, le changement de référence impacte à la baisse l'ensemble des émissions de HFC depuis 1990.

2. Résumé de la méthode de calcul

La méthode de calcul a été présentée de façon très détaillée dans le rapport de l'an dernier [Ref 2]. Il est choisi de rappeler ici seulement les grands axes de la méthode.

De même, la reconstitution de la base de données regroupant l'historique des caractéristiques des équipements a été explicitée dans le détail, par secteur, dans le rapport de l'an dernier. Désormais, les mises à jour annuelles présenteront principalement les hypothèses de l'année en cours ou les évolutions par rapport à la version précédente.

La méthode de calcul s'appuie sur les lignes directrices du GIEC [Ref 3], les développements réalisés par le CES MINES-ParisTech lors de la réalisation des inventaires de fluides frigorigènes jusqu'en 2016 [Ref 8] et des travaux de thèse [Ref 4].

L'ensemble des équipements du froid et de la climatisation sont pris en compte et structurés selon 8 grands secteurs (Tableau 2). De nouveaux sous-secteurs peuvent être pris en compte, dans un souci d'amélioration ou d'exhaustivité (décomposition de certains sous-secteurs ou ajouts). Il a été question cette année de distinguer le sous-secteur des cuisines professionnelles dans le froid commercial. Les échanges avec le SYNEG ont montré que cette application n'était prise en compte que partiellement dans le sous-secteur des petits commerces dans l'inventaire. Un complément d'enquête est nécessaire afin d'évaluer la charge moyenne de ce type d'équipements et de pouvoir le prendre en compte de façon plus précise dans le calcul.

Tableau 2 - Structure de la base de données des secteurs du froid et de la climatisation

Froid domestique	<ul style="list-style-type: none"> - Réfrigérateurs - Congélateurs - Caves à vin - Sèche linges thermodynamiques
Froid commercial	<ul style="list-style-type: none"> - Supermarchés - Hypermarchés - Petits commerces
Transport frigorifique	<ul style="list-style-type: none"> - Semi-remorques - Utilitaires - Part des conteneurs réfrigérés au niveau mondial - Part des navires réfrigérés
Climatisation à air	<ul style="list-style-type: none"> - Climatiseurs portables - Splits - windows - Multi-splits - Installations centralisées - VRV - Roof top - Autres équipements de climatisation
Pompes à chaleurs réversibles	<ul style="list-style-type: none"> - Air/eau - Eau/eau - Sol/sol - Sol/eau - Chauffe eaux thermodynamiques
Groupes refroidisseurs à eau	<ul style="list-style-type: none"> - A compresseur centrifuge - De forte puissance (> 350 kW) - De moyenne puissance (50 à 350 kW) - De faible puissance (< 50 kW)
Froid industriel	<ul style="list-style-type: none"> - Agroalimentaire - Procédés chimiques - Procédés pharmaceutiques - Production caoutchouc - Patinoires
Climatisation automobile	<ul style="list-style-type: none"> - Véhicules particuliers et utilitaires légers - Véhicules industriels - Cars et bus - Trains

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. Cette répartition est basée sur une évaluation d'expert assez ancienne. Une réévaluation est à l'étude avec Uniclimate.

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.

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).

$$E_Totales = E_charge + E_duree-de-vie + E_fin-de-vie + E_conteneurs$$

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 3 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 » (Tableau 3) ;
- d'un facteur d'émission.

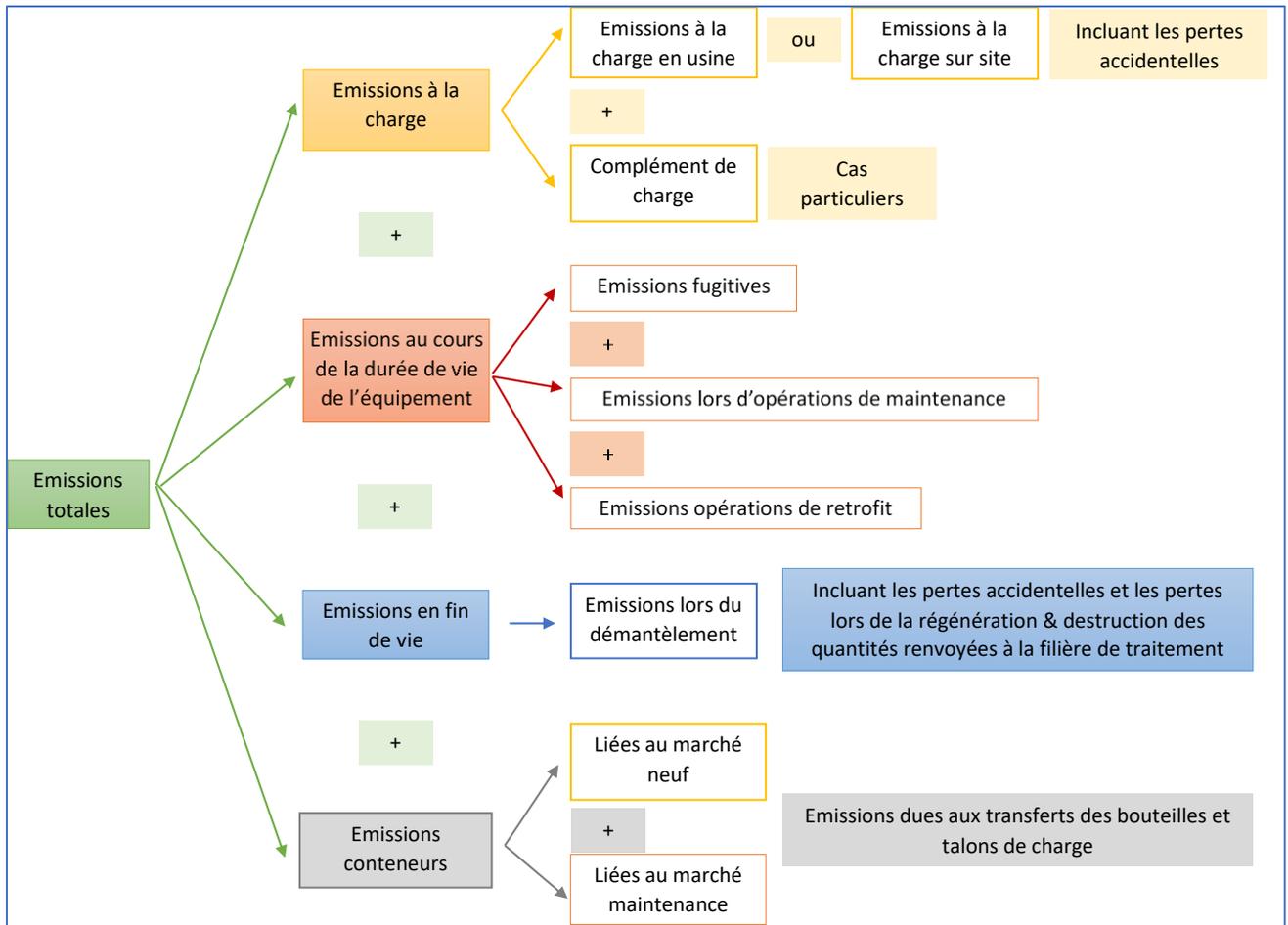


Figure 3 - Principes de la méthode de calcul des émissions de fluides frigorigènes

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 4] 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.

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.

2.3 Bilan des données nécessaires au calcul

L'ensemble des données d'activité et facteurs d'émissions récapitulées au Tableau 3, ont été consolidées, pour la période nécessaire au calcul d'inventaire de 1990 à 2021, pour chacune des 40 applications des 8 domaines du froid et de la climatisation pris en compte. Elles sont revues chaque année, alors que l'année en cours est mise à jour.

Tableau 3 - 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 (impacting 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. Ces facteurs tiennent compte aussi 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 lié à la gestion des conteneurs est particulièrement difficile à estimer. Selon les lignes directrices, les émissions sont estimées à 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. Une collaboration est à l'étude avec l'ADC3R afin de réévaluer ces taux.
- 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, le facteur d'émission au cours de la vie d'un équipement tient compte :
 - D'un facteur d'émission fugitif incluant les pertes accidentelles sur le parc,
 - D'un facteur d'émission 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 et de la part estimée d'équipements traités sur l'ensemble du parc parvenant en fin de vie. Ce facteur d'émission dépend donc 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.

II. Résultats totaux 2021 - France métropole

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

En 2021, les émissions de HFC représentent seulement 2,4 % des émissions de gaz à effet de serre de la France (Figure 4). D'un point de vue sectoriel, 83 % des émissions de gaz fluorés sont attribuables aux applications du froid et de la climatisation (Figure 5).

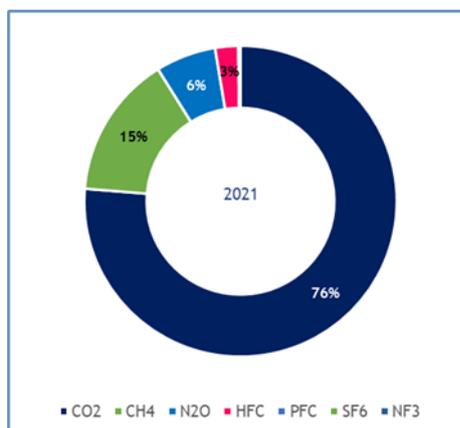


Figure 4 - Répartition des émissions de GES en 2021 (Métropole & territoires d'outre mer compris dans l'Europe)

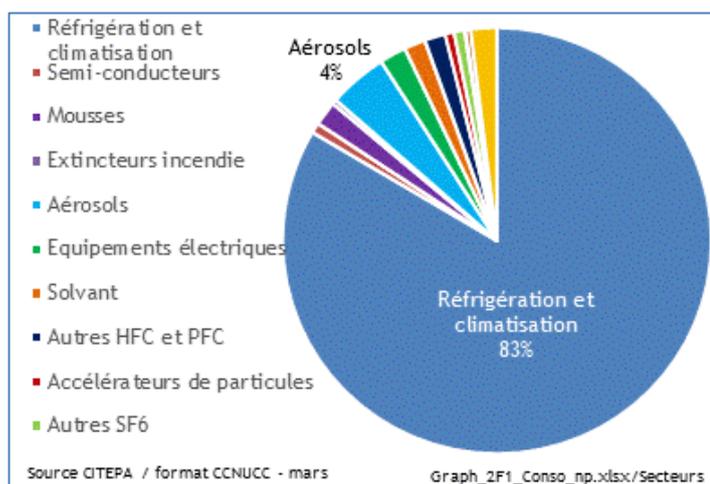


Figure 5 - Répartition sectorielle des gaz fluorés en 2021 (Métropole)

La Figure 6 présente l'évolution de la répartition des émissions de gaz à effet de serre, en CO₂ équivalent au cours du temps : la part des HFC est en décroissance. La Figure 12 montre qu'en revanche, la part du secteur du froid et de la climatisation est plus significative ces dernières années car la part des aérosols s'est vue réduite par l'arrêt d'utilisation du R-134a depuis 2018.

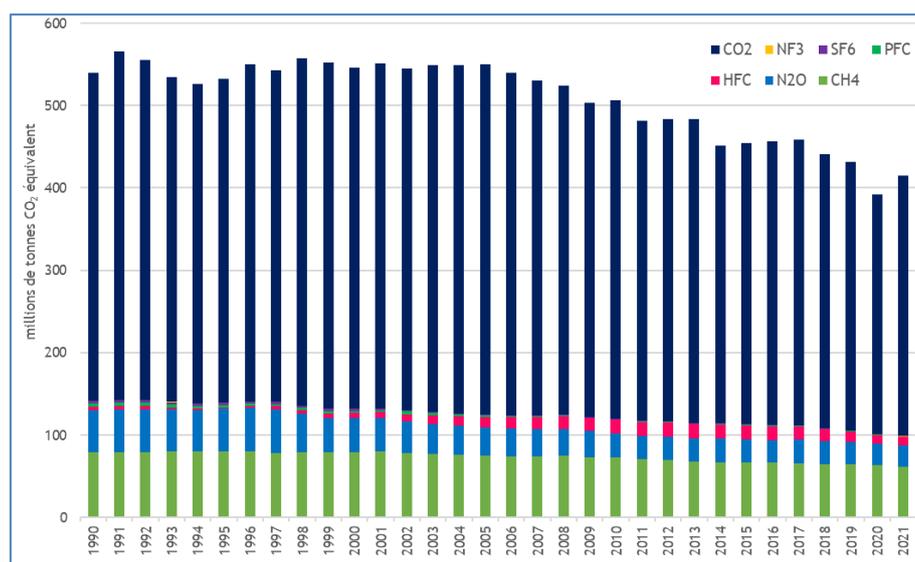


Figure 6 - Répartition des émissions de GES en CO₂ équivalent en France, périmètre Kyoto (France métropole & territoires d'outre-mer inclus dans l'UE). Source : Citepa, données Secten 2023.

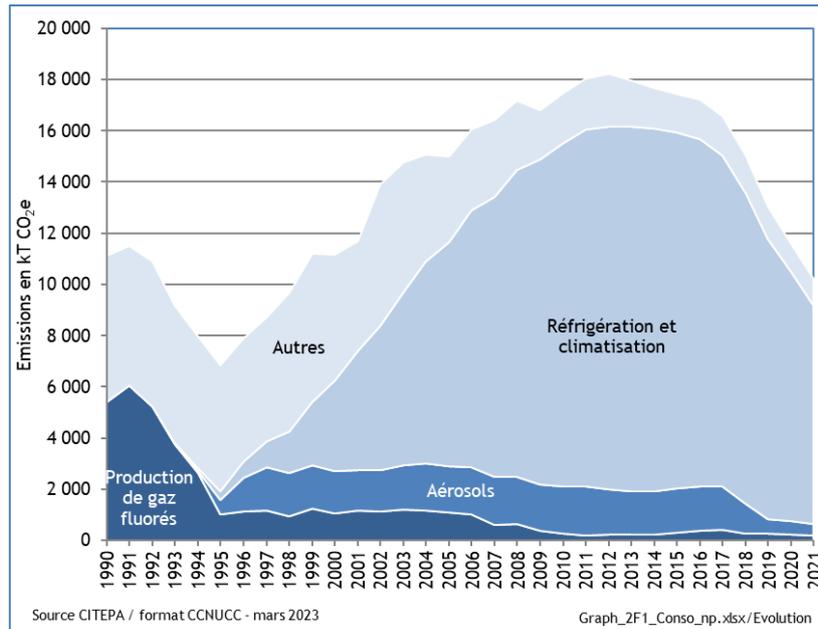


Figure 7 - Evolution des émissions de gaz fluorés (HFC, PFC, SF₆, NF₃) en France de 1990 à 2021, Périmètre Kyoto (France métropole et territoires d’Outre-mer inclus dans l’UE). Source : Citepa, rapport CNUCC 2023.

Les gaz fluorés représentent donc une faible part des émissions de gaz à effet de serre en France. Les émissions de gaz fluorés sont dominées par celles de HFCs et les secteurs du froid et de la climatisation en sont les principaux utilisateurs. Le reste du rapport se limitera à ces secteurs mais englobera l’ensemble des fluides frigorigènes : CFC, HCFC, HFC (incluant les HFO) et non fluorés (HC, CO₂ et ammoniac).

2. Banque tous secteurs France métropole

La banque est formée par les quantités de fluides frigorigènes contenues dans l'ensemble des équipements installés en France. La banque impacte fortement les émissions puisque c'est la banque qui émet, de façon fugitive et elle représente un potentiel de quantités à récupérer tant que les équipements n'ont pas atteints leur fin de vie ou ne sont rétrofittés.

La banque totale de fluides frigorigènes en France métropole est en croissance régulière. Elle a atteint 59 300 tonnes en 2021 et est, à 87 %, composée de HFCs. La banque est assez stable depuis 2012, avec cependant une croissance légèrement plus marquée depuis 2018 essentiellement due à la croissance du marché de la climatisation à air. La baisse de la banque prévue en 2022 (-1,2 %) est à confirmer par l'inventaire 2022. Elle s'explique par l'arrivée en fin de vie du nombre élevé d'équipements de climatisation à air et pompes à chaleur des années 2006-2008 et la tendance décroissante des banques de froid commercial et industriel.

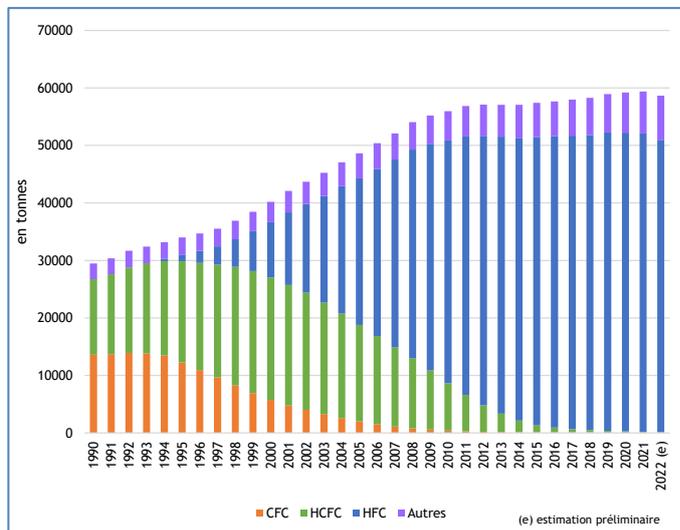


Figure 8 - Evolution de la banque totale de fluides frigorigènes en France métropole

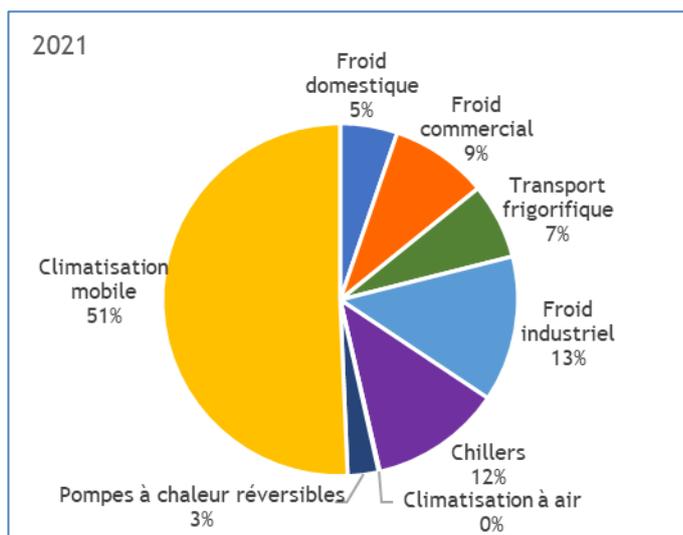


Figure 9 - Répartition sectorielle de la banque de R-134a en 2021 en France métropole

Tableau 4 - Banque 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-11	13
R-12	42
Total CFC	55
R-22	135
Total HCFC	135
R-134a	15 832
R-32	2 860
R-404A - R507 (PRG~3950)	3 299
R-407A	475
R-407C	2 829
R-407F	354
R-410A	15 723
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	909
R-448A - R-449A (PRG~1300)	1 780
R-452A	331
R-454C - R-455A (PRG~150)	81
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	974
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	6 379
Total HFC	51 826
R-290	420
R-600a	2 694
R-717	3 350
R-744	846
Total Autres	7 311
Total général	59 327

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

Les fluides frigorigènes les plus présents sont le R-134a et le R-410A. Ils représentent chacun environ un quart (26 à 27 %) de la banque en 2021. Le secteur le plus utilisateur de R-134a reste la climatisation automobile, à environ 50%, le renouvellement du parc vers des véhicules utilisant le R-1234yf n'étant encore que partiel (environ 1/3 du parc renouvelé). Le R-410A 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 par la climatisation mobile et la climatisation à air dont les parcs d'équipements sont en forte croissance (Figure 10 - Répartition sectorielle de la banque de HFC en France métropole en 2021.). La banque de la climatisation automobile se renouvelle progressivement vers du R-1234yf, ce qui explique qu'en équivalent CO₂, sa part ne représente plus que 14 % de la banque (Figure 11). 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 3000 tonnes en 2021.

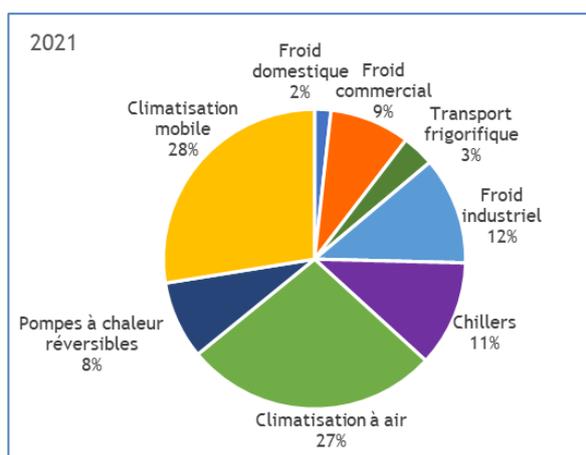


Figure 10 - Répartition sectorielle de la banque de HFC en France métropole en 2021.

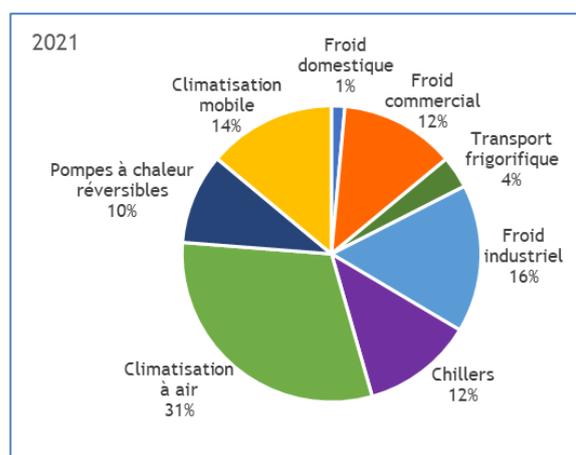


Figure 11 - Répartition sectorielle de la banque équivalente CO₂ de HFC en France métropole en 2021

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

3.1.1 Emissions totales

Les émissions totales 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 5 900 tonnes en 2021, en baisse de 4,5 % par rapport à 2020. Les émissions de HFC sont en baisse de 4,7 % par rapport à 2020 et entre 2021 et 2022, les prévisions chiffrent cette baisse à plus de 7%.

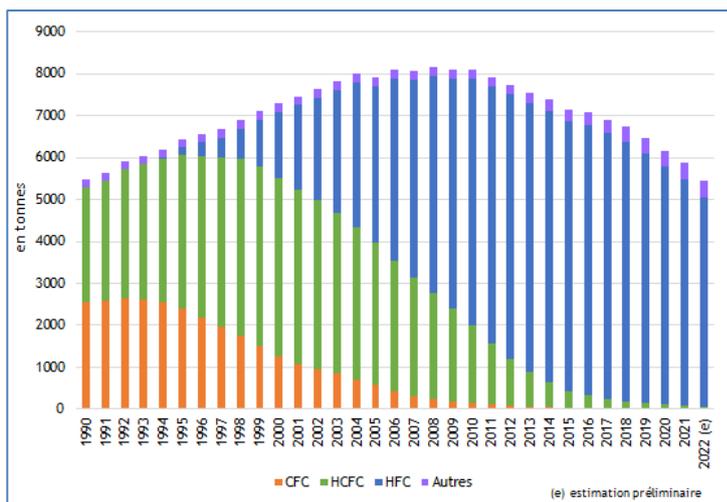


Figure 12 - Evolution en tonnes des émissions de fluides frigorigènes en France métropole (1990-2022)

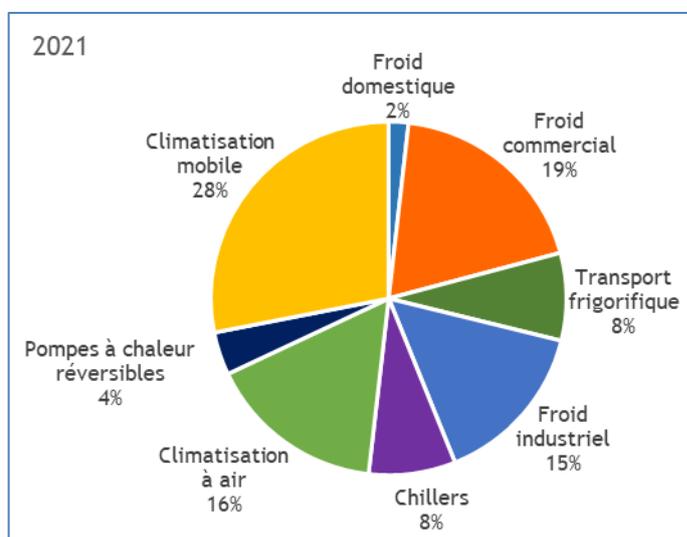


Figure 13 - Répartition sectorielle des émissions de HFC (en tonnes) en France métropole en 2021

Tableau 5 - Emissions 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-11	1,9
R-12	16
Total CFC	18
R-22	61
Total HCFC	61
R-134a	2 147
R-32	133
R-404A - R507 (PRG~3950)	550
R-407A	96
R-407C	312
R-407F	76
R-410A	989
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	89
R-448A - R-449A (PRG~1300)	304
R-452A	47
R-454C - R-455A (PRG~150)	13
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	136
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	512
Total HFC	5 403
R-290	13
R-600a	56
R-717	126
R-744	192
Total Autres	388
Total général	5 870

Les émissions de fluides frigorigènes 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.

Les émissions sont, à l'image de la constitution de la banque (Tableau 4), dominées par celles du R-134a (37 %) et du R-410A (17 %). Les émissions de R-404A ne représentent plus que 9 % du total, du fait de la conversion progressive des installations et de la réduction des taux de fuites.

A noter, une correction a été apportée aux émissions d'ammoniac dont les émissions avaient été surestimés dans l'édition précédente.

3.1.2 Emissions CO₂ équivalentes

Les émissions CO₂ doivent être calculées, à partir de l'inventaire 2021, en tenant compte des PRG donnés par le 5^{ème} rapport du GIEC (AR5), conformément aux exigences de la CCNUCC dans le cadre de la mise en œuvre de l'Accord de Paris. Par conséquent, ce rapport présente les émissions CO₂ équivalentes recalculées depuis 1990, en tenant compte des valeurs de PRG données par l'AR5, ce qui équivaut, en moyenne à une réduction de 6 % des émissions de CO₂ équivalentes des fluides frigorigènes par rapport au calcul réalisé selon les PRG du 4^{ème} rapport du GIEC (lesquels étaient utilisés dans les inventaires de 2012 à 2020).

En 2021, les émissions de fluides frigorigènes en France métropole sont estimées à 8,8 millions de tonnes de CO₂ équivalent dont 8,5 millions de HFC. Les émissions de fluides frigorigènes, en CO₂ équivalent, sont en forte décroissance depuis 2018, de plus de 10 % par an (Figure 14). La baisse est de 12 % entre 2020 et 2021 et pourrait être d'environ 16 % entre 2021 et 2022 selon les premières estimations. 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 4 dernières années ;
- L'échéance de 2020 interdisant l'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.

En 2021, la part des émissions de la climatisation fixe représente 35% des émissions CO₂ équivalentes si on considère l'ensemble du secteur incluant la climatisation à air, les pompes à chaleur réversibles et 1/3 des chillers (Figure 15). Les émissions CO₂ des secteurs du froid commercial et du froid industriel ont fortement diminué au cours du temps (Figure 16). Cependant, malgré la réduction de la banque de R-404A de plus de 50 % entre 2015 et 2021, les émissions CO₂ équivalentes du froid commercial restent importantes, et représentent près d'un quart des émissions CO₂ équivalentes de fluides frigorigènes, car les émissions fugitives de R-404A et celles se produisant au cours des retrofits ou fins de vie sont encore importantes. La part du froid industriel est plus faible grâce à l'usage répandu de l'ammoniac. 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 15) des émissions CO₂ équivalentes de HFC de la France métropole en 2021.

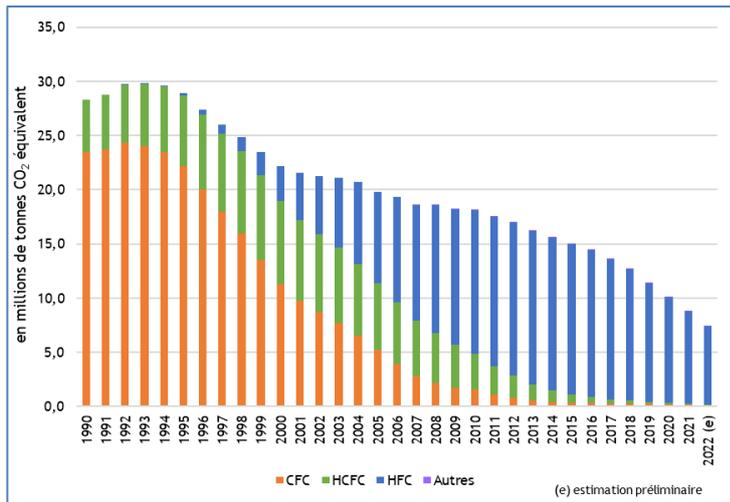


Figure 14 - Evolution, en tonnes de CO₂ équivalent, des émissions de fluides frigorigènes en France métropole

Tableau 6 - Emissions CO₂ eq. 2021

Fluide frigorigène	2021 (en ktCO ₂ e)
R-11	8,8
R-12	163
Total CFC	172
R-22	106
Total HCFC	106
R-134a	2 791
R-32	90
R-404A - R507 (PRG~3950)	2 168
R-407A	184
R-407C	506
R-407F	127
R-410A	1 903
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	202
R-448A - R-449A (PRG~1300)	389
R-452A	92
R-454C - R-455A (PRG~150)	2,0
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	77
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	0,5
Total HFC	8 531
R-290	0,04
R-600a	0,17
R-744	0,19
Total Autres	0,40
Total général	8 810

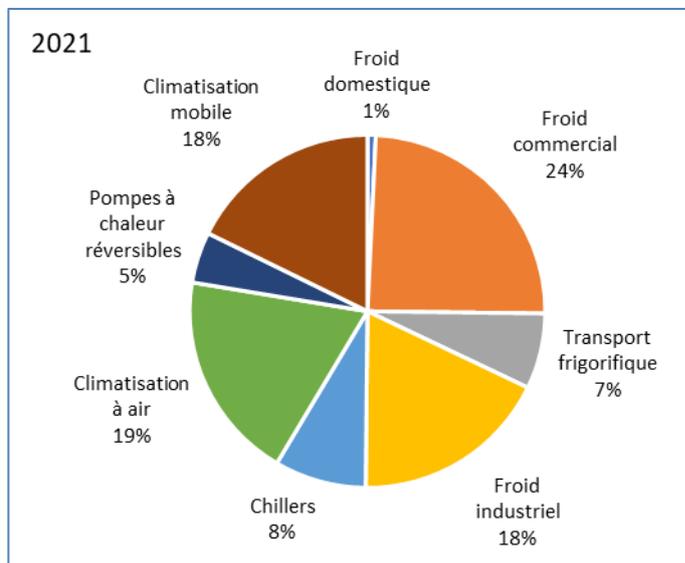


Figure 15 - Répartition sectorielle des émissions CO₂ équivalentes de HFC en France métropole en 2021

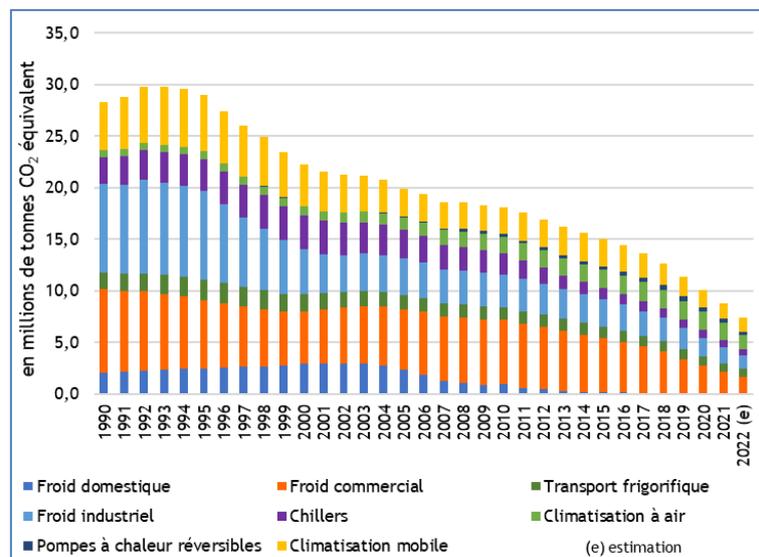


Figure 16 - Evolution des parts sectorielles des émissions CO₂ équivalentes de fluides frigorigènes

4. Demande tous secteurs

Cette partie présente la demande totale soit l'estimation du 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, ce qui explique certains écarts observés avec les marchés déclarés.

4.1 Demande totale

La demande totale en fluides frigorigènes est évaluée à 7 500 tonnes pour l'année 2021, dont 6 800 tonnes de HFC. Plus d'un quart 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 9 % de la demande totale en 2021.

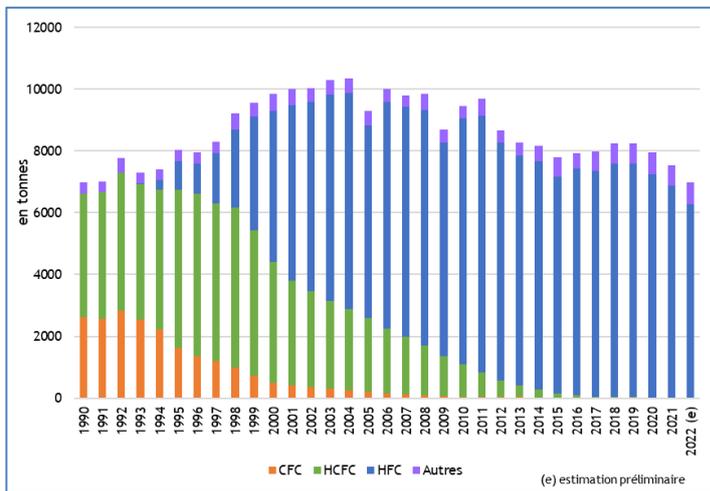


Figure 17 - Demande totale en fluides frigorigènes pour la France métropole

Malgré les besoins pour la maintenance des installations, la demande totale en HFC à fort PRG est en forte décroissance (-35 % pour le R-404A, -27 % pour le R-407C, - 13 % pour le R-410A entre 2020 et 2021. Parallèlement, la demande en HFO augmente (+17 % pour le R-1234ze, +3 % pour le R-1234yf) ainsi que pour les mélanges de transition. 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.

Tableau 7 - Demande 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-11	1,8
R-12	3,6
Total CFC	5,4
R-22	13
Total HCFC	13
R-134a	1 920
R-32	530
R-404A - R507 (PRG~3950)	488
R-407A	107
R-407C	96
R-407F	91
R-410A	879
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	77
R-448A - R-449A (PRG~1300)	927
R-452A	112
R-454C - R-455A (PRG~150)	50
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	403
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	1 166
Total HFC	6 846
R-290	46
R-600a	11
R-717	269
R-744	349
Total Autres	676
Total général	7 540

La demande totale est 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, et peut être comparée aux marchés déclarés. La Figure 22 présente l'évolution des marchés déclarés au SNEFCCA et la demande totale reconstituée par le calcul Citepa.

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 18) 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 19).

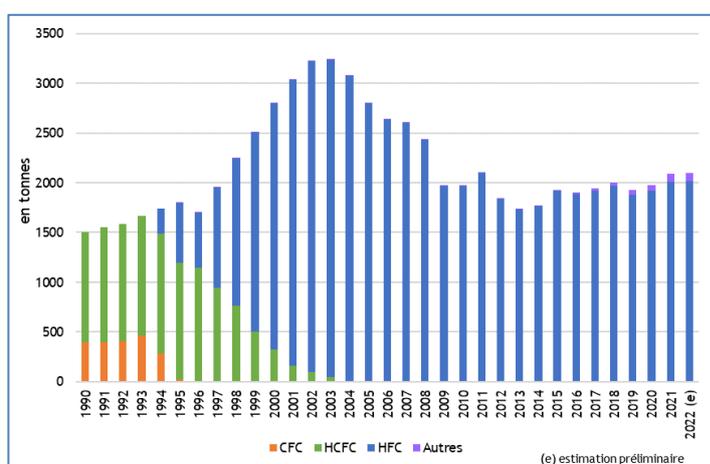


Figure 18 - Besoin en fluides frigorigènes pour la production d'équipements pré-chargés en France métropole

Tableau 8 - Production 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	400
R-32	265
R-404A - R507 (PRG~3950)	4,9
R-407A	1,2
R-407C	0,5
R-410A	224
R-448A - R-449A (PRG~1300)	18
R-452A	7,5
R-454C - R-455A (PRG~150)	1,2
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	114
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	972
Total HFC	2 009
R-290	24
R-600a	9,3
R-717	2,9
R-744	43
Total Autres	80
Total général	2 089

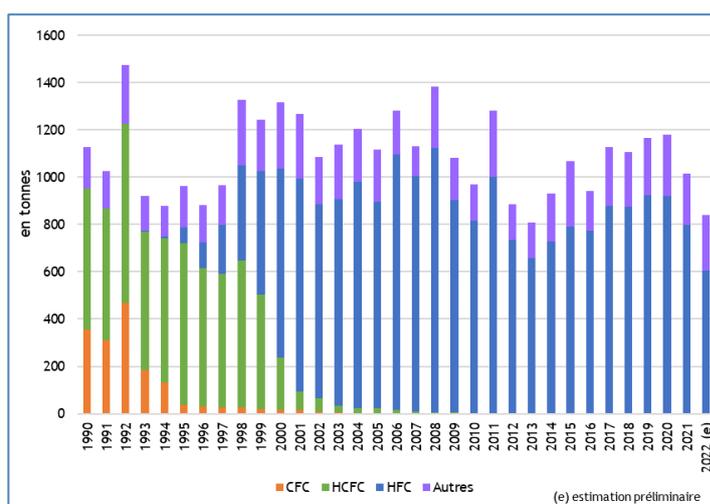


Figure 19 - Besoin en fluides frigorigènes pour la charge d'équipements sur site en France métropole

Tableau 9 - Charge 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	131
R-32	193
R-407A	8,5
R-407F	4,1
R-410A	199
R-448A - R-449A (PRG~1300)	142
R-452A	26
R-454C - R-455A (PRG~150)	39
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	30
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	25
Total HFC	797
R-290	7,8
R-717	109
R-744	100
Total Autres	217
Total général	1 014

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

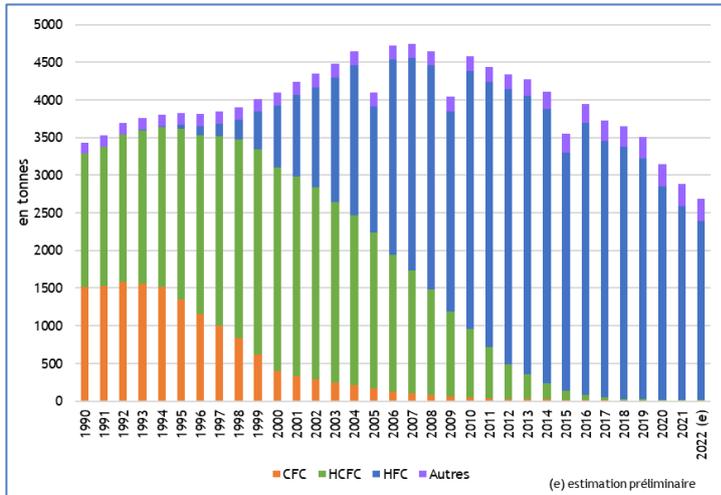


Figure 20 - Evolution du besoin estimé pour la maintenance des installations sur le parc d'équipements en France

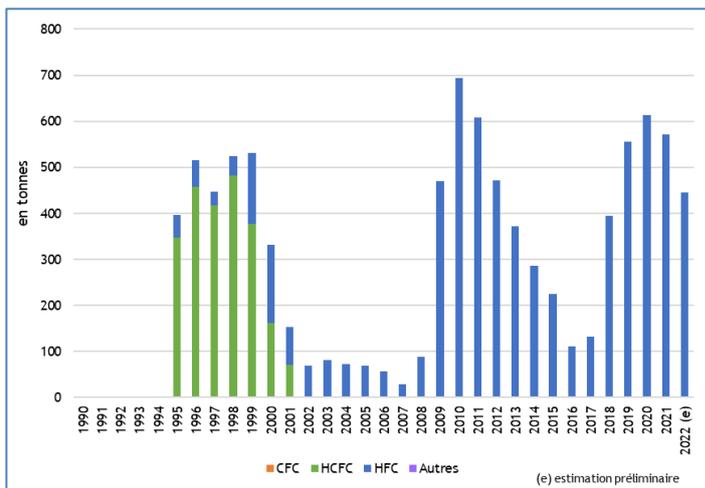


Figure 21 - Evolution du besoin estimé pour le retrofit des installations utilisant des HFC à fort PRG en France

Tableau 10 - Besoin maintenance 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-11	1,5
R-12	3,1
Total CFC	4,7
R-22	12
Total HCFC	12
R-134a	1 138
R-32	3,9
R-404A - R507 (PRG~3950)	419
R-407A	84
R-407C	83
R-407F	75
R-410A	341
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	67
R-448A - R-449A (PRG~1300)	241
R-452A	20
R-454C - R-455A (PRG~150)	3,7
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	90
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	8,7
Total HFC	2 576
R-290	8,3
R-600a	0,3
R-717	122
R-744	161
Total Autres	291
Total général	2 883

Tableau 11 - Besoin retrofit 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-448A - R-449A (PRG~1300)	404
R-452A	43
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	116
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	7,2
Total HFC	571
Total général	571

Les principaux secteurs demandeurs en fluides frigorigènes pour la maintenance de leurs installations sont le froid commercial (30 %) et le froid industriel (29 %). La demande en R-404A est en forte baisse (-35 % entre 2020 et 2021), partagée à part égales entre le froid commercial et le froid industriel. 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.

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 totale reconstituée peut être comparée aux marchés déclarés, comme ci-dessous.

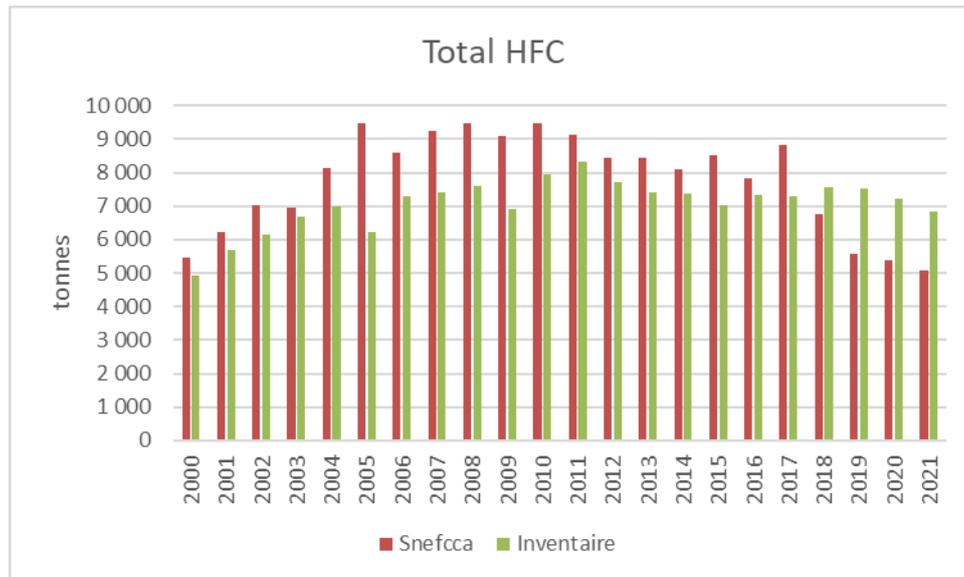


Figure 22 - Comparaison de la demande totale calculée aux marchés déclarés au SNEFCCA

La tendance montre que, globalement, la demande approche bien le marché, excepté certaines années telles que 2005 où un marché a été sous-estimé ou, au contraire, une surproduction de réfrigérants s'est produite. La demande est, sur l'historique, plutôt inférieure aux marchés déclarés. Il est possible qu'une partie du parc d'équipements n'ait pas été prise en compte dans l'inventaire (toutes les données ne sont pas accessibles), ou que les taux d'émissions aient été sous-estimés. 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.

Depuis 2018 la tendance est inversée : la demande est supérieure au marché. Cela signifie qu'une partie du besoin, pour la maintenance, n'est pas satisfaite, ou l'est par des quantités non déclarées : fluides recyclés directement ou marché illicite. Cette inversion de tendance est apparue très significativement avec la forte hausse des prix des HFC à partir de 2017-2018. L'année 2017 a sans doute été l'occasion de stockage par crainte de la hausse des prix et de la pénurie.

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

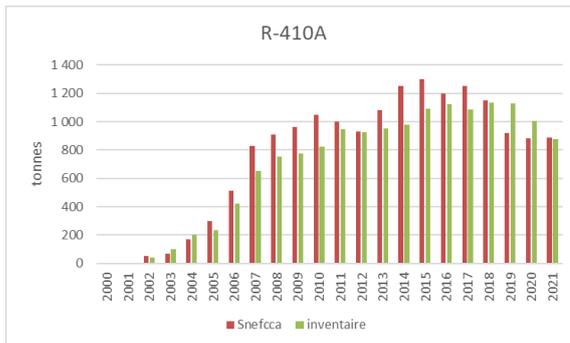


Figure 23 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-410A

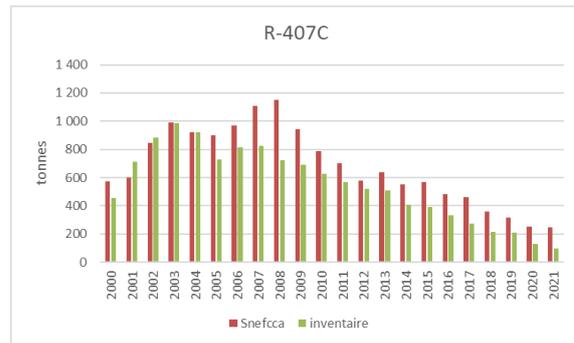


Figure 24 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-407C

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, Uniclimate, qui fournit au Citepa des données détaillées sur les marchés d’équipements et les fluides utilisés par gamme. Les résultats des comparaisons (Figure 23 et Figure 24) 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 : la demande de R-32 est estimée à 500 tonnes pour un marché déclaré au Snefccca de 145 tonnes.

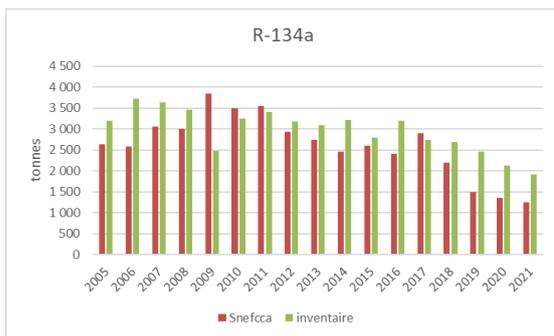


Figure 25 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-134a

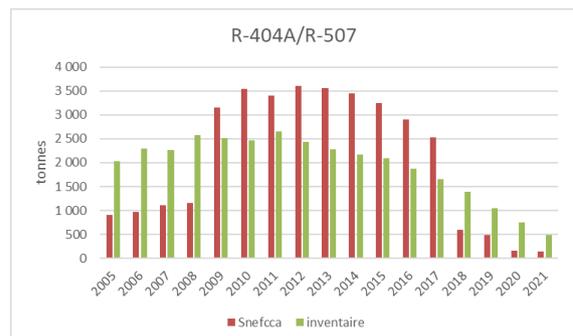


Figure 26 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-404A

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. Une incertitude sur la demande de R-404A est liée à la prise en compte des petits commerces, au rythme de transition R-22 R-404A, à une sous-estimation des facteurs d’émission, bien qu’ils soient déjà élevés. Cependant, il est aussi possible d’une incertitude des données déclarées avant 2009, au vu de l’écart constaté entre 2007-2008 et la période post 2009. Sur les années récentes, la demande en R404A est supérieure au marché déclaré et en partie satisfaite par du fluide recyclé sur site ou un marché illicite.

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

La Figure 27 compare les quantités de gaz fluorés récupérées en fin de vie des équipements estimées par le calcul avec les quantités réellement retournées aux distributeurs (selon les déclarations Snefcca) et au potentiel de récupération. Les courbes représentées sont :

- En bleu, les quantités cumulées de CFC, HCFC, HFC retournées aux distributeurs pour régénération ou destruction (données SNEFCCA) ;
- En orange, les quantités récupérées estimées par le calcul du Citepa, celles-ci dépendant des données et hypothèses sur les performances des filières de récupération en fin de vie ;
- En vert, 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.

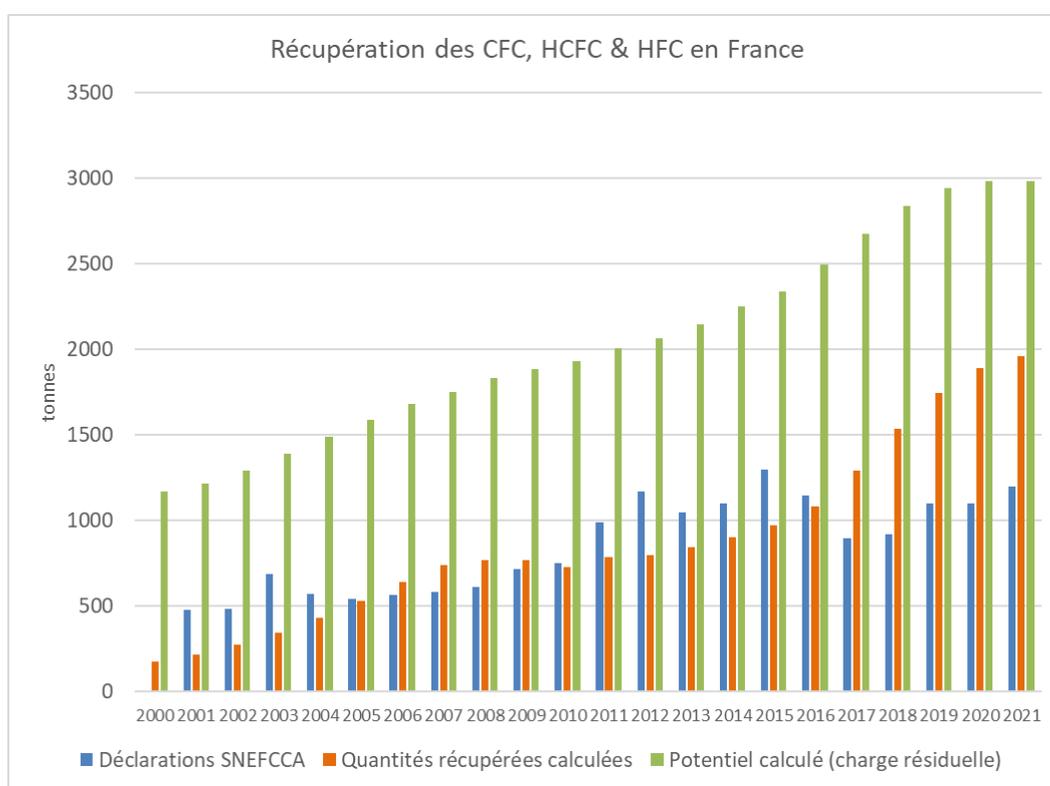


Figure 27 - Comparaison des données sur la récupération en France métropole

La comparaison fait apparaître un écart très significatif à partir de 2017 entre les données déclarées et les quantités récupérées 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 hausse des prix observée sur les HFC à fort PRG à la suite de la mise en place du phasedown.

III. Secteur 1 - Les applications domestiques

1. Introduction

Applications prises en compte

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.

Tous les types de réfrigérateurs sont pris en compte : table-top, simple porte, combiné, double porte, américain. Tous les types de congélateurs sont pris en compte : armoire, coffre, « table-top ». Depuis le début des années 2010, une nouvelle technologie fait appel à une pompe à chaleur afin de sécher les vêtements, les sèche linges thermodynamiques sont inclus dans les équipements domestiques utilisateurs de fluides frigorigènes. Enfin, les caves à vin, apparues dans les années 1970, sont également prises en compte : caves de vieillissement, caves de mise en température, caves combinées ou multi-températures.

Modes de charge

Les équipements domestiques sont tous chargés en usine (lieux de production).

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) publie chaque année les statistiques de marchés pour certains appareils domestiques, dont les réfrigérateurs et les congélateurs [Ref 7]. Une répartition des modèles de réfrigérateurs et congélateurs (en termes

de volume moyen) sur le parc français est disponible pour certaines années [Ref 8]. Ainsi, les ventes annuelles en France sont connues avec une bonne précision.

Caves à vin

Le marché des caves à vin a démarré dans les années 2000 et a été reconstitué à partir de données de diverses sources (publications dans la presse notamment). Les marchés sont publiés désormais par le Gifam [Ref 7]. Un seul producteur est référencé en France, Eurocave.

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 9] et des données récentes du Gifam [Ref 8] qui fournit les ventes de sèche-linges en France ainsi que la segmentation par produit.

Tableau 12 - Marchés d'équipements du secteur de froid domestique

Marchés (nombre d'unités)	Réfrigérateurs	Congélateurs	Caves à vin	Sèche-linges thermodynamiques
2021	2 797 000	947 945	210 210	317 158
Estimation 2022			174 000	

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.

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 charge moyenne 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. Le volume de production en France en 2013 a été utilisé et provient d'une revue spécialisée [Ref 10]. Les volumes de productions des années antérieures et postérieures ont été estimées en suivant les tendances d'un taux d'augmentation annuel de 8 %.

Tableau 13 - Estimation des productions d'équipements du secteur de froid domestique

Productions (nombre d'unités)	Réfrigérateurs	Congélateurs	Caves à vin	Sèche-linges thermodynamiques
2021	0	0	45 200	0

2.1.2 Charge nominale

Tableau 14 - Hypothèses de charges nominales des équipements de froid domestiques en 2021

2021	Ratio de charge	Volume moyen (l)
Réfrigérateur	230 g/l (R-600a)	244
Congélateur	300 g/l (R-600a)	202
Sèche linge thermodynamique	325g / appareil	-
Cave à vin	65g / appareil	-

Réfrigérateur et congélateur

Une évolution des ratios de charge est prise en compte au cours du temps selon le type de fluide frigorigène. La charge pour un même équipement est environ deux fois moins élevée si l'équipement utilise du R-600a plutôt que du R-12 ou du R-134a.

La charge est ensuite calculée en fonction du ratio de charge par fluide et d'un volume moyen basé sur les meilleures ventes d'équipements.

Sèche-linge pompe à chaleur

La quantité de R-134a contenue dans un appareil dépend des classes énergétiques. Selon une communication d'un fabricant, elle est de 280g pour les bases A+ et 370g pour les bases A++ [Ref 9]. Une moyenne de 325 g/appareil est considérée dans l'inventaire. Ce niveau de charge moyenne 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 contenue dans les caves à vin varie en fonction de la gamme, entre 30 g et 100 g [Ref 11]. Une valeur moyenne de 65 g/appareil considérée dans l'inventaire. Ce niveau de moyenne est également cohérent 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 a 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 des années 1995, le R-134a et le R-600a (isobutane). L'évolution des fluides frigorigènes utilisés au cours du temps sur le marché français est basée sur des enquêtes de terrains régulières [Ref 8] et les tendances données par le rapport RTOC de l'UNEP. Depuis 2015, l'intégralité des équipements produits et mis sur le marché utilisent du R-600a (Figure 28).

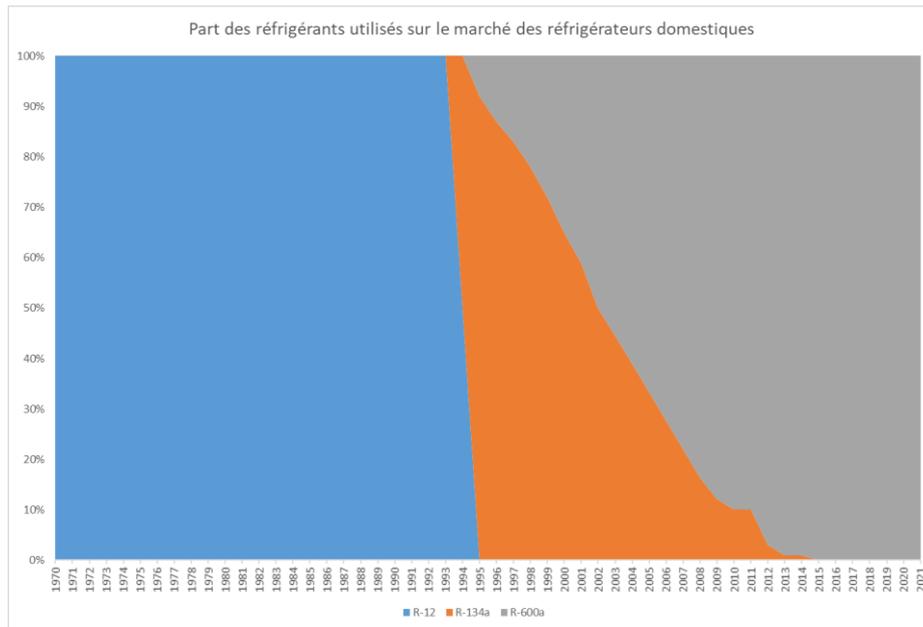


Figure 28 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés sur le marché des réfrigérateurs domestiques

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 12] 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

L'étude de catalogues de vente et une étude de terrain en 2019 ont permis d'établir l'évolution des fluides frigorigènes utilisés sur ce sous-secteur [Ref 12] : le R-600a est 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.

2.2 Facteurs d'émissions

2.2.1 A la charge

Les facteurs d'émissions sont estimés sur la base des déclarations des producteurs ou, sans information plus précise, selon la valeur moyenne donnée par les lignes directrices du GIEC. Une tendance à la réduction a été prise au cours du temps afin de traduire l'amélioration des pratiques. Ils ont peu d'impact sur le calcul des émissions de ce secteur pour lequel la production en France est désormais très faible.

Les facteurs d'émissions à la charge pris en compte pour l'année 2021 sont présentés au Tableau 15.

Tableau 15 - Facteur d'émission à la charge des équipements de froid domestique

2021	Réfrigérateurs	Congélateurs	Caves à vin	Sèche-linges pompes à chaleur
Facteur d'émission à la charge	-	-	0,6 %	-

Réfrigérateur et congélateur

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 à partir de 2010 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 13].

Sèche-linge pompe à chaleur

Un facteur d'émission spécifique 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 13], soit 0,6 %.

2.2.2 Fugitif

Les appareils de froid domestique sont étanches, le circuit frigorifique étant entièrement soudé et il n'existe que très peu d'opérations de maintenance sur ce type d'appareil, en France. 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. Il est proposé d'assimiler ce taux d'émissions 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 8]. 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 16 - facteur d'émission fugitif des équipements de froid domestique

En 2021	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 lors du démantèlement des appareils. Les quantités annuelles de CFC, HCFC, HFC et HC extraites en première phase de dépollution des appareils de froid domestique sont communiquées chaque année par l'ADEME dans les rapports DEEE [Ref 14]. Un taux de récupération peut ainsi être estimé en comparant les quantités récupérées et les quantités de réfrigérants contenues dans les appareils 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.

Tableau 17 - Facteur d'émission de fin de vie des équipements de froid domestique

En 2021	Appareils domestiques
Facteur d'émission de fin de vie	44 %

3. Résultats Froid domestique

3.1 Banque

Le parc des appareils de froid domestique s'est renouvelé 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 décru (Figure 29) 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 3 700 t en 2021, composée à de 71 % de R-600a (Tableau 18).

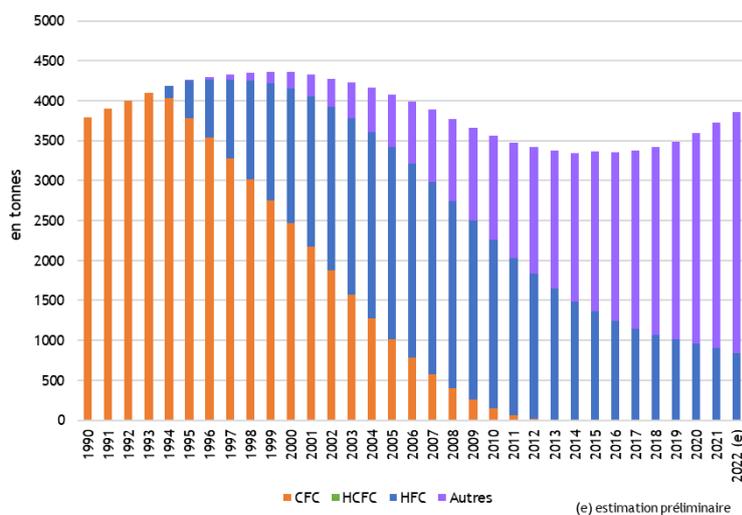


Tableau 18 : Banque de fluide 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	824
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	80
Total HFC	905
R-290	161
R-600a	2 658
Total Autres	2 818
Total général	3 723

Figure 29 : Banque de fluide dans le secteur du froid domestique

3.2 Demande

La demande pour les applications de froid domestique est liée à la production des équipements en France, 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. Depuis 2019, il ne s'agit que de la production, assez faible, des caves à vin au R-600a.

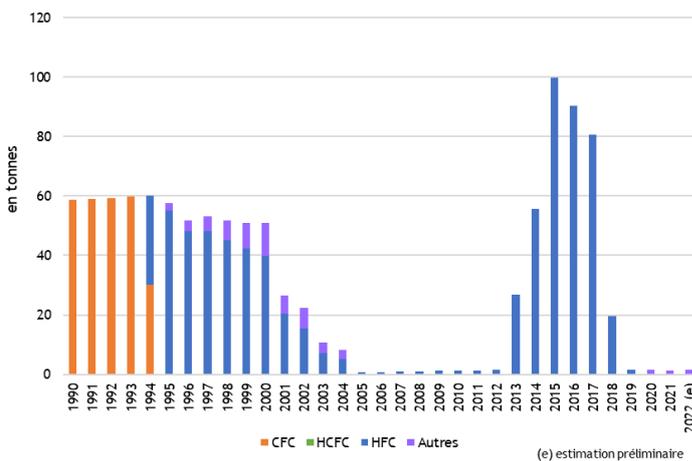


Tableau 19 : Production 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-600a	1,4
Total Autres	1,4
Total général	1,4

Figure 30 : Demande en fluides frigorigènes pour la production dans le secteur du froid domestique

3.3 Emissions

3.3.1 Emissions totales

En 2021, les émissions totales du froid domestique sont en leur quasi-totalité constituées des émissions de fin de vie des équipements, les systèmes étant hermétiques. Elles sont assez faibles, de l'ordre de 105 tonnes en 2021, étant donnée l'efficacité croissante de la filière DEEE. La part des HFC ne représente plus que 48%.

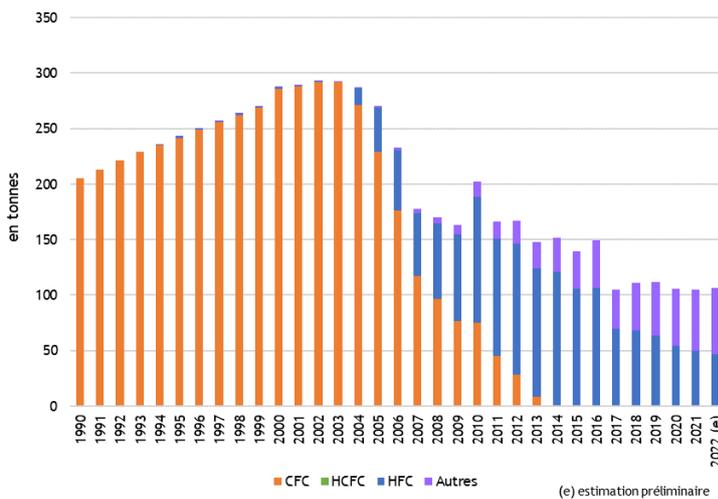


Tableau 20 : Emissions totales 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	50
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	0,01
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	-
Total HFC	50
R-290	0,02
R-600a	55
Total Autres	56
Total général	105

Figure 31 : Emissions totales du froid domestique

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 65 000 tonnes de CO₂ en 2021 et sont amenées à décroître encore, les équipements parvenant en fin de vie contenant désormais principalement du R-600a (Figure 32).

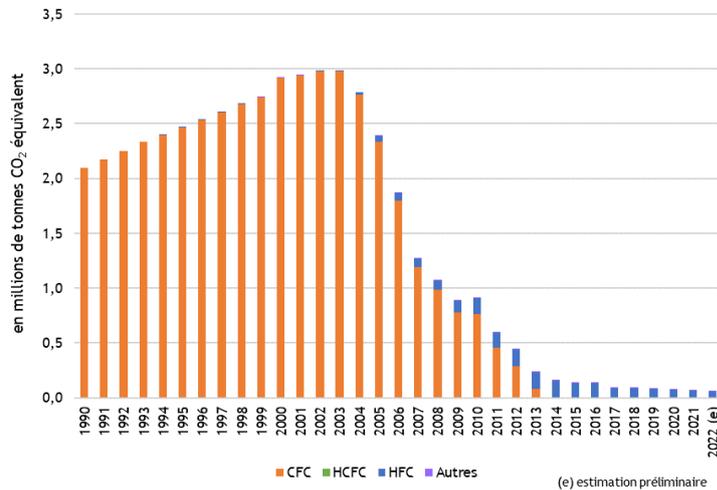


Figure 32 : Emissions CO₂ équivalentes du froid domestique (millions de tonnes)

Tableau 21 : Emissions CO₂eq. 2021

Fluide frigorigène	2021 (en ktCO ₂ e)
R-134a	65
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	0,004
Total HFC	65
R-290	0,00005
R-600a	0,2
Total Autres	0,2
Total général	65

IV. Secteur du froid commercial

1. Introduction

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

- Les installations frigorifiques des hypermarchés (surface de vente égale ou supérieure à 2 500 m²) ;
- Les installations des supermarchés (surface de vente comprise entre 400 m² à 2 500 m²) ;
- Les équipements frigorifiques des petits commerces utilisant des groupes de condensation (chambre froide, par exemple).
- Les équipements utilisant des groupes hermétiques (armoire réfrigérée par exemple) 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 réalisé à partir de la description du parc de magasins en termes de nombre de magasins et surfaces de vente. Les quantités de fluides frigorigènes nécessaires aux nouvelles surfaces de vente (incluant un renouvellement des installations tous les 15 ans) sont estimées à partir de ratios de charge surfacique (kg/m²), ceux-ci sont basés sur des enquêtes de terrain et une tendance décroissante liée à l'introduction des systèmes indirects et cascades est prise en compte.

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.

Pour l'inventaire 2021, des échanges avec le SYNEG [Ref 51] ont permis d'identifier la part des cuisines professionnelles qui étaient prises en compte dans l'inventaire. Environ 50 %, correspondant aux équipements des restaurants, sont bien pris en compte. En revanche, les équipements des collectivités locales ne sont pas comptabilisés. Un complément d'enquête est nécessaire afin d'évaluer la charge moyenne de ce type d'équipements et de pouvoir le prendre en compte de façon plus précise dans le calcul.

Tableau 22 - 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 300 kg, il est pris en compte au moins une opération de maintenance annuelle pour les supermarchés et les hypermarchés. Pour les petits commerces, on considère que la maintenance intervient lorsque la quantité réelle de réfrigérant passe en deçà d'un certain de 70% de charge (Tableau 23). Il n'est pas considéré de maintenance pour les équipements utilisant des groupes hermétiques. Dans le modèle de calcul, il est considéré que lors de la maintenance, ces équipements sont rechargés d'un complément de charge égal aux quantités perdues par émissions fugitives depuis l'installation ou la dernière opération de maintenance.

Tableau 23 - 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

Pour tous les équipements du froid commercial, il est considéré une durée de vie moyenne de 15 ans, hypothèse basée sur les rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 8] et les lignes directrices de 2006 du GIEC [Ref 13]. Le marché d'équipements est ainsi estimé en fonction de l'évolution du parc et du renouvellement des équipements dans les magasins existants. Une courbe de durée de vie est associée aux durées de vie moyenne afin de prendre en compte une variation sur le parc d'installations.

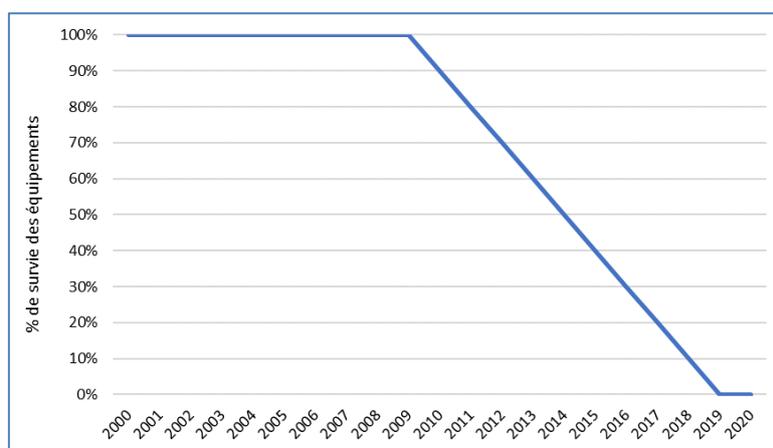


Figure 33 - courbe de durée de vie des équipements du froid commercial

2. Données et hypothèses

2.1 Données d'activités

2.1.1 Marchés et productions

MARCHES

Les marchés d'équipements sont estimés à partir de l'évolution du parc et d'une hypothèse de renouvellement des équipements tous les 15 ans.

Hypermarchés et Supermarchés

L'évolution du parc de magasins a été reconstituée, pour les supermarchés comme les hypermarchés, depuis 1970 à partir de plusieurs sources de données ([Ref 8], [Ref 15], [Ref 16], [Ref 17], [Ref 18], [Ref 19], [Ref 20] [Ref 21], [Ref 22]). Les années manquantes pour lesquelles les informations sont indisponibles, sont estimées par interpolation. Sur les années récentes, les données sur le parc de magasins sont communiquées par LSA ([Ref 21]).

Dans le cas des supermarchés et hypermarchés sont évaluées les nouvelles surfaces de ventes car la charge moyenne est ensuite évaluée à partir d'un ratio de charge surfacique. A ces nouvelles surfaces sont ajoutés les renouvellements.

Groupes de condensation et Groupes hermétiques des petits commerces

L'évolution du parc de petits commerces, de supérettes, de magasins drive et de distributeurs automatiques a été reconstituée à partir de différentes sources, notamment les rapports des Mines [Ref 8], de la base de données de l'ACOSS [Ref 20] et des bases de données de l'INSEE ([Ref 16], [Ref 17], [Ref 18], [Ref 19]).

Dans le cas des petits commerces est évalué le nombre de nouveaux magasins, incluant le renouvellement des installations. Une charge moyenne établie en fonction d'un équipement type par catégorie de magasin y est ensuite associée.

Tableau 24 - Parcs de magasins

2021	Parcs de magasins
Hypermarchés	2 264
Supermarchés	5 781
Petits commerces	285 000

PRODUCTIONS

Seul le sous-secteur des groupes hermétiques, chargés d'usine, est concerné par cette hypothèse. Faute de données, il est supposé que la production des groupes hermétiques sur le territoire national est équivalente au marché.

2.1.2 Charge nominale

Pour les hypermarchés et supermarchés, la charge de fluide est calculée en fonction d'un ratio 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 8]. La courbe a été lissée, sur l'historique, en utilisant un modèle de courbe en S.

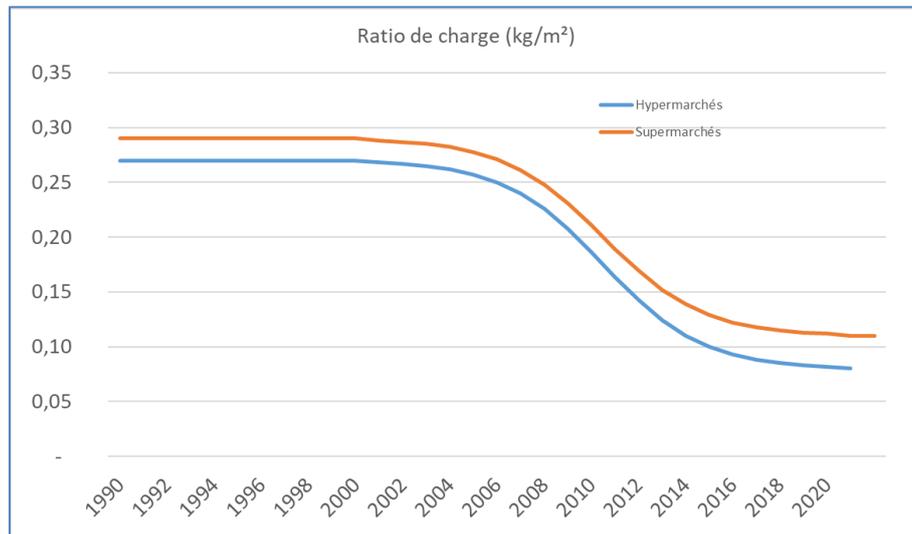


Figure 34 : Ratios de charge surfacique en supermarchés et hypermarchés

Tableau 25 - 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 26 - 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 de différentes sources, notamment des données issues des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 8] et du rapport RTOC de 1998 [Ref 24], tout en prenant en compte l'évolution de la réglementation européenne ((EU) 517/2014).

Hypermarchés

L'évolution des fluides frigorigènes utilisés dans les hypermarchés est présentée Figure 35. Depuis 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 ont été introduits sur le marché, à plus bas PRG. La part du R-404A diminue progressivement et est supposée nulle en 2020 au profit d'autres fluides : le R-744 principalement ainsi que le R-134a, R-448A, R-449A, R-450A et R-454C dans des proportions variables à partir de 2017.

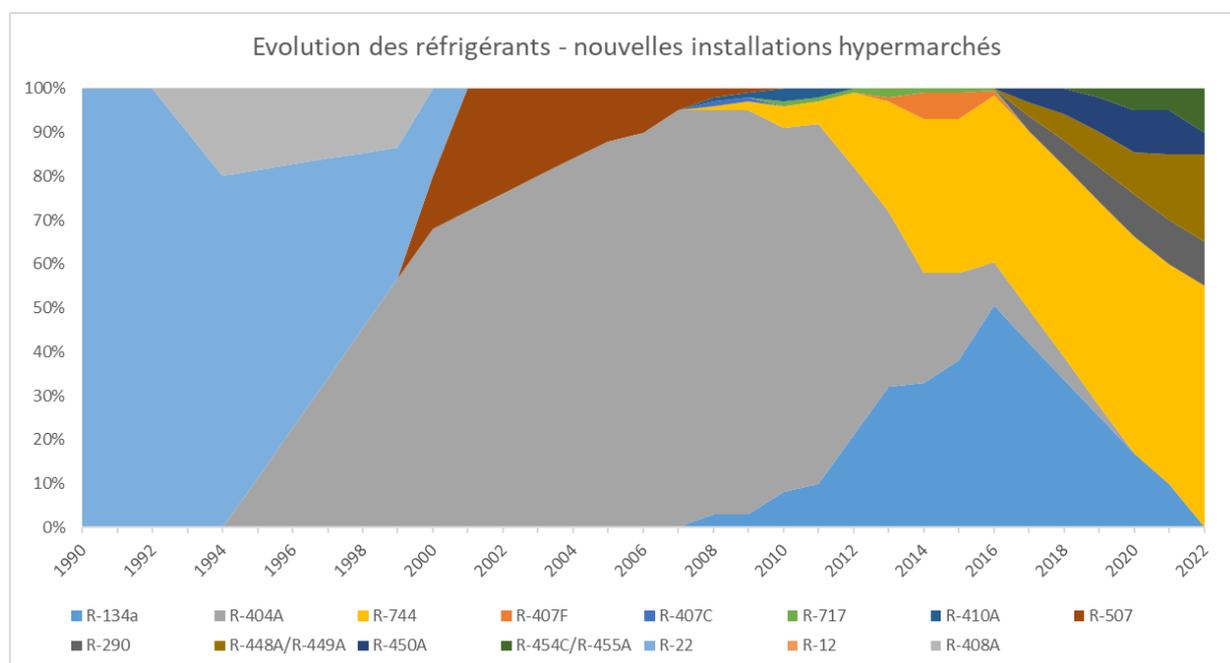


Figure 35 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les nouvelles installations des hypermarchés

A partir de 2016, les hypothèses de calcul tiennent compte des retrofits d'une partie du parc d'installations au R-404A vers des installations au R-407A, R-407F puis R-448A et R-449A (20% en 2021).

Supermarchés

L'utilisation du R-404A a été dominante dans les supermarchés jusqu'en 2010. De même que pour les hypermarchés, du fait des systèmes cascade et indirects, le R-134a a été progressivement introduit dans les années 2010 et la part du R-404A a diminué. Depuis 2015, la 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, le R-407F, le R-448A/449A mais aussi le R-744 est prise en compte (Figure 36).

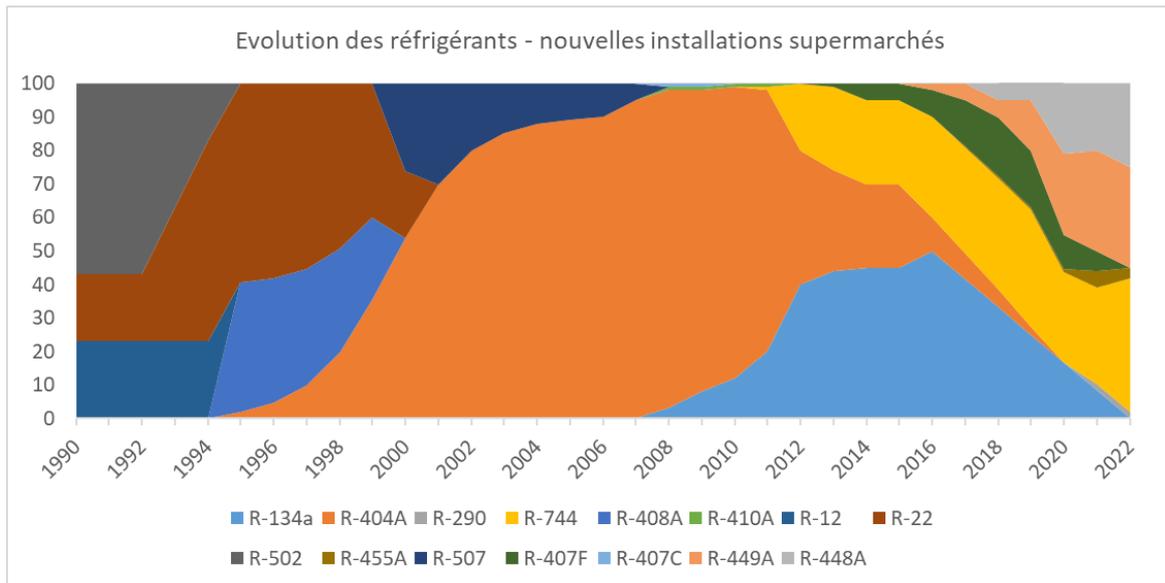


Figure 36 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés en supermarchés

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. En 2021, il est considéré que 20% de la banque de R-404A est rétrofitée vers du R-448A/449A.

Groupes de condensation

Depuis 2000 les équipements des petits commerces équipés de groupes de condensation utilisent majoritairement du R-404A. Depuis 2015, d’autres fluides frigorigènes à plus bas PRG ont été progressivement utilisés (R-744, R-407A, R-448&449A, R-450A et le R-454C).

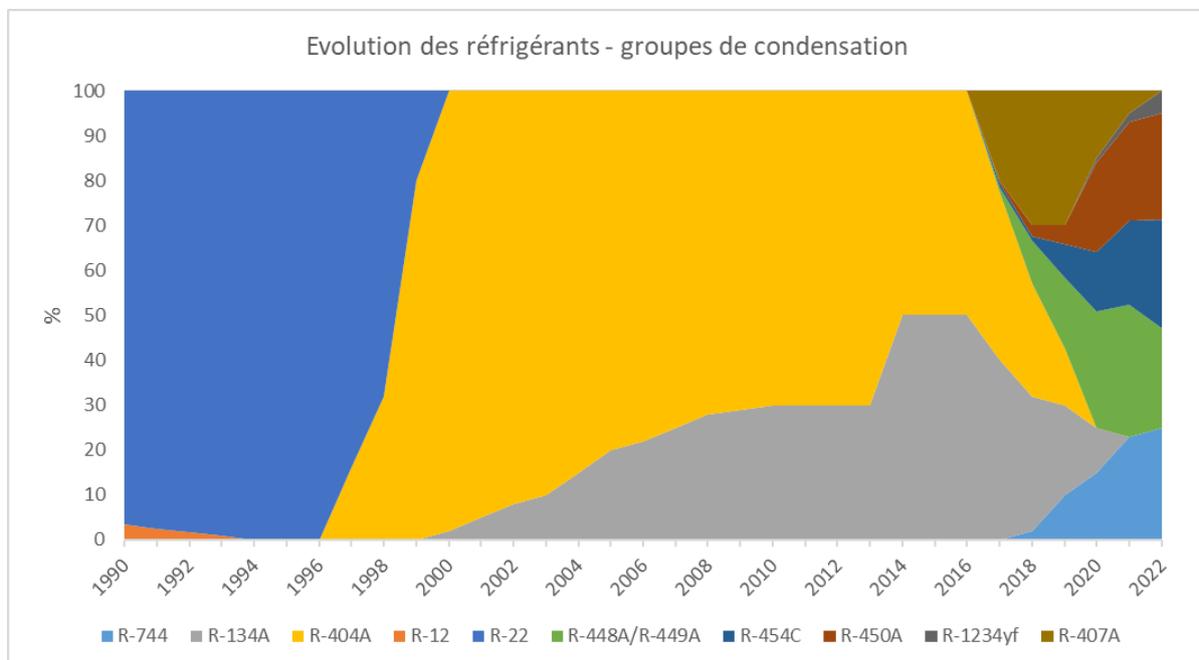


Figure 37 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les petits commerces (groupes de condensation)

Groupes hermétiques

Jusqu'en 2010, le R-134a est le seul fluide frigorigène utilisé dans ces groupes frigorifiques. Depuis, les hydrocarbures et le CO2 (R-290, R-600a, R-744) ont été progressivement introduits.

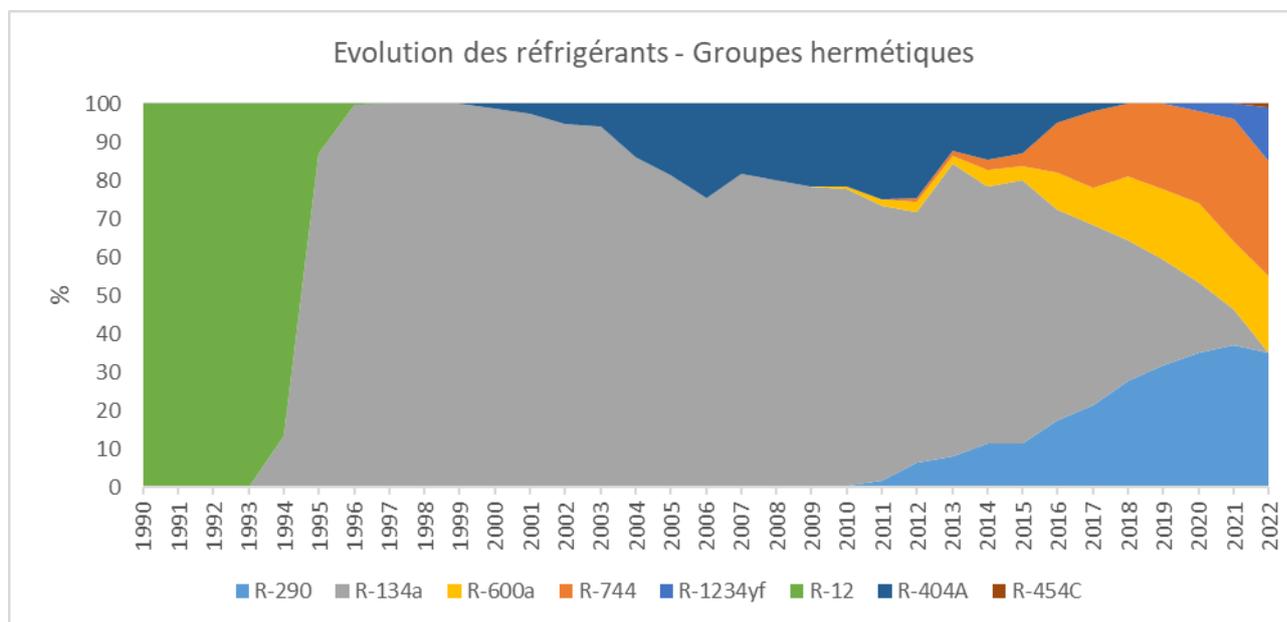


Figure 38 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les petits commerces (groupes hermétiques)

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.

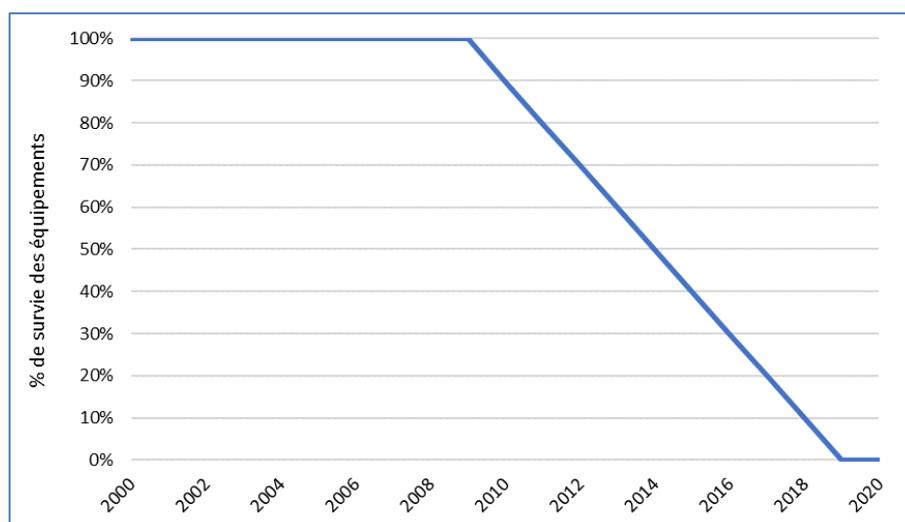


Figure 39 : Courbe de durée de vie pour le froid commercial

2.2 Facteurs d'émissions

2.2.1 A la charge

Les facteurs d'émissions utilisés sont issus des Lignes directrices du GIEC ([Ref 25],[Ref 13]) et dépendent du mode de chargement des équipements (d'usine, sur site).

Tableau 27 - hypothèses de facteurs d'émission à la charge des équipements de froid commercial

Sous-secteur	Taux d'émission à la charge en 1990	Taux d'émission à la charge en 2021
Hypermarchés	4,5 %	2 %
Supermarchés	4,5 %	2 %
Groupes de condensation	4,5 %	2 %
Groupes hermétiques	3,0 %	2 %

2.2.2 Fugitif

Les courbes d'évolution des facteurs d'émissions fugitifs, au cours de la vie des équipements, pour l'ensemble des sous-secteurs du froid commercial, prennent en compte l'amélioration des pratiques. Les courbes sont basées sur des données issues 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 représentent une tendance moyenne sur l'ensemble du parc de magasins, elles incluent les pertes accidentelles.

Tableau 28 - Hypothèses de facteurs d'émission fugitifs - secteur du froid commercial

Sous-secteur	Taux d'émission fugitif 1990	Taux d'émission fugitif 2021
Hypermarchés	35 %	25 %
Supermarchés	30 %	19 %
Groupes de condensation	15 %	13 %
Groupes hermétiques	1 %	1 %

Hypermarchés et supermarchés

L'évolution des taux d'émission en super et hypermarchés est basée sur les résultats d'enquêtes régulières et de contrôles réalisés par le ministère de l'Environnement sur les quantités annuelles consommées pour la maintenance des installations. Celles-ci sont assimilées aux pertes annuelles par émissions fugitives. Une courbe de tendance a été établie sur ces données en prenant en compte également l'amélioration des pratiques de maintenance, le renforcement des contrôles d'étanchéité, la généralisation progressive de système de détections de fuites, et, plus récemment, une incitation à la récupération du fait de la pénurie de certains HFC et de l'augmentation des prix.

Groupes de condensation

Pour les années antérieures à 2017, un taux d'émission fugitif constant de 15 % a été pris en compte [Ref 1]. Au-delà, afin de traduire l'amélioration des pratiques, 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 40. 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.

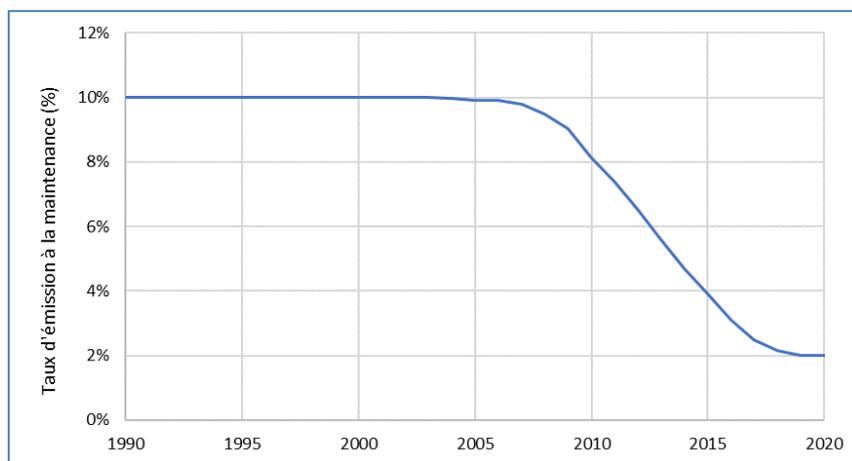


Figure 40 : Taux d'émission à la maintenance - Froid commercial

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 charge réelle de l'équipement, à laquelle est appliquée ce facteur d'émission, est calculée au cours de sa durée de vie en tenant compte des occurrences de maintenance, ce qui permet de ne pas surestimer les émissions de fin de vie, la charge de fin de vie tenant compte des émissions fugitives des années précédentes.

L'évolution de ces facteurs est supposée suivre un modèle de courbe en S (Figure 41).

Pour 2021, les taux d'émissions de fin de vie présentés au tableau suivant sont pris en compte.

Tableau 29 - Hypothèses de facteurs d’émission fin de vie - secteur du froid commercial

Sous-secteur	Taux d’émission fugitif 1990	Taux d’émission fugitif 2021
Hypermarchés	100 %	5 %
Supermarchés	100 %	5 %
Groupes de condensation	100 %	49 %
Groupes hermétiques	100 %	70 %

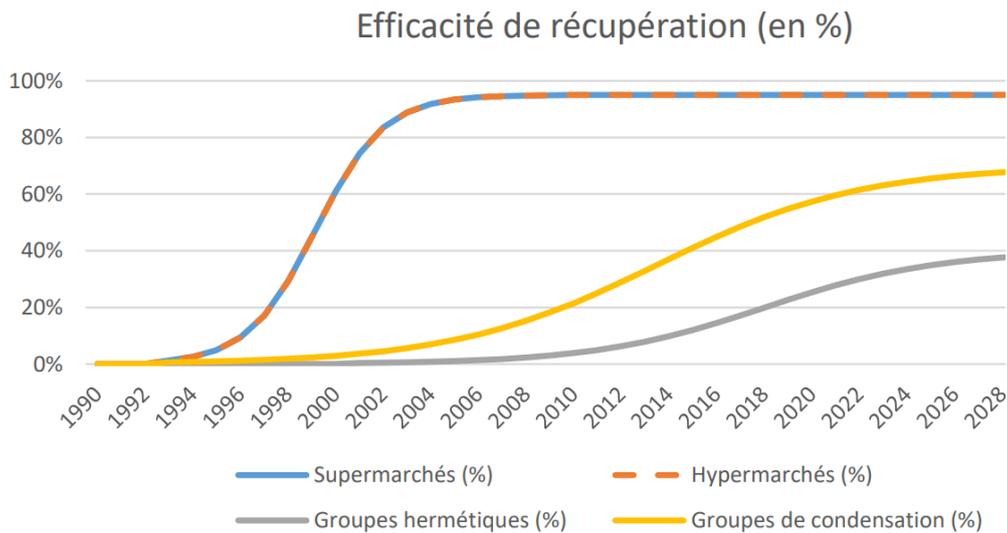


Figure 41 : Efficacité de récupération en fin de vie des équipements dans le secteur du froid commercial

3. Résultats

3.1 Banque

La banque de froid commercial est évaluée à 5 200 t en 2021. La banque des fluides non fluorés représente désormais 15%, en croissance de 18% par rapport à 2020. La banque est en diminution régulière du fait d'une relative stabilité du parc de magasins et d'une tendance à la réduction des charges des installations.

En 2021, la banque de R-404A est fortement réduite du fait de la période de retrofits (réduction de 30 % par rapport à 2020) mais représente encore 26% de la banque du froid commercial (Tableau 30).

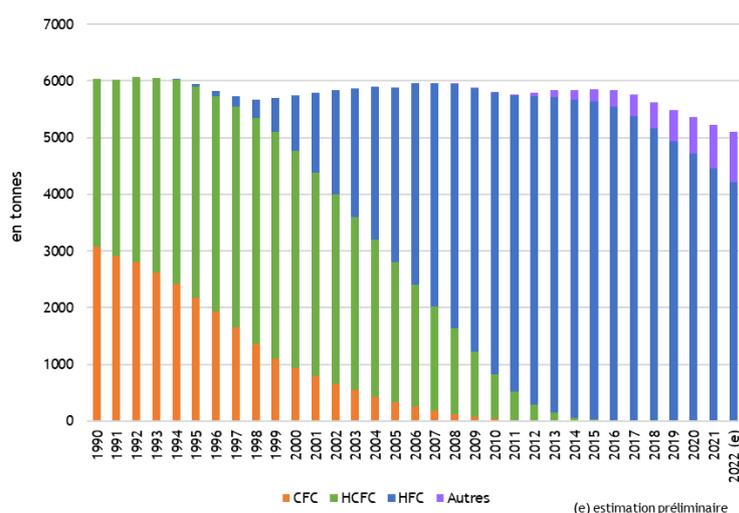


Figure 42 : Banque de fluide dans le secteur du froid commercial

Tableau 30 : Banque 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	1 411
R-404A - R507 (PRG~3950)	1 371
R-407A	376
R-407C	3,0
R-407F	242
R-410A	9,1
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	55
R-448A - R-449A (PRG~1300)	881
R-454C - R-455A (PRG~150)	76
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	26
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	10
Total HFC	4 459
R-290	95
R-600a	36
R-717	8,0
R-744	631
Total Autres	771
Total général	5 230

3.2 Demande

3.2.1 Besoin pour les nouvelles installations

On distingue ici les besoins pour la production des groupes hermétiques chargés sur site, très faible, du besoin pour la mise en service des installations chargées sur site.

- En 2021, 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 31). Ces chiffres sont à prendre avec précaution, les données de production étant marquées d'une forte incertitude.
- Les quantités nécessaires à la charge sur site des nouveaux équipements de froid commercial sont en baisse régulière depuis 2011 (Figure 44) du fait de la tendance à la réduction des charges induite par l'augmentation du nombre d'installations indirectes ou cascade. En 2021, ce besoin représente environ 1500 tonnes dont 80 % est constitué de HFCs et 20% de fluides non fluorés.

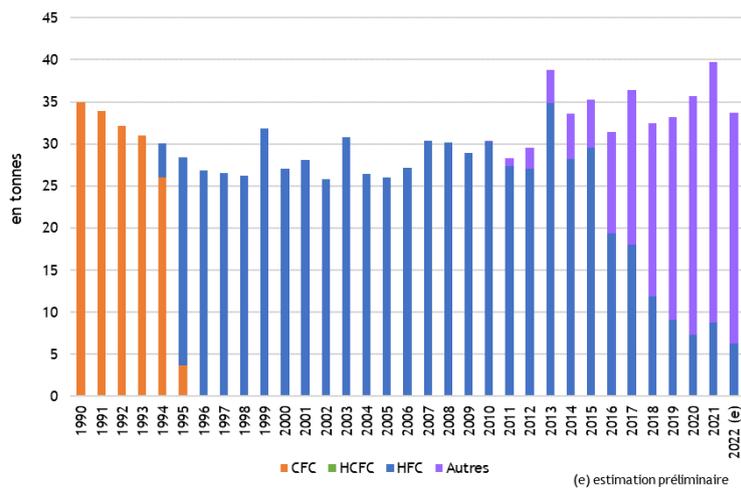


Figure 43 : Quantités requises pour la production d'équipements en France dans le secteur du froid commercial

Tableau 31 : Production 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	3,5
R-454C - R-455A (PRG~150)	1,2
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	3,9
Total HFC	8,7
R-290	14
R-600a	7,9
R-744	9,4
Total Autres	31
Total général	40

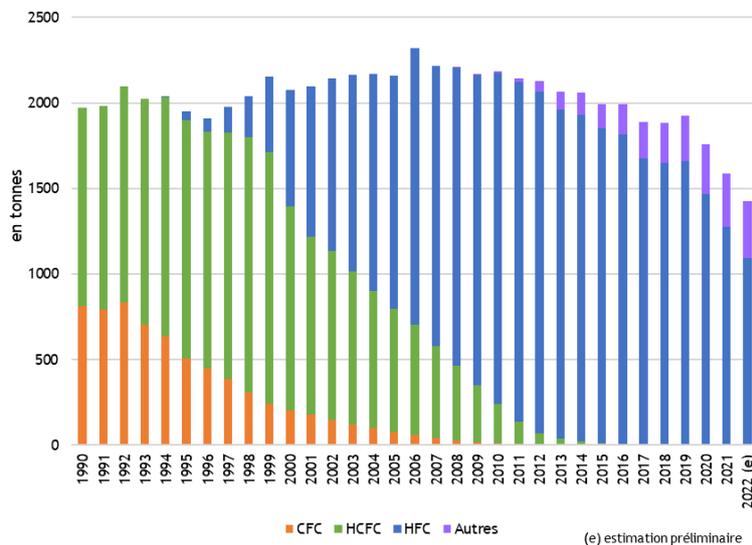


Figure 44 : Besoin en fluides frigorigènes pour la charge sur site des équipements neufs pour le secteur du froid commercial

Tableau 32 : Charges 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	239
R-404A - R507 (PRG~3950)	235
R-407A	94
R-407C	1,0
R-407F	75
R-410A	3,0
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	13
R-448A - R-449A (PRG~1300)	541
R-454C - R-455A (PRG~150)	46
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	17
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	8,4
Total HFC	1 273
R-290	34
R-600a	9,0
R-717	1,0
R-744	272
Total Autres	316
Total général	1 588

3.2.2 Besoin pour la maintenance

Le besoin pour la maintenance des installations est estimé à moins 900 tonnes en 2021. Ce besoin est inférieur de 30 % au niveau de 2016. Depuis 2016-2017, on observe une baisse significative 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, de la généralisation de systèmes de détection de fuites mais aussi du fait du contexte de pénurie et augmentation des prix des HFC à fort PRG qui a incité à une meilleure récupération.

La répartition du besoin pour la maintenance est à l'image de la banque : les parts du R-404A et du R-134a restent prépondérantes, suivies désormais par le R-744.

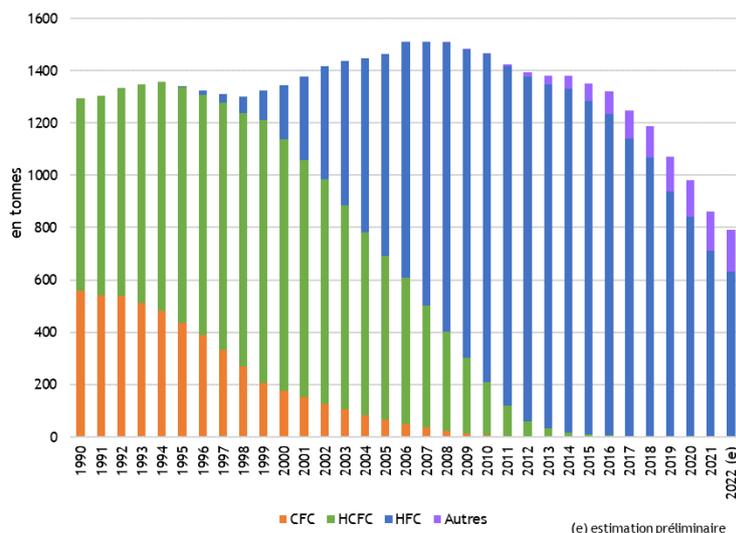


Figure 45 : Besoin en fluides frigorigènes pour la maintenance du parc d'installations dans le secteur du froid commercial

Tableau 33 : Quantités pour la maintenance 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	194
R-404A - R507 (PRG~3950)	204
R-407A	73
R-407C	0,8
R-407F	63
R-410A	2,6
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	12
R-448A - R-449A (PRG~1300)	151
R-454C - R-455A (PRG~150)	3,1
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	8,1
Total HFC	711
R-290	8,3
R-717	0,9
R-744	141
Total Autres	150
Total général	861

3.2.3 Besoin pour le retrofit

Ces dernières années, les fluides principalement utilisés pour le retrofit R-404A dans les hypermarchés et supermarchés, sont le R-407F, R-448A, et R-449A. En 2021, ce besoin est estimé à 200 tonnes, essentiellement de R-448A et R-449A.

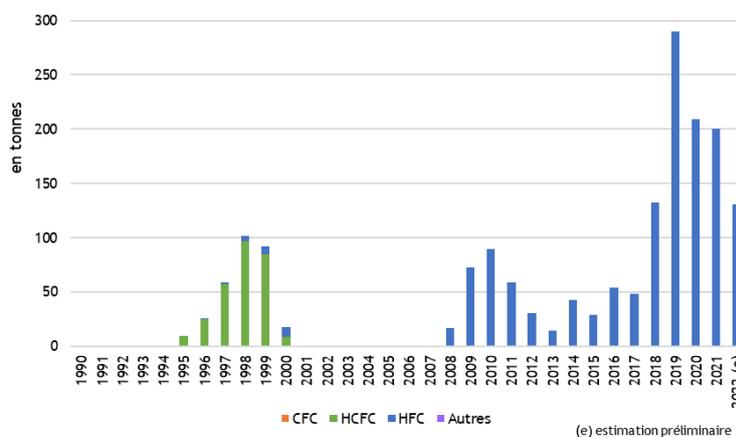


Figure 46 : Besoin en fluides frigorigènes pour le retrofit d'installations dans le secteur du froid commercial

Tableau 34 : Quantités pour le retrofit 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-448A - R-449A (PRG~1300)	200
Total HFC	200
Total général	200

3.3 Emissions

3.3.1 Emissions totales

En 2021, les émissions totales de l'ensemble du secteur du froid commercial sont estimées à environ 1 100 tonnes de fluides frigorigènes (Tableau 35). On constate une diminution des émissions du secteur depuis les années 2010 (Figure 47) 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 (Erreur ! Source du renvoi introuvable., Figure 40, Figure 41), notamment sur ces dernières années.

Les émissions 2021 sont dominées à plus de 80 % par les installations aux fortes charges des supermarchés et hypermarchés et aux niveaux d'émissions encore élevés.

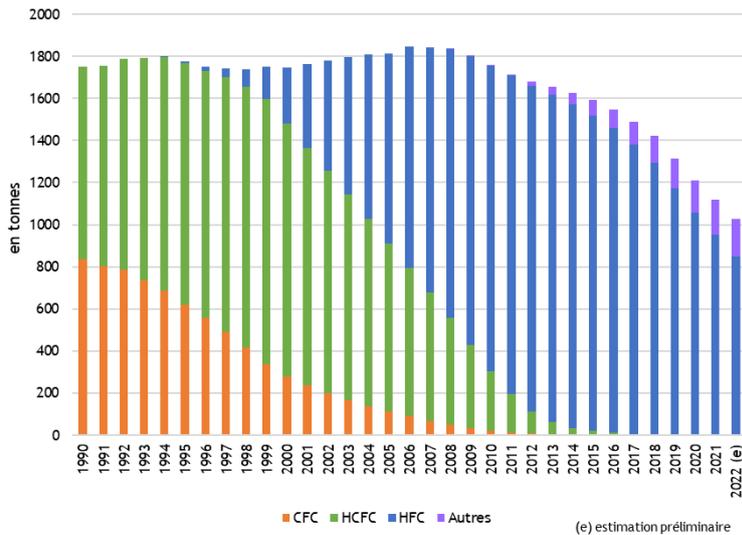


Figure 47 : Emissions totales du froid commercial

Tableau 35 : Emissions totales 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	265
R-404A - R507 (PRG~3950)	297
R-407A	84
R-407C	0,9
R-407F	63
R-410A	2,7
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	13
R-448A - R-449A (PRG~1300)	203
R-454C - R-455A (PRG~150)	13
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	8,3
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	0,9
Total HFC	951
R-290	9,7
R-600a	0,7
R-717	0,8
R-744	156
Total Autres	167
Total général	1 118

3.3.2 Emissions CO₂ équivalentes

Alors qu'elles culminaient à plus de 8,5 millions de tonnes de CO₂ en 1990, les émissions du froid commercial ne représentent plus que 2 millions de tonnes de CO₂ en 2021 et sont amenées à décroître encore avec la généralisation de l'utilisation de fluides à plus faibles PRG (Figure 48). Les émissions CO₂ équivalentes des HFC ont diminué de plus de 20 % entre 2020 et 2021 et de plus de 55 % en 5 ans.

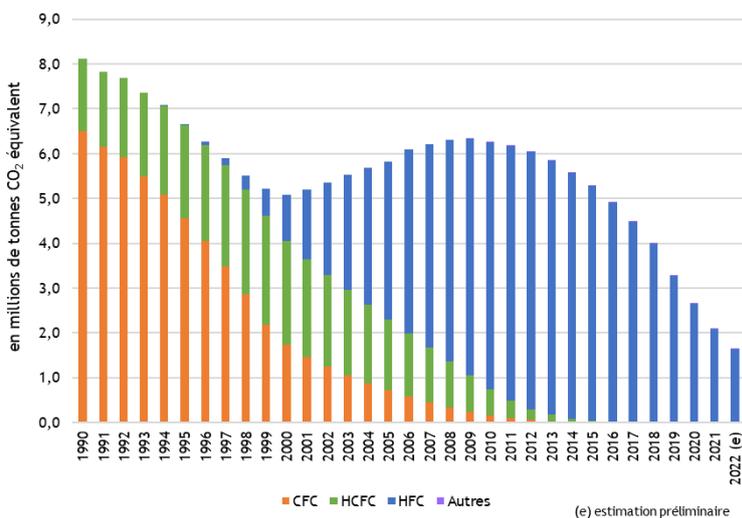


Figure 48 : Emissions CO₂ équivalentes du froid commercial (millions de tonnes)

Tableau 36 : Emissions CO₂eq. 2021

Fluide frigorigène	2021 (en ktCO ₂ e)
R-134a	345
R-404A - R507 (PRG~3950)	1 172
R-407A	162
R-407C	1,4
R-407F	106
R-410A	5,1
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	28
R-448A - R-449A (PRG~1300)	259
R-454C - R-455A (PRG~150)	1,9
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	4,5
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	0,001
Total HFC	2 085
R-290	0,03
R-600a	0,002
R-744	0,2
Total Autres	0,2
Total général	2 086

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 de l'équipement.

Tableau 37 - 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 8]. 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 & Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques

L'évolution des marchés de véhicules a été reconstituée à partir de différentes sources de données ([Ref 8], [Ref 27]) et d'hypothèses sur les taux de croissance du sous-secteur. L'association Carcoserco devenue la Fédération Française de carrosserie (FFC), en particulier, communique régulièrement au Citepa une estimation du marché national par catégorie de véhicule frigorifique.

Tableau 38 : Marchés des groupes frigorifiques pour le transport routier

Types	1990	2000	2010	2021
Véhicules utilitaires réfrigérés légers	2 700	3 300	4 300	6 500
Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	3 900	4 900	3 800	5 600

Reefers

La flotte maritime de navires réfrigérés est estimée au niveau mondial, seules des statistiques globales étant disponibles. Il est considéré qu'une part de 10 % peut être attribuée à la France [Ref 8], ce taux pourra être reconsidéré selon les données disponibles.

L'évolution des marchés a été reconstituée à partir des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 8] et des données disponibles sur le site MarineTraffic.

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 8] et du Container Handbook [Ref 28].

Le transport frigorifique par voie ferroviaire est peu développé en France [Ref 8]. 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 Cemafrroid pour les rapports d'inventaires antérieurs [Ref 8] et extrapolées sur 2017-2021.

Tableau 39 : Productions estimées des groupes frigorifiques pour le transport routier

Types	1990	2000	2010	2021
Véhicules utilitaires réfrigérés légers	1 526	2 690	5 570	5 400
Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	6 500	10 800	16 200	22 700

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

Tableau 40 : Flotte mondiale de navires réfrigérés et de conteneurs frigorifiques

Types	1990	2000	2010	2021
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

Pour le transport routier, les charges nominales sont estimées à partir des données issues d'enquêtes auprès des fabricants recensées dans les anciens rapports d'inventaires [Ref 8] et de communications du Petit Forestier [Ref 29]. Les charges des équipements du transport routier sont en baisse depuis 2007.

Tableau 41 - Evolution des niveaux de charge nominale des équipements frigorifiques du transport routier

Charge nominale (kg)	Avant 2006	2010	2015	2021
Véhicules utilitaires réfrigérés légers	2,50	2,20	2,19	2,02
Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	7,20	6,72	6,74	6,60

Pour le transport maritime, les charges sont issues des anciens rapports d'inventaires [Ref 8]. 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 42 - 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

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 8], incluant des communications de Carrier et du Cemafroid,
- d'échanges avec Petit Forestier [Ref 29],
- d'échanges avec l'European Partnership for Energy and the Environment (EPEE) [Ref 23].

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. 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.

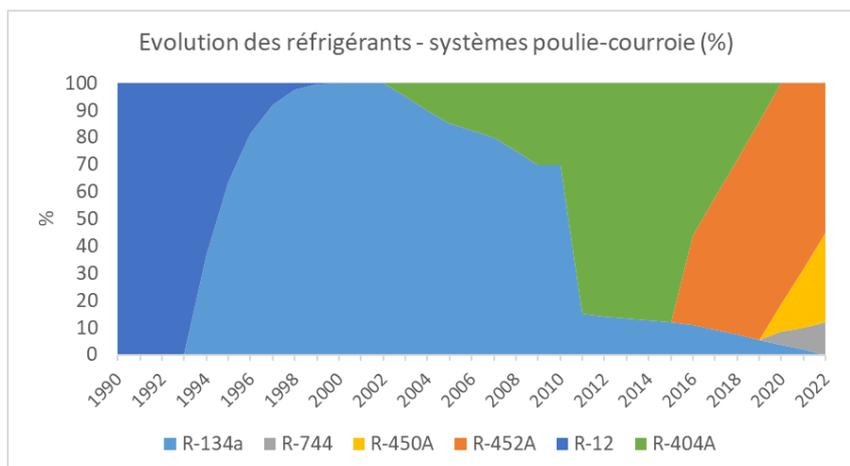


Figure 49 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les systèmes poulie courroie

Systemes 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 » ([Ref 24] , [Ref 8]). 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 2021. Depuis 2020, le R-450A et le R-744 ont également été introduits. La répartition des fluides utilisés a été estimée sur la base des mêmes références que pour les véhicules utilitaires légers.

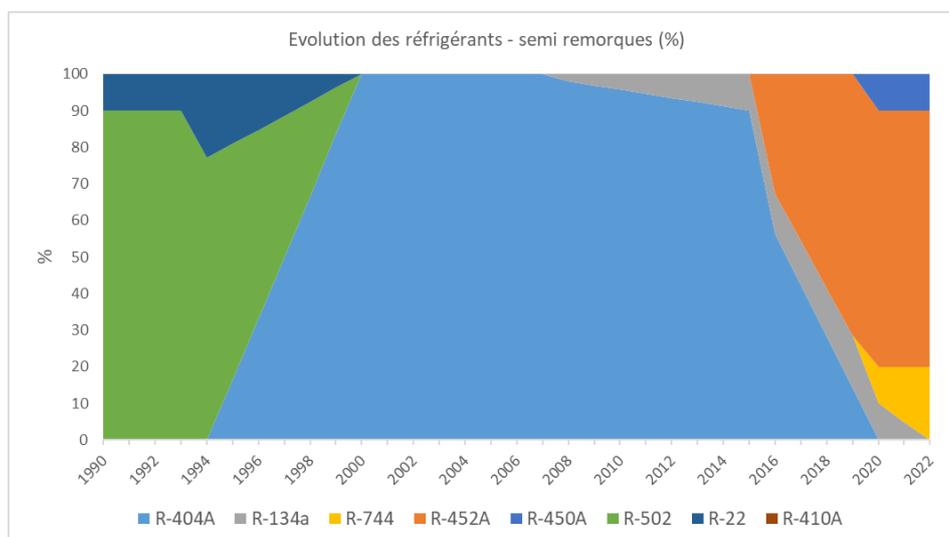


Figure 50 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les systèmes semi-remorques

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 [Ref 30]. 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 hypothèses 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 51. Jusqu'en 1993, on estime que l'ensemble des conteneurs frigorifiques sont chargés au R-12 [Ref 24]. Il laisse rapidement sa place au R-134a qui a été le réfrigérant le plus utilisé pour cette application. Plus récemment, de nouveaux fluides frigorigènes sont apparus en remplacement du R-134a : le R-513A, le R-513B, le R-456A et le R-744. Ces hypothèses se basent principalement sur les rapports RTOC.

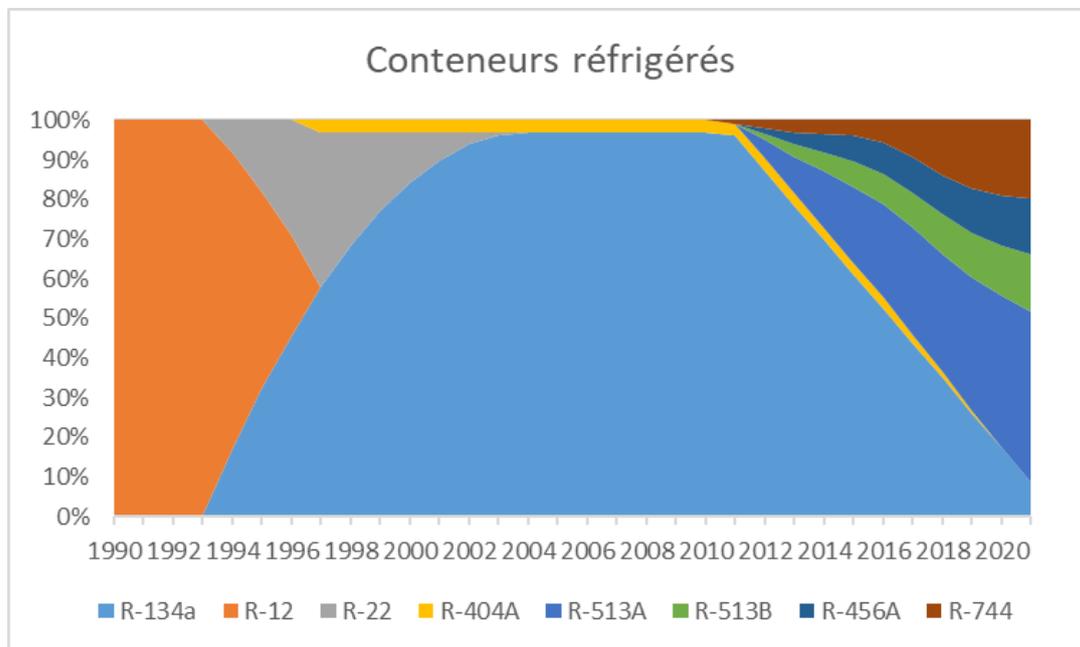


Figure 51 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les conteneurs frigorifiques (transport maritime)

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 durée de vies des équipements : 30 ans pour les reefers, 15 ans pour les conteneurs réfrigérés et 10 ans pour les véhicules routiers réfrigérés.

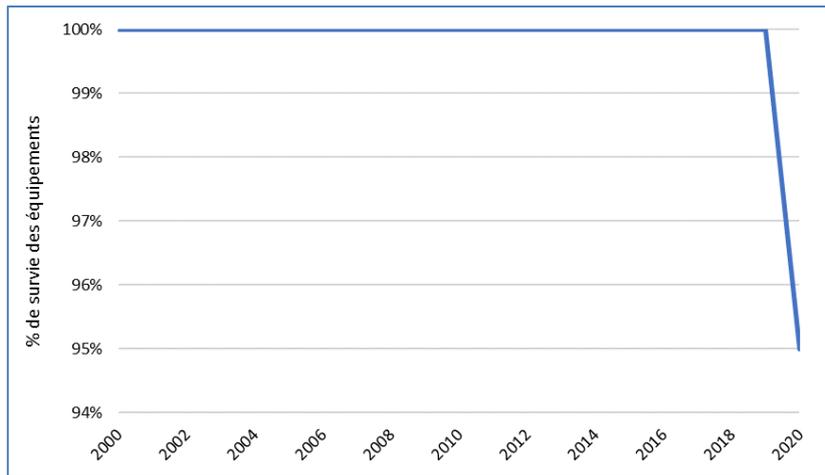


Figure 52 : Courbe de durée de vie pour les reefers

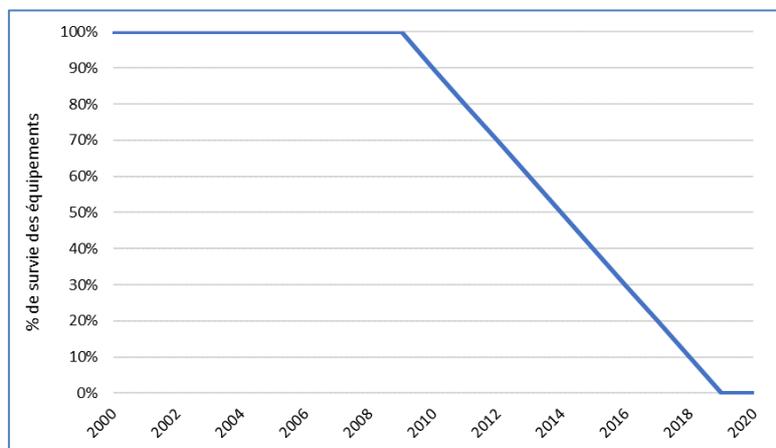


Figure 53 : Courbe de durée de vie pour les conteneurs frigorifiques

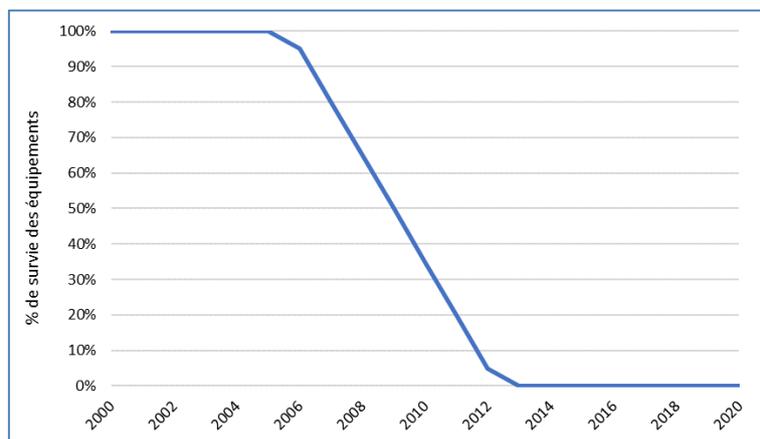


Figure 54 : Courbe de durée de vie pour le transport frigorifique routier

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 ([Ref 25], [Ref 13]).

Tableau 43 - Facteurs d'émissions à la charge pour le transport frigorifique

	1990	2021
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'ensemble des sous-secteurs du transport frigorifique sont donnés Tableau 44. Leur évolution a été reconstituée à partir de différentes références ([Ref 8], [Ref 24]). Depuis 2014 ces facteurs d'émission du transport routier sont calculés sur la base de données communiquées par Petit Forestier [Ref 29].

Tableau 44 - Facteurs d'émissions fugitives 2021 pour les applications du transport frigorifique

2021	VUL réfrigérés	Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	Reefers	Conteneurs frigorifiques
Facteur d'émission fugitif	18 %	12 %	15 %	20 %

2.2.3 A la maintenance

L'évolution du taux d'émission à la maintenance pour le secteur du transport frigorifique est présentée ci-dessous et prend en compte, comme dans tous les secteurs, l'amélioration des pratiques.

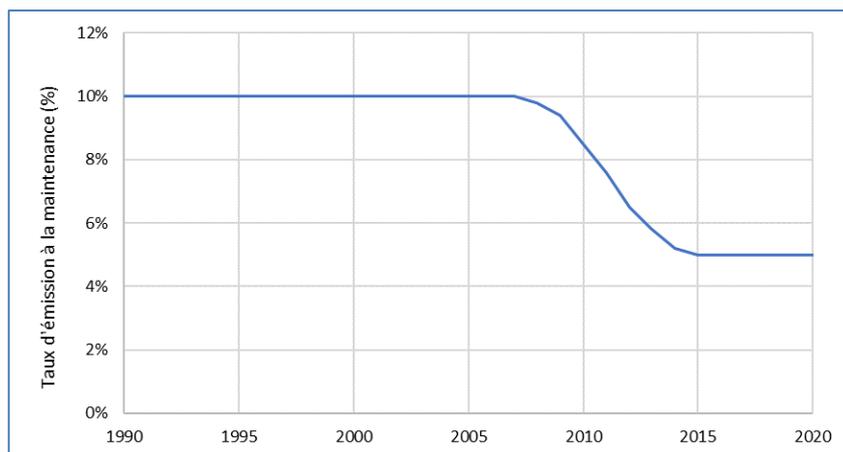


Figure 55 : Taux d'émissions à la maintenance - transports frigorifiques

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 2021. 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 2021 pour les reefers et 50 % pour les conteneurs.

Tableau 45 - Facteurs d'émission en fin de vie des équipements du transport frigorifique

2021	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 plus de 2 000 tonnes en 2021 (Tableau 46). Elle est constituée à 70 % par la banque des conteneurs réfrigérés et à 17% par les systèmes autonomes équipant les camions frigorifiques.

La banque est en croissance régulière, 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 2021, le R-134a, très utilisé historiquement dans les conteneurs frigorifiques, représente plus de 50 % de la banque. Le R-404A, historiquement très utilisé en transport frigorifique routier, ne représente plus que 7% de la banque du transport frigorifique en 2021.

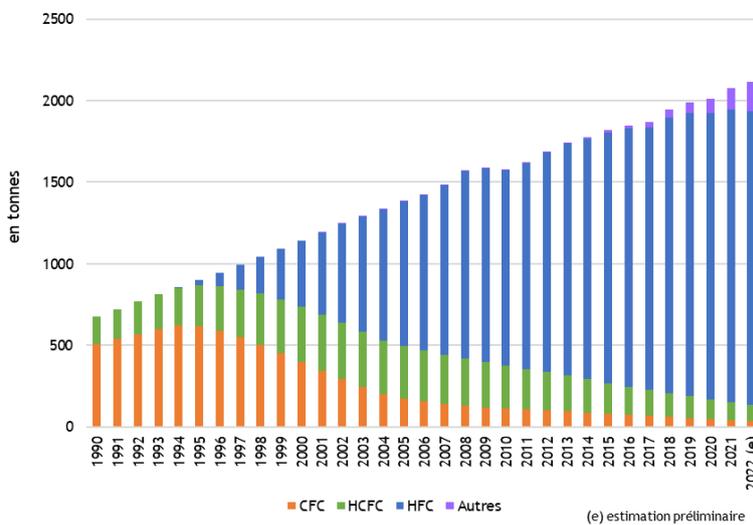


Tableau 46 : Banque 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-12	42
Total CFC	42
R-22	109
Total HCFC	109
R-134a	1 096
R-404A - R507 (PRG~3950)	163
R-410A	3,4
R-452A	256
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	275
Total HFC	1 793
R-717	3,3
R-744	131
Total Autres	134
Total général	2 079

Figure 56 : Banque de fluide dans le secteur du transport frigorifique

3.2 Demande

3.2.1 Besoin pour les équipements neufs

Le besoin en fluides frigorigènes pour les équipements neufs est évalué à plus de 600 tonnes en 2021. 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 2021), notamment de R-513A (35 %).

La part des fluides non fluorés est en croissance et représente environ 15 % de la demande pour les équipements neufs en 2021

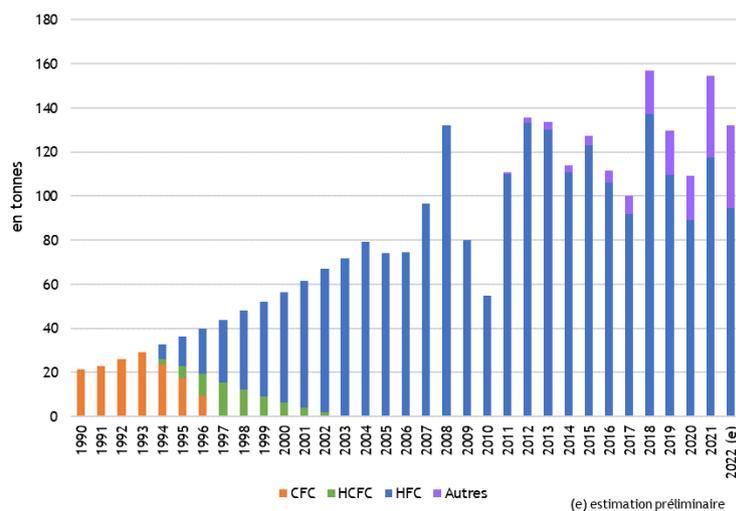


Figure 57 : Quantités nécessaires à la production dans le secteur du transport frigorifique

Tableau 47 : production 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	19
R-452A	7,5
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	91
Total HFC	118
R-717	2,9
R-744	34
Total Autres	37
Total général	154

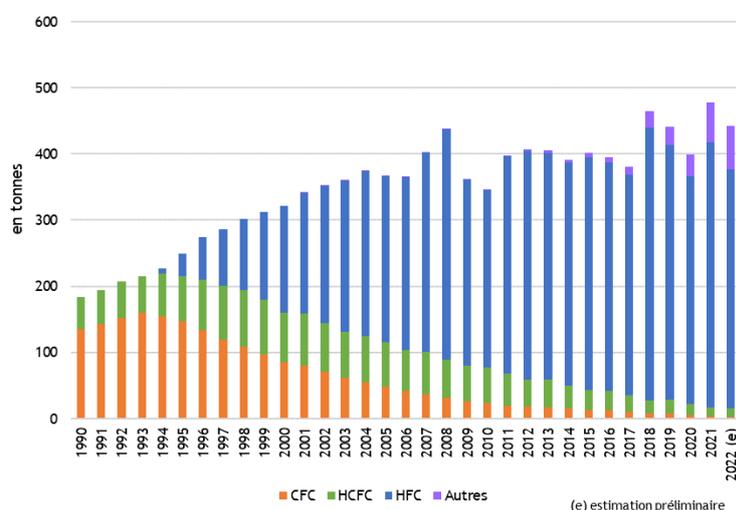


Figure 58 : Quantités nécessaires à la charge des équipements sur site pour le secteur du transport frigorifique

Tableau 48 : charges sur site 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-12	3,6
Total CFC	3,6
R-22	13
Total HCFC	13
R-134a	180
R-404A - R507 (PRG~3950)	26
R-410A	0,7
R-452A	65
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	128
Total HFC	400
R-717	3,4
R-744	57
Total Autres	60
Total général	477

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.

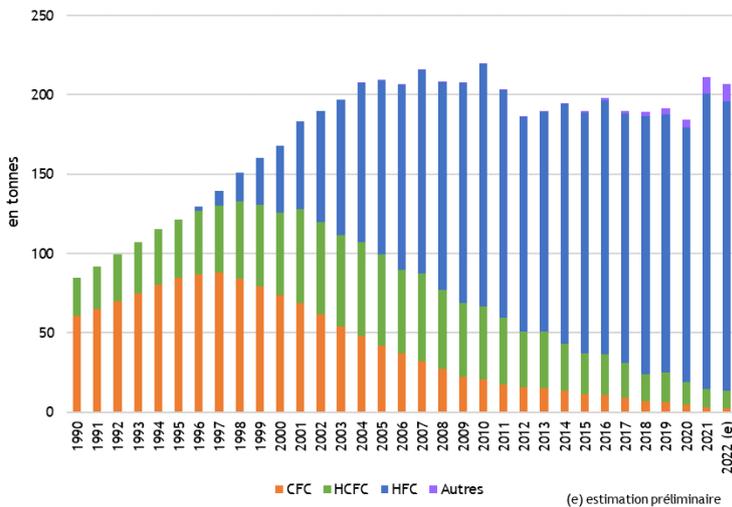


Figure 59 : Besoin pour la maintenance dans le secteur du transport frigorifique

Tableau 49 : Quantités pour la maintenance 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-12	3,1
Total CFC	3,1
R-22	11
Total HCFC	11
R-134a	135
R-404A - R507 (PRG~3950)	23
R-410A	0,5
R-452A	11
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	17
Total HFC	186
R-717	0,01
R-744	10
Total Autres	10
Total général	211

3.3 Emissions

3.3.1 Emissions totales

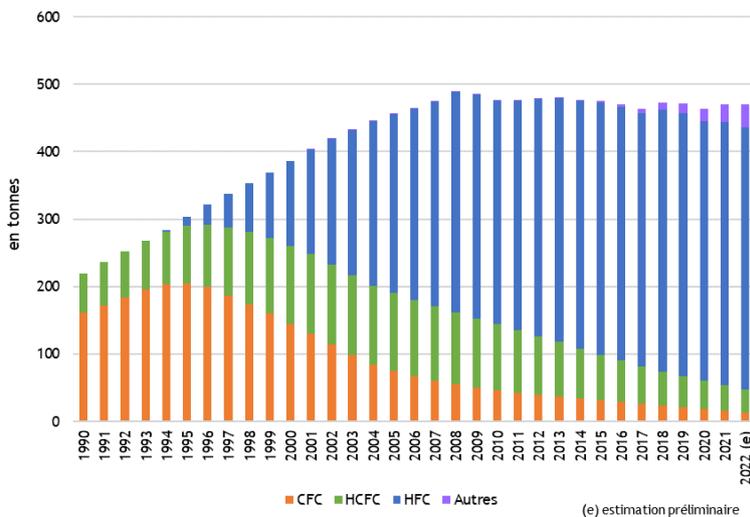


Figure 60 : Emissions totales du transport frigorifique

Tableau 50 : Emissions totales 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-12	16
Total CFC	16
R-22	37
Total HCFC	37
R-134a	258
R-404A - R507 (PRG~3950)	38
R-410A	0,7
R-452A	37
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	57
Total HFC	390
R-717	0,2
R-744	27
Total Autres	27
Total général	470

Le niveau 2021 des émissions totales dues à l'ensemble du secteur du transport frigorifique est estimé à environ 470 tonnes de fluides frigorigènes (Tableau 50) dont plus de 80 % proviennent du transport maritime. Les émissions 2021 sont dominées à 83 % par les HFC.

Contrairement à la banque qui est en augmentation constante, on constate une diminution des émissions du secteur (Figure 60), 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 près de 2 millions de tonnes de CO₂ dans les années 1995, les émissions du transport frigorifique ne représentent plus que 800 milliers de tonnes de CO₂ en 2021 grâce à l'introduction des nouveaux réfrigérants et à la baisse des taux d'émissions fugitives (Figure 61). Ce secteur étant traité au niveau international et les navires du transport maritime ayant des durées de vie élevées, ce secteur comporte encore une banque de CFCs, qui, bien que très faible, se démarque ici lorsque les émissions sont converties en CO₂ équivalent, le R-12 ayant un PRG de 10 200 (AR()).

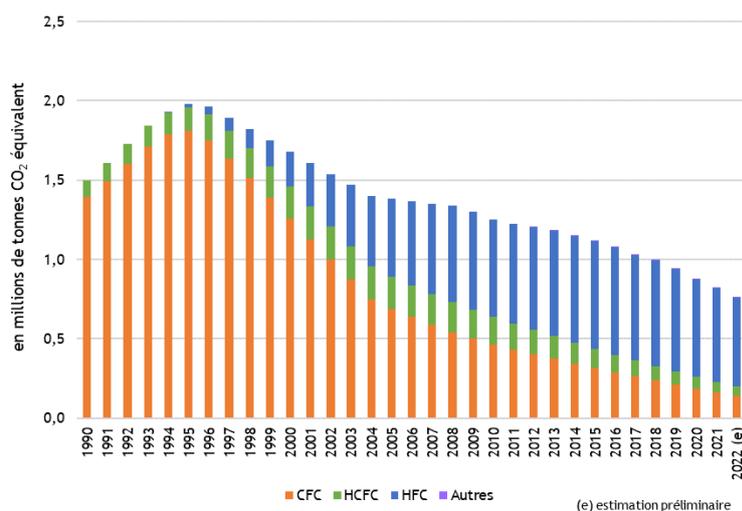


Tableau 51 : Emissions CO₂eq. 2021

Fluide frigorigène	2021 (en ktCO ₂ e)
R-12	162
Total CFC	162
R-22	66
Total HCFC	66
R-134a	335
R-404A - R507 (PRG~3950)	149
R-410A	1,4
R-452A	72
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	32
Total HFC	590
R-744	0,03
Total Autres	0,03
Total général	818

Figure 61 : Emissions CO₂ équivalentes du transport frigorifique (millions de tonnes)

VI. Secteur du froid industriel

1. Introduction

Ce secteur a été entièrement revu lors de l'inventaire 2020. 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, qui avaient été étendues à l'ensemble du secteur agroalimentaire, ont été révisées et la part de l'ammoniac dans les installations revue à la baisse, car les vérifications de cohérence sur le marché de R-404A montraient que les hypothèses corrigées avaient tendance à nettement sous-estimer le marché.

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.

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, en particulier sur les applications des procédés industriels (chimie, pharmacie).

Ce secteur est décomposé en 9 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 ;
- Les patinoires ;
- Les tanks à lait.

Dans le cadre de cette édition d'inventaire, les tanks à lait et les patinoires ont été réintégrés (ils n'avaient pas pu être intégrés dans l'outil GF l'an dernier).

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 8] :

- 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

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 32]. 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.

Tanks à lait

Le marché des tanks à lait (ou refroidisseurs à lait) a été reconstitué à partir des données anciennes d'inventaire [Ref 8] et, depuis 2020 des données fournies par le groupe Serap [Ref 52].

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

	<i>en milliers de m²</i>			
	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 52, 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 2021 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).

Patinoires

Le marché des systèmes frigorifiques des patinoires est estimé à partir de l'évolution du parc fourni par le Syndicat des patinoires en tenant compte d'un renouvellement tous les 15 ans.

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 les prochaines éditions d'inventaire.

2.1.2 Charge nominale

Dans le cas du froid industriel, la charge installée est estimée à partir de plusieurs ratios de charge [Ref 8]. 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 53 - 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 2020. 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.

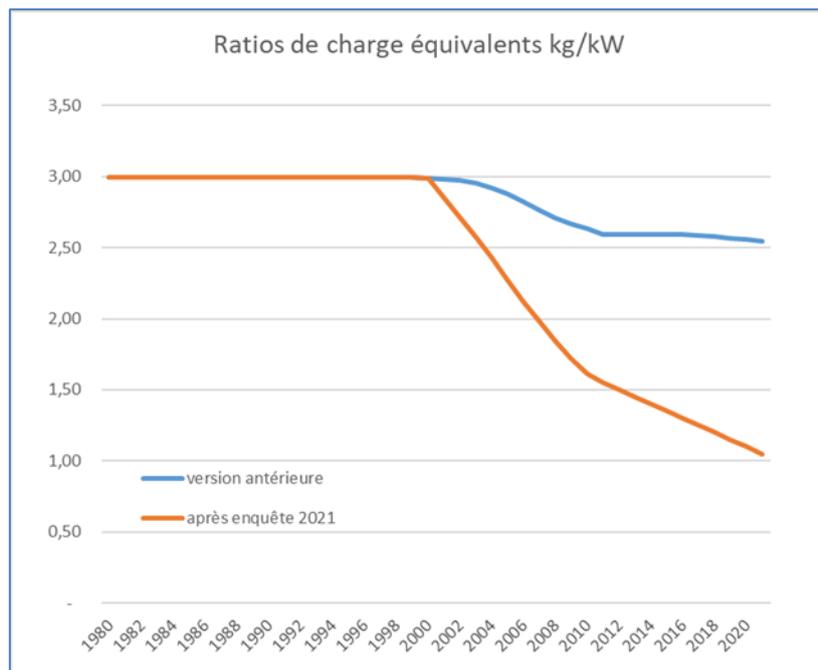


Figure 62 : Ratio de charge équivalent - Exemple de l'industrie laitière

Les niveaux de charge des systèmes frigorifiques utilisés dans les patinoires sont issus des enquêtes d'inventaires antérieures [Ref 8] et dépendent du fluide utilisé. En 2021, une charge moyenne de 300 à 500 kg/ installation, selon le fluide utilisé, est prise en compte.

Pour les tanks à lait, la charge dépend de la puissance du compresseur installé et varie de 2 à 8kg par circuit [Ref 52]. Actuellement, les refroidisseurs à lait mis sur le marché sont équipés de 2 circuits :

pour les cuves de 8 000 litres, il s'agit de 2 circuits de 3kg de charge ; pour les cuves de 15 000 litres, de deux circuits de 8 kg de charge (au R-449A), selon le groupe Serap [Ref 52].

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 2020 & 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.

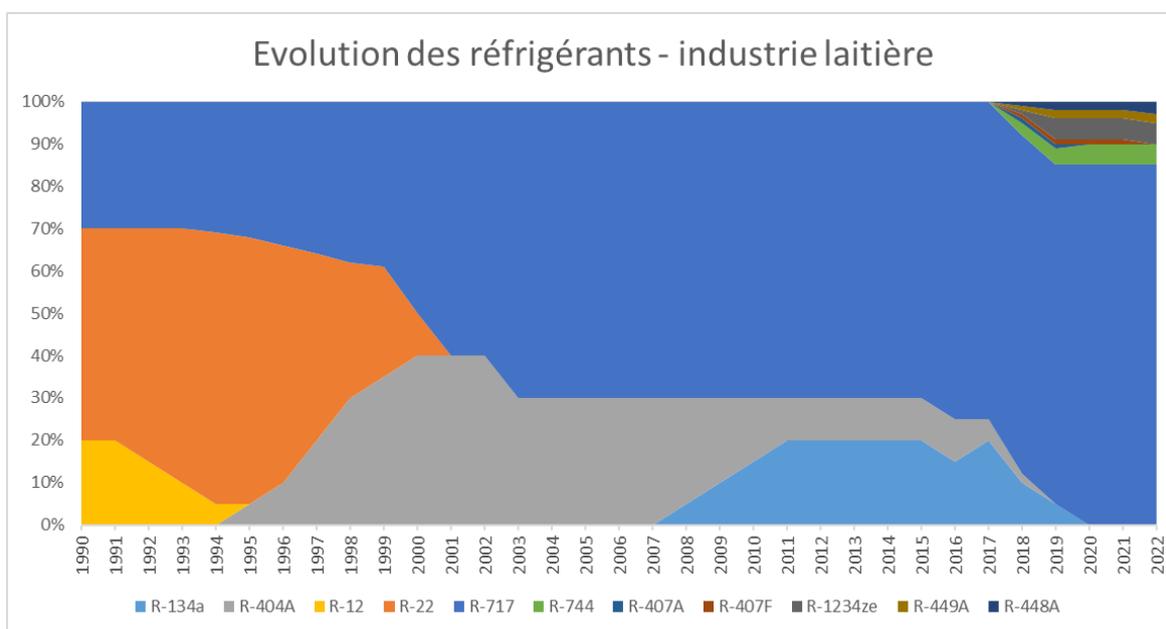


Figure 63 - Evolution des réfrigérants utilisés dans les installations neuves de l'industrie du lait

A la suite des écarts observés entre le marché de R-404A déclaré et la demande reconstituée par le calcul, la généralisation de la correction apportée à l'industrie laitière aux autres secteurs a été corrigée (par exemple Figure 64), de façon à conserver une répartition plus équilibrée entre l'ammoniac et le R-404A sur l'historique. La part de R-717 reste croissante depuis 2018 dans les nouvelles installations.

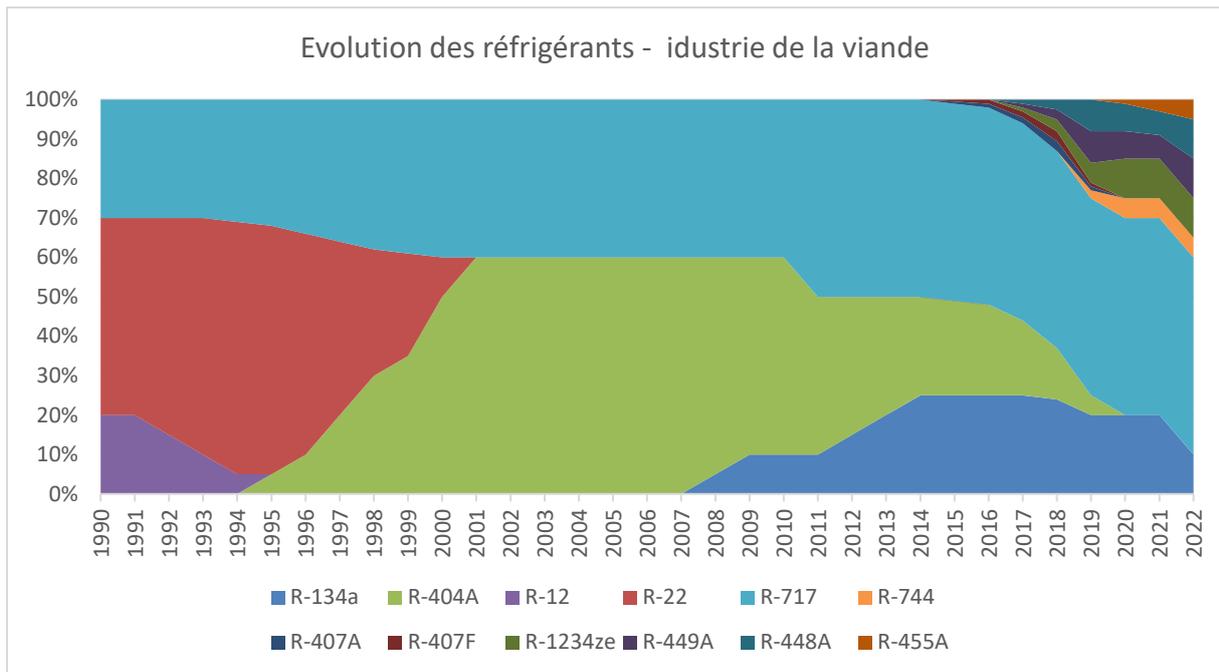


Figure 64 - Evolution des réfrigérants utilisés dans les installations neuves de l'industrie de la viande

Pour le sous-secteur des tanks à lait, le R-404A a été le principal fluide frigorigène utilisé. Depuis 2017 on assiste à une transition vers le R-449A [Ref 52].

Pour le sous-secteur des patinoires, le R-134a a longtemps été utilisé, notamment pour la patinoires mobiles. En 2021, il est considéré que 50% des patinoires utilisent le R-134a et que le reste des nouvelles installations utilise le R-448A, R-449A ou l'ammoniac.

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.

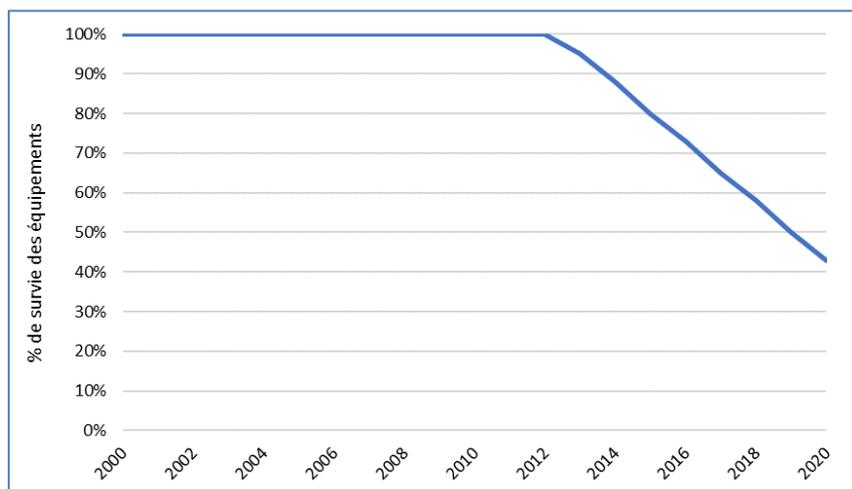


Figure 65 : Courbe de durée de vie pour le froid industriel

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 ([Ref 25], [Ref 13]).

Tableau 54 - facteur d'émission à la charge des installations de froid industriel

2021	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 2021 sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 55 - Facteurs d'émissions fugitives par application du froid industriel pour 2021

2021	Agro-alimentaire	Entrepôts	Industrie chimique	Industrie pharmaceutique	Industrie caoutchouc	Patinoires	Tanks à lait
Facteur d'émission fugitif	8 %	13 %	13 %	14 %	15 %	8 %	8%

Industrie agroalimentaire et entrepôts

Sur la base des hypothèses des anciennes études d'inventaires [Ref 8], 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, et suivent une courbe de décroissance en S.

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.

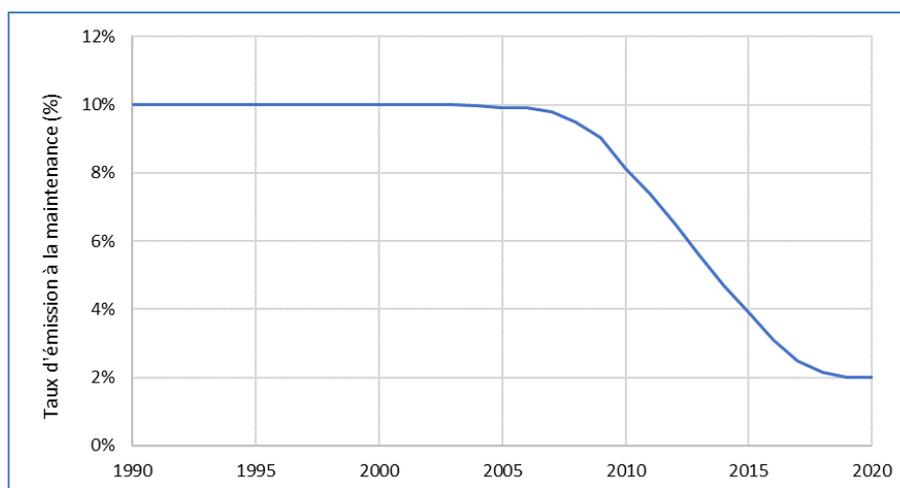


Figure 66 : Taux d'émission à la maintenance - Froid industriel

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 56 - Facteurs d'émissions 2021 en fin de vie des équipements du froid industriel

2021	Agro-alimentaire	Entrepôts	Industrie chimique	Industrie pharmaceutique	Industrie caoutchouc	Patinoires	Tanks à lait
Facteur d'émission de fin de vie	5 %	10 %	5 %	5 %	10 %	8 %	8 %

Industrie agroalimentaire

Sur la base des hypothèses des anciennes études d'inventaires [Ref 8], 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 8], 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 2021.

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. Cette estimation sera mise à jour, l'an prochain, à la suite d'une enquête d'Uniclima auprès de ses adhérents.

3.1 Banque

La banque du froid industriel est estimée à près de 9 500 tonnes en 2021, constituée à 64 % d'HFC, bien que le secteur agroalimentaire soit fortement utilisateur d'ammoniac. L'enquête de terrain a montré une part importante d'utilisation de l'ammoniac sur le parc d'installations et étant donnée l'approche de l'interdiction d'utilisation du R-404A dans les installations neuves à partir de 2022, l'ammoniac est largement utilisé dans les nouvelles installations. La banque d'ammoniac s'est accrue et représente 35 % de la banque totale du froid industriel en 2021.

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 2021.

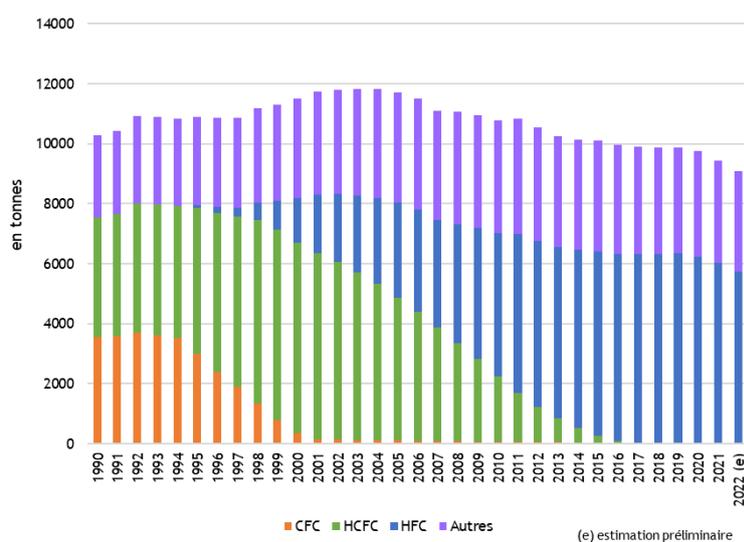


Figure 67 : Banque de fluide dans le secteur du froid industriel

Tableau 57 : Banque 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-11	11
Total CFC	11
R-134a	2 116
R-404A - R507 (PRG~3950)	1 740
R-407A	99
R-407F	111
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	401
R-448A - R-449A (PRG~1300)	899
R-452A	75
R-454C - R-455A (PRG~150)	5,5
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	491
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	70
Total HFC	6 007
R-717	3 339
R-744	84
Total Autres	3 423
Total général	9 441

3.2 Demande

3.2.1 Besoin pour les équipements neufs

La demande pour les nouvelles installations du secteur du froid industriel est dominée en 2021 par le R-134a (40 %), principalement utilisé dans les procédés industriels et l'ammoniac (36 %), principalement utilisé en industrie agroalimentaire et entrepôts.

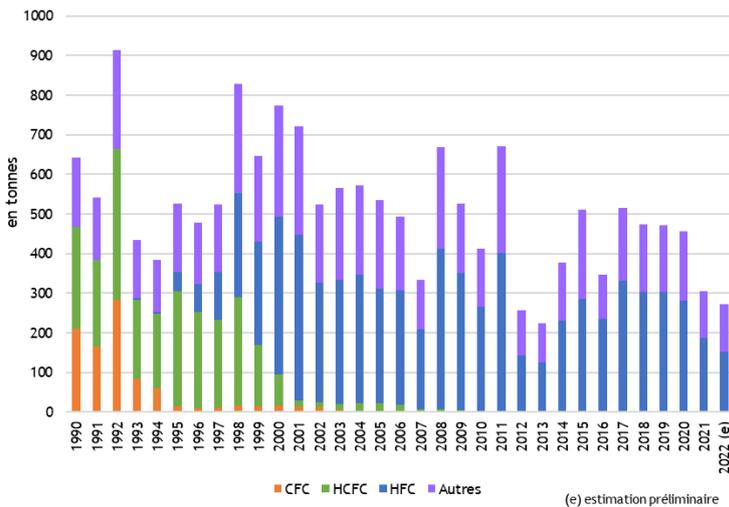


Figure 68 : Besoin en fluides frigorigènes pour les installations neuves du froid industriel

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 67). Par ailleurs, l’usage de l’ammoniac tend à réduire les taux d’émissions puisque l’ammoniac permet leur détection plus rapidement. En 2021, on estime que 84 % des quantités demandées pour la maintenance sont des HFC, soit environ 700 tonnes.

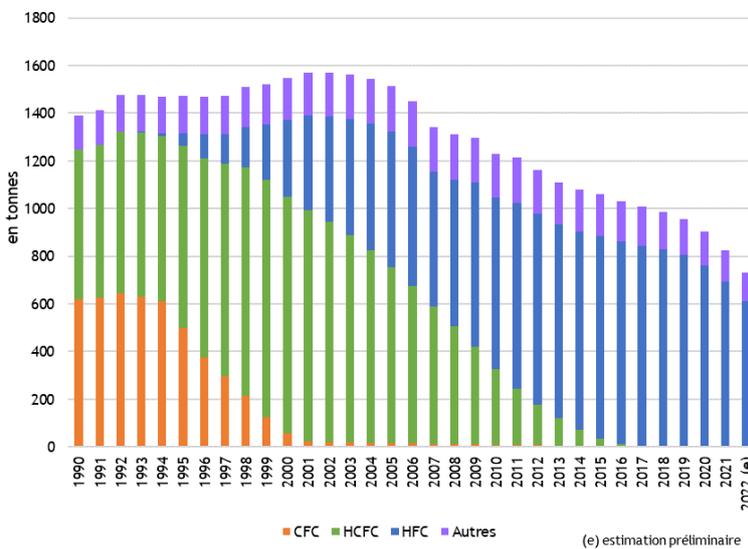


Figure 69 : Quantités requises pour la maintenance dans le secteur du froid industriel

3.2.3 Besoin pour le retrofit

Tableau 58 : Charges sur site 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	119
R-407F	1,5
R-448A - R-449A (PRG~1300)	23
R-454C - R-455A (PRG~150)	3,2
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	19
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	22
Total HFC	187
R-717	109
R-744	7,8
Total Autres	117
Total général	304

Tableau 59 : Quantités pour la maintenance 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-11	1,5
Total CFC	1,5
R-134a	257
R-404A - R507 (PRG~3950)	192
R-407A	11
R-407F	12
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	44
R-448A - R-449A (PRG~1300)	91
R-452A	9,3
R-454C - R-455A (PRG~150)	0,7
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	65
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	8,3
Total HFC	691
R-717	121
R-744	10
Total Autres	131
Total général	823

Depuis 2018, du fait des approches d'interdiction d'usage des fluides frigorigènes de PRG supérieur à 2500, pour la maintenance puis pour les installations neuves, de nombreux retrofits sont mis en œuvre. La demande pour le retrofit est élevée, évaluée à 300 tonnes de HFC en 2021.

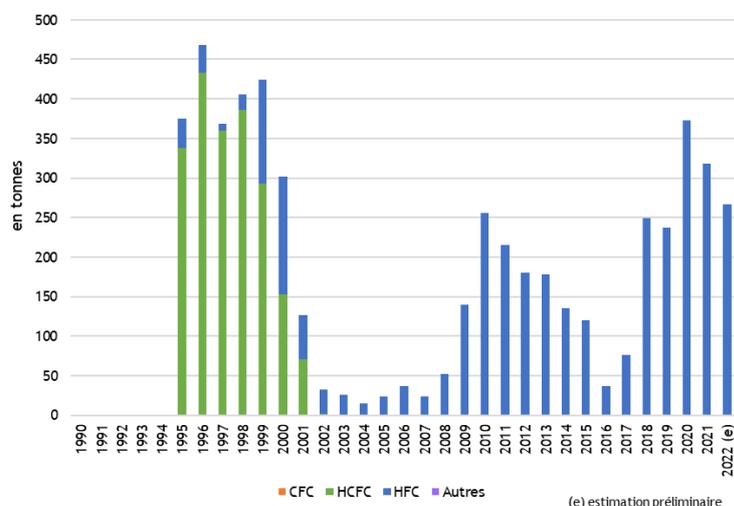


Figure 70 : Besoin pour le retrofit dans le secteur du froid industriel

Tableau 60 - Besoin retrofit 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-448A - R-449A (PRG~1300)	204
R-452A	31
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	83
Total HFC	318
Total général	318

3.3 Emissions

3.3.1 Emissions totales

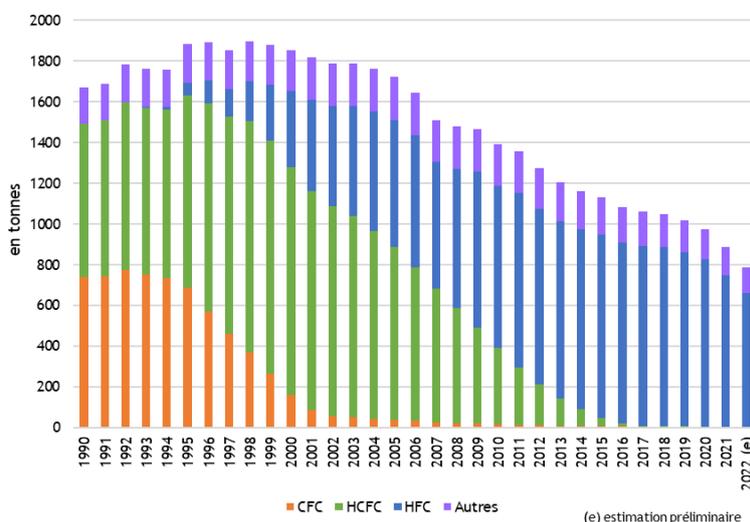


Figure 71 - Emissions totales du froid industriel

Tableau 61 : Emissions totales 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-11	1,6
R-12	0,09
Total CFC	1,7
R-22	1,7
Total HCFC	1,7
R-134a	268
R-404A - R507 (PRG~3950)	213
R-407A	11
R-407F	12
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	51
R-448A - R-449A (PRG~1300)	101
R-452A	10
R-454C - R-455A (PRG~150)	0,7
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	68
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	8,7
Total HFC	745
R-717	125
R-744	10
Total Autres	136
Total général	884

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).

3.3.2 Emissions CO₂ équivalentes

Alors qu’elles culminaient à 9 millions de tonnes de CO₂ dans les années 1990, les émissions de fluides frigorigènes du froid industriel ne représentent plus que 1,5 millions de tonnes de CO₂ en 2021. La tendance décroissante de la banque, sa forte proportion d’ammoniac et la baisse des taux d’émission sont l’explication 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 72).

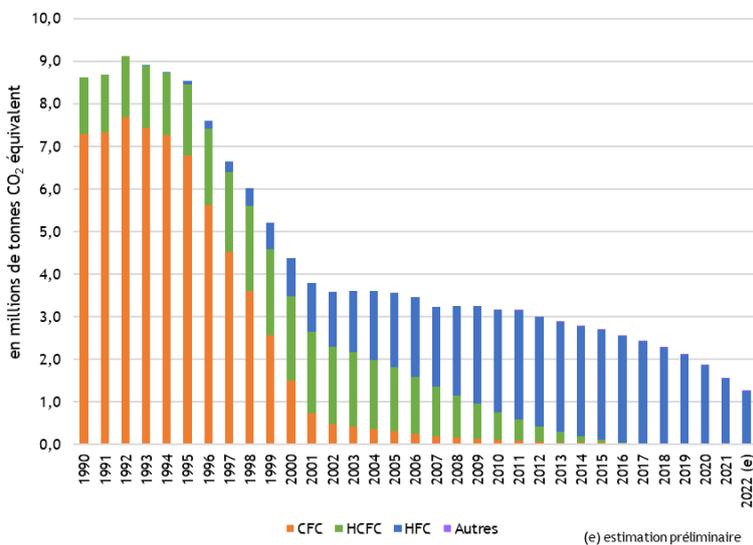


Figure 72 : Emissions CO₂ équivalentes du froid industriel (millions de tonnes)

Tableau 62 : Emissions CO₂eq. 2021

Fluide frigorigène	2021 (en ktCO ₂ e)
R-11	7,4
R-12	0,9
Total CFC	8,3
R-22	2,9
Total HCFC	2,9
R-134a	349
R-404A - R507 (PRG~3950)	841
R-407A	22
R-407F	21
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	118
R-448A - R-449A (PRG~1300)	129
R-452A	20
R-454C - R-455A (PRG~150)	0
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	39
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	0,01
Total HFC	1 539
R-744	0,01
Total Autres	0,01
Total général	1 550

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.

VII. Secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)

1. Introduction

Ce 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 33] par équipement sont listées ci-dessous :

Tableau 63 - 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 8]. Des échanges récents avec la profession pourraient 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 2021.

Tableau 64 - 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 34] 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 8]. 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 8] ;
- 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 8].

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.

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

Ces ratios de charge ont été communiqués par des fabricants d'équipements et sont parfois distincts par fluide.

Tableau 65 - ratios de charge par gamme de chillers en 2021

Sous-secteur	Ratio kg/kW
Chillers P < 50 kW	0,25
Chillers 50 < P < 350 kW	0,17
Chillers P > 350 kW	0,18
Chillers à compresseur centrifuge	0,3

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. En 2021, les parts des fluides frigorigènes à bas PRG deviennent très significatives et, les chillers centrifuges sont passés, pour la quasi-totalité, aux HFO.

Pour les chillers à compresseur volumétrique, l'évolution des fluides frigorigènes (Figure 73) utilisés dans les équipements a été reconstituée à partir des données sur les réfrigérants communiquées par Uniclimate pour les années depuis 2002 [Ref 34] et des rapports du RTOC [Ref 45].

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, pour les chillers de faible et moyenne puissance, à partir de 2003. 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 <17,5kW et un peu dans la gamme <50kW.

Tableau 66 - fluides frigorigènes utilisés sur le marché des chillers en 2021

Sous-secteur	Fluides frigorigènes
Chillers P < 50 kW	45 % R-410A 35% R-32 20 % R-1234ze
Chillers 50 < P < 350 kW	80 % R-410A 10 % R-32 10 % R-1234ze
Chillers P > 350 kW	25 % R-410A 35% R-32 20 % R-1234ze 20% R-717
Chillers à compresseur centrifuge	5 % R-134a 40 %R-1234ze 55% R-1234zd

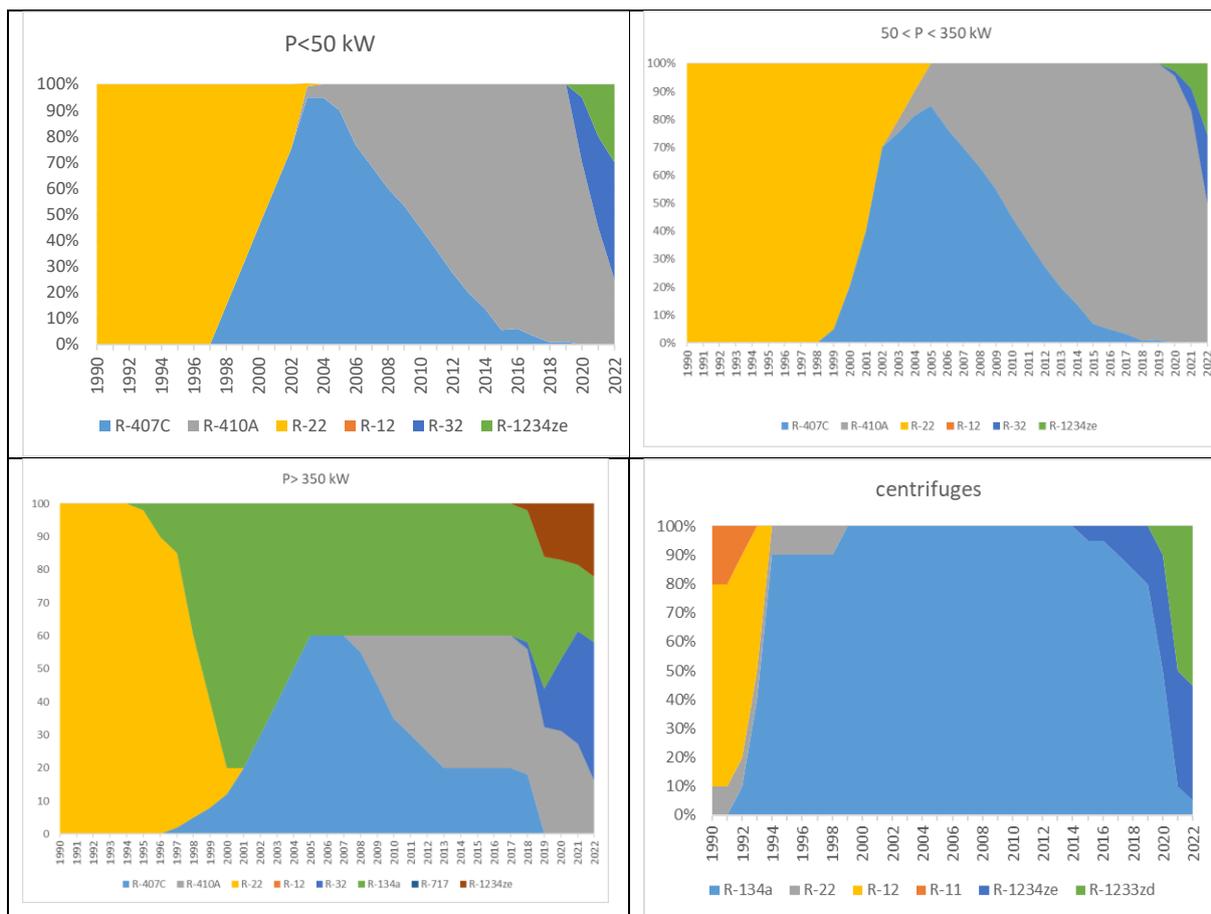


Figure 73 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés par gamme de chillers

2.1.4 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.

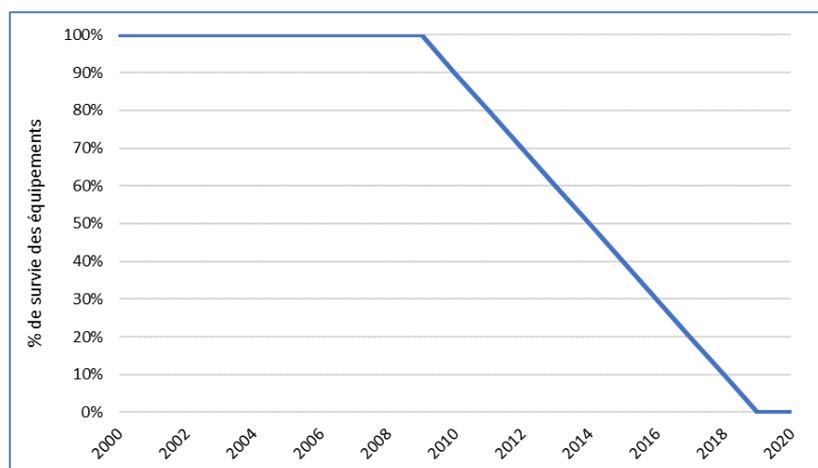


Figure 74 : Courbe de durée de vie des chillers de petites et moyennes puissances

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 construite de façon à prendre en compte l'amélioration continue des pratiques. La valeur asymptotique estimée pour l'année 2015 a été calculée à partir des données d'un producteur d'équipements en France, 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 %).

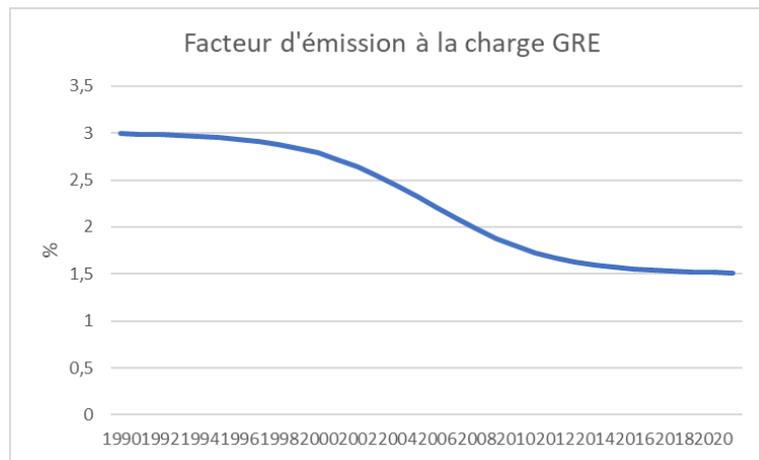


Figure 75 : Facteur d'émission à la charge des chillers (en %)

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.

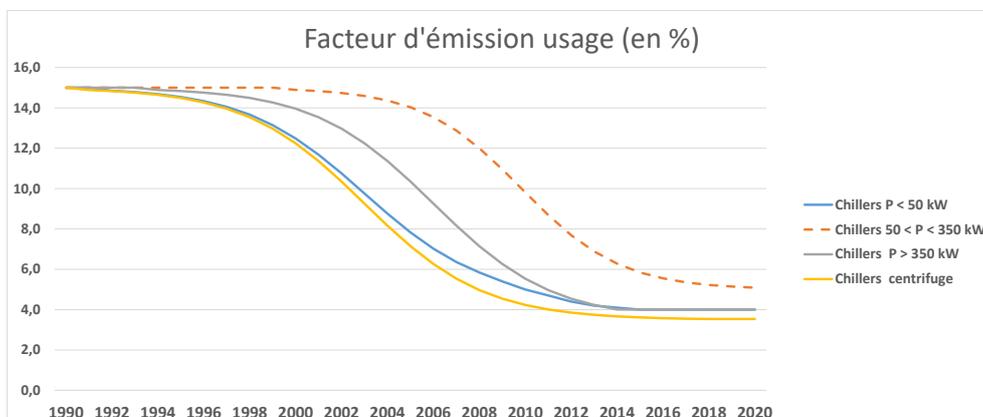


Figure 76 : Facteur d'émission pendant la durée de vie - chillers (en %)

Les facteurs d'émission estimés sont bien inclus dans l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 (entre 2 et 15 %).

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 traduit l'amélioration des pratiques. Ces taux d'émissions sont appliqués au complément de charge réalisé lors de la maintenance du chiller.

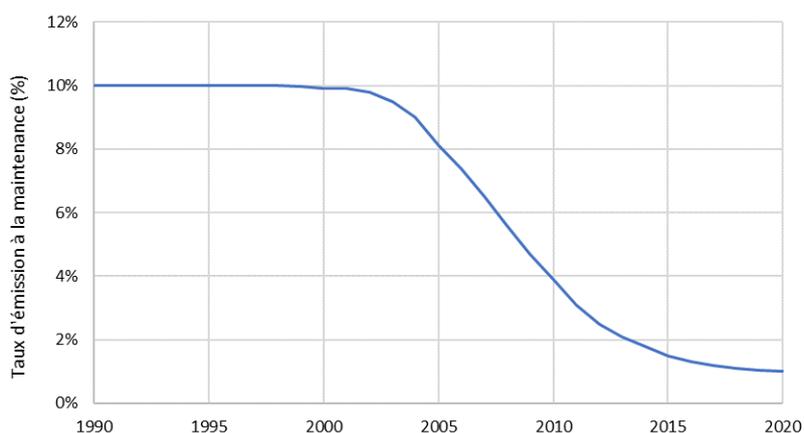


Figure 77 : Taux d'émission à la maintenance - Compresseurs centrifuges

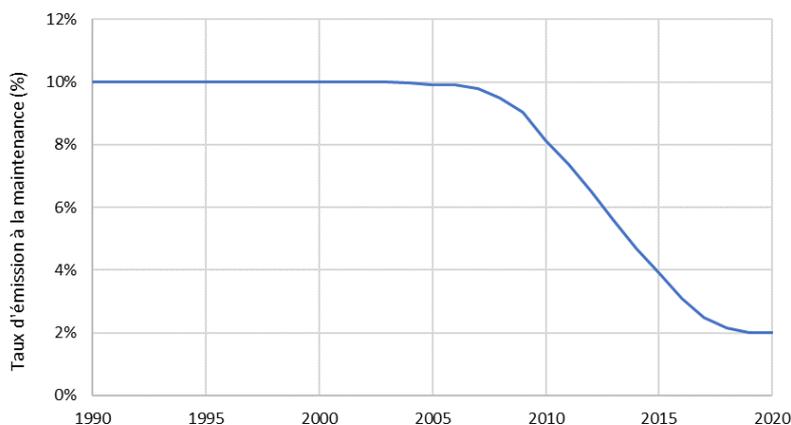


Figure 78 : Taux d'émission à la maintenance - Chillers de petites, moyennes et grandes puissances

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 des installations IPCE (classées pour l'environnement) et ont eu, très tôt, des conditions d'entretien et de surveillance permettant des niveaux d'émissions particulièrement bas.

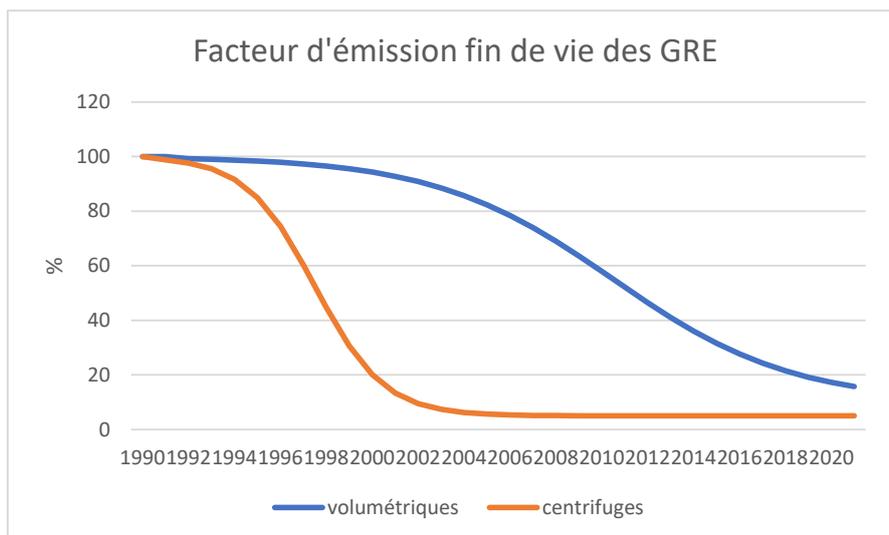


Figure 79 : Efficacité de récupération en fin de vie des chillers (en %)

3. Résultats

3.1 Banque

La banque du secteur des GRE est estimée à 6 000 tonnes en 2021. La tendance décroissante des marchés de chillers et celle de la diminution des ratios de charge (kg/kW) conduisent à une décroissance continue de la banque, de 3 % par rapport à 2020. Bien que le R-32 et les HFO soient en forte progression sur le marché neuf, la banque est encore en grande partie constituée de R-134a, de R-407C et de R-410A du fait des durées de vie élevées des installations. En 2021, la banque de R-134a représente 32 % de la banque totale (Tableau 67), suivie de celle du R-410A (30 %) et du R-407C(25 %).

Etant donné leur charge moyenne élevée et leur parc, les chillers volumétriques de puissance supérieure à 350 kW constituent la plus grande part de la banque (56%) des GRE.

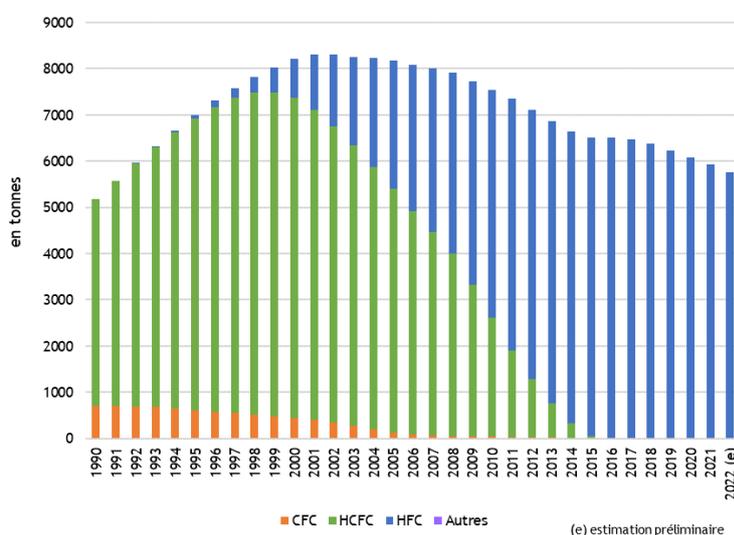


Tableau 67 : Banque de fluide 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-11	2,1
Total CFC	2,1
R-134a	1 902
R-32	129
R-407C	1 505
R-407F	1,2
R-410A	1 776
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	385
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	40
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	187
Total HFC	5 925
Total général	5 927

Figure 80 : Banque de fluide dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)

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-32 (28 %) et de HFO (41 %). En 2021, on estime le besoin total à plus de 500 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).

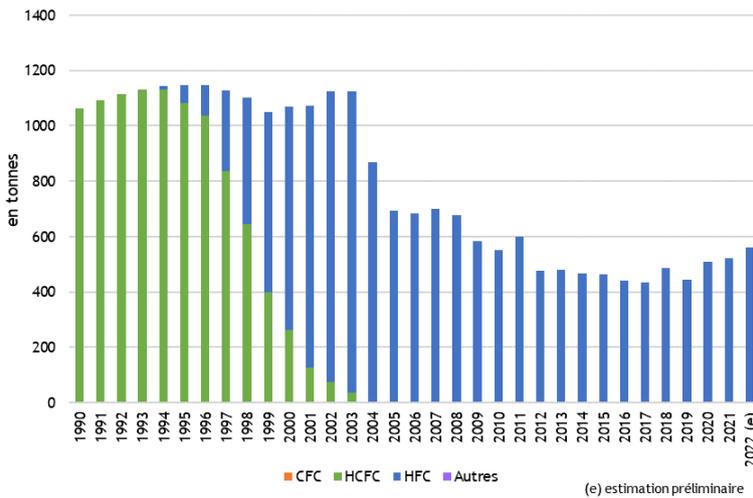


Figure 81 : Quantités nécessaires à la production des groupes refroidisseurs à eau (GRE) en France métropole.

Tableau 68 : Production 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	68
R-32	144
R-407C	0,2
R-410A	95
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	216
Total HFC	523
Total général	523

3.2.2 Besoin pour la maintenance

A l’instar de la banque de fluide, les quantités nécessaires à la maintenance des chillers sont en décroissance, de façon plus significative, avec la baisse des taux d’émissions (Tableau 69).

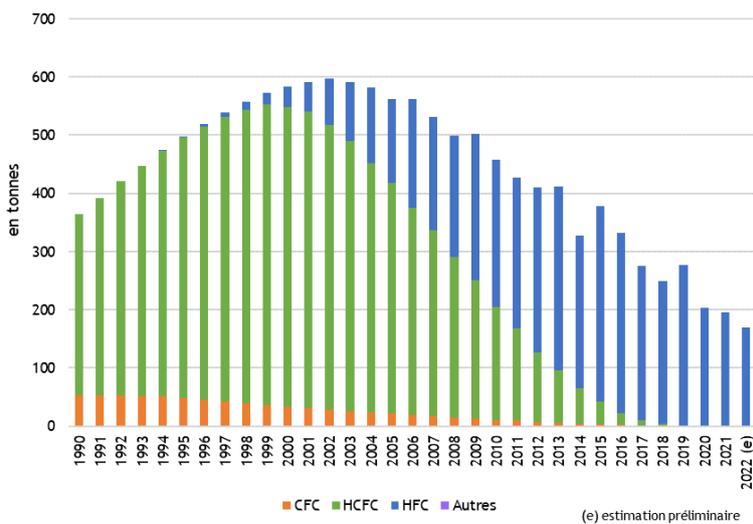


Figure 82 - Besoin pour la maintenance dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)

Tableau 69 : Quantités pour la maintenance 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-22	0,2
Total HCFC	0,2
R-134a	64
R-407C	68
R-407F	0,01
R-410A	54
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	10
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	0,4
Total HFC	196
Total général	196

3.2.3 Besoin pour le retrofit

Le secteur des chillers a été essentiellement concerné par le retrofit des installations au R-22. Depuis 2020, les retrofits concernent des installations au R-134a vers un HFO, le rythme est considéré faible et est à confirmer.

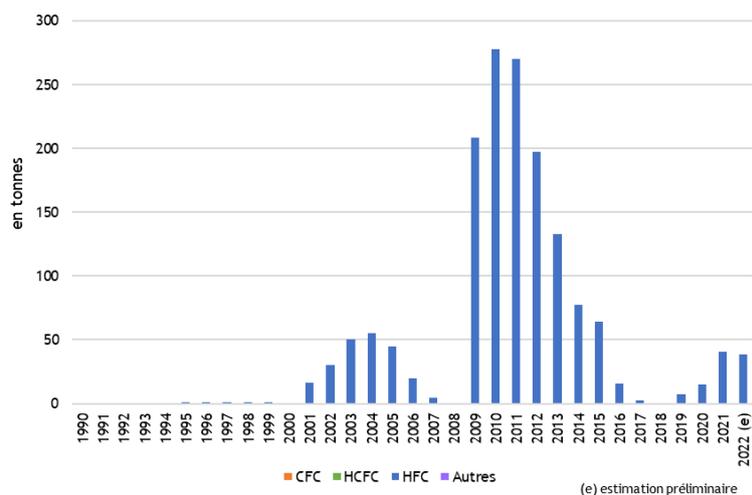


Figure 83 - Besoin pour le retrofit dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)

Tableau 70 : Besoin retrofit 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	34
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	7,2
Total HFC	41
Total général	41

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, les filières de fin de vie se sont améliorées et que le parc s'est progressivement renouvelé vers des installations à plus faible charge. Les émissions totales sont estimées à 460 tonnes en 2021 (Tableau 71), 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 %.

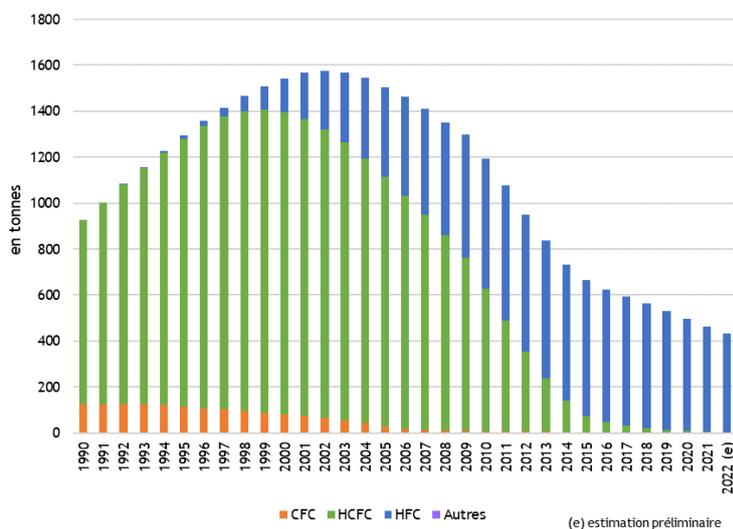


Figure 84 : Emissions totales du secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)

Tableau 71 : Emissions totales 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-11	0,32
R-12	0,05
Total CFC	0,36
R-22	4,4
Total HCFC	4,4
R-134a	154
R-32	8,0
R-407C	156
R-407F	0,0001
R-410A	109
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	19
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	0,7
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	12
Total HFC	459
Total général	464

3.3.2 Emissions CO₂ équivalentes

Les émissions du secteur des GRE s’élèvent à 720 000 tonnes d’équivalent CO₂ en 2021, sont en baisse régulière, de - 8 % entre 2020 et 2021. 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%.

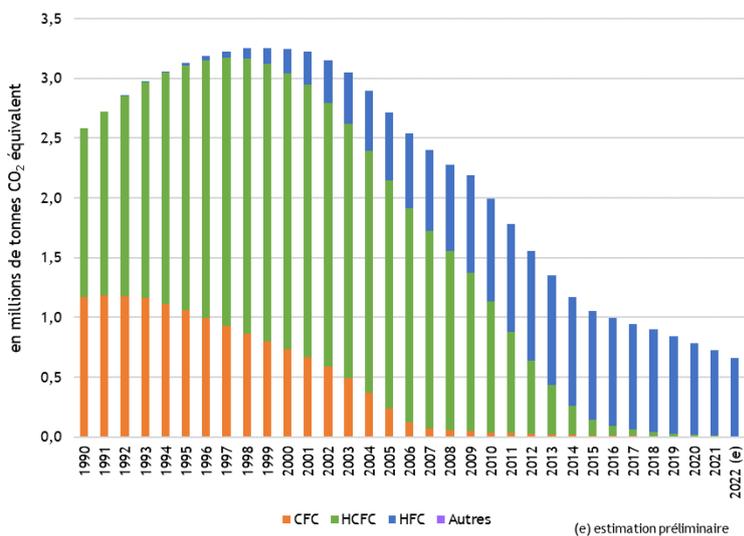


Figure 85 : Emissions CO₂ équivalentes des groupes refroidisseurs à eau (GRE) (millions de tonnes)

Tableau 72 : Emissions CO₂eq. 2021

Fluide frigorigène	2021 (en ktCO ₂ e)
R-11	1,5
R-12	0,5
Total CFC	2,0
R-22	7,7
Total HCFC	7,7
R-134a	201
R-32	5
R-407C	253
R-407F	0,0
R-410A	210
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	43
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	0,4
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	0,02
Total HFC	713
Total général	722

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 73 - modes de charge des équipements de climatisation à air

Secteur	Sous-secteur	Chargé d'usine (dit pré-chargé)	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 charge de fluide réfrigérant 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 33], sont listées au Tableau 74.

Tableau 74 - 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 75 sont basées sur les anciens rapports d'inventaire d'émissions de fluides frigorigènes [Ref 8]. Comme pour les autres secteurs, une courbe de durée de vie est appliquée, à partir de ces valeurs moyennes.

Tableau 75 - 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

Les statistiques de marchés d'équipements sont communiquées pour la grande majorité par Uniclimate [Ref 34]. 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 données transmises par Lennox à partir de 2015 (Ref 53).

Les marchés des climatiseurs mobiles, qui ne sont pas suivis par Uniclimate, ont été estimés à partir des données anciennes [Ref 8]. Faute d'information plus précise, les marchés sont supposés en croissance de 2% par an depuis 2020, ce niveau correspondant au taux de croissance donné par l'ADEME dans ses scénarios 2050. 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 8], 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 73). 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 8]. 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,

- 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 76 - 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 86).

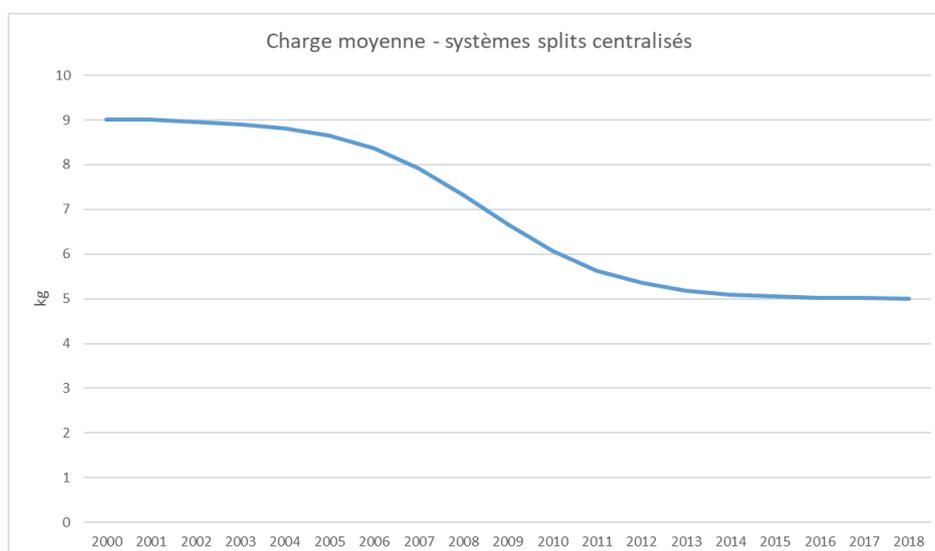


Figure 86 - Evolution de la charge des systèmes splits centralisés

Ces valeurs sont basées sur des communications de fabricants mentionnées dans les anciens rapports d'inventaire [Ref 8].

- *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.

$$Charge\ moyenne(i) = \sum^i \text{Marché}_{(i)} * \text{Ratio de charge}_{(i)} * \text{Puissance}(i) / \text{Puissance totale}$$

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

Tableau 77 - charges nominales 2021 des équipements de climatisation à air

Sous-secteur	Charge moyenne 2021 (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 77).

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 34] pour les années depuis 2000 (nombre d'équipements mis sur le marché par type de réfrigérant). 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 tendances données par [Ref 8].

Les hypothèses pour l'année 2021 sont récapitulées au tableau suivant.

Tableau 78 - Fluides frigorigènes utilisés sur les marchés neufs des équipements de climatisation à air en 2021

Sous-secteur	Fluides frigorigènes utilisés en 2021
Mobiles	100% R-290
Windows	20% R-410A 80% R-290
PAC air/air Mono split	3% R-410A 93% R-32
PAC air/air Multi split	10% R-410A 90% R-32
Armoires verticales	70% R-410A 30% R-32
PAC air/air DRV	97% R-410A 3% R-32
Systèmes split centralisé	70% R-410A 30% R-32
Roof top	42% R-410A 58% R-32
Armoires spéciales	60% R-410A 40% R-32

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 87 et Figure 88.

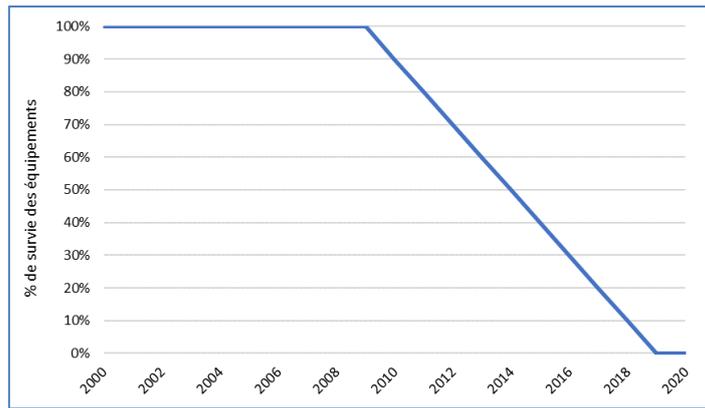


Figure 87 : Courbe de durée de vie des PAC air/air mono splits, PAC air/air multi splits, armoires verticales, PAC air/air DRV, centrale AC, rooftop et armoires spéciales

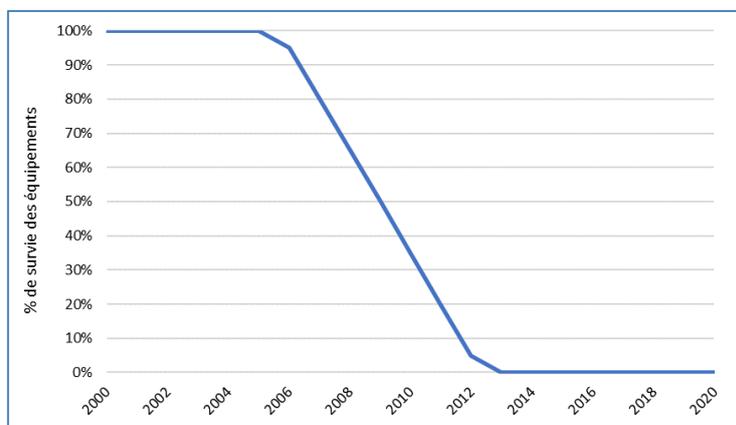


Figure 88 : Courbe de durée de vie des climatiseurs fenêtres et climatiseurs mobiles

2.2 Facteurs d'émissions

2.2.1 A la charge

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 (d'usine ou sur site) afin de prendre en compte l'amélioration continue des pratiques (Figure 89). 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.

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 %). Il serait utile d'intégrer les déclarations d'autres producteurs d'équipements pour moyenniser les déclarations du premier fabricant.

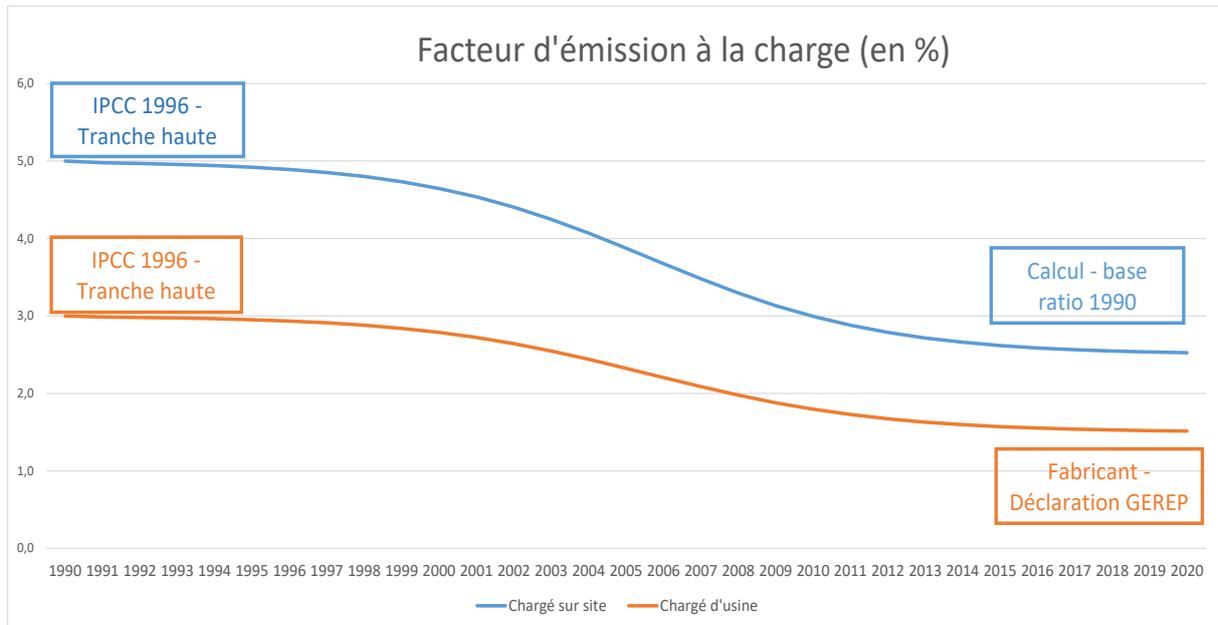


Figure 89 : Facteur d'émission à la charge (en %) des équipements de climatisation à air

2.2.2 Fugitif

Les taux d'émission pendant le fonctionnement de l'équipement sont également supposés évoluer selon une courbe en S (Figure 90).

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.

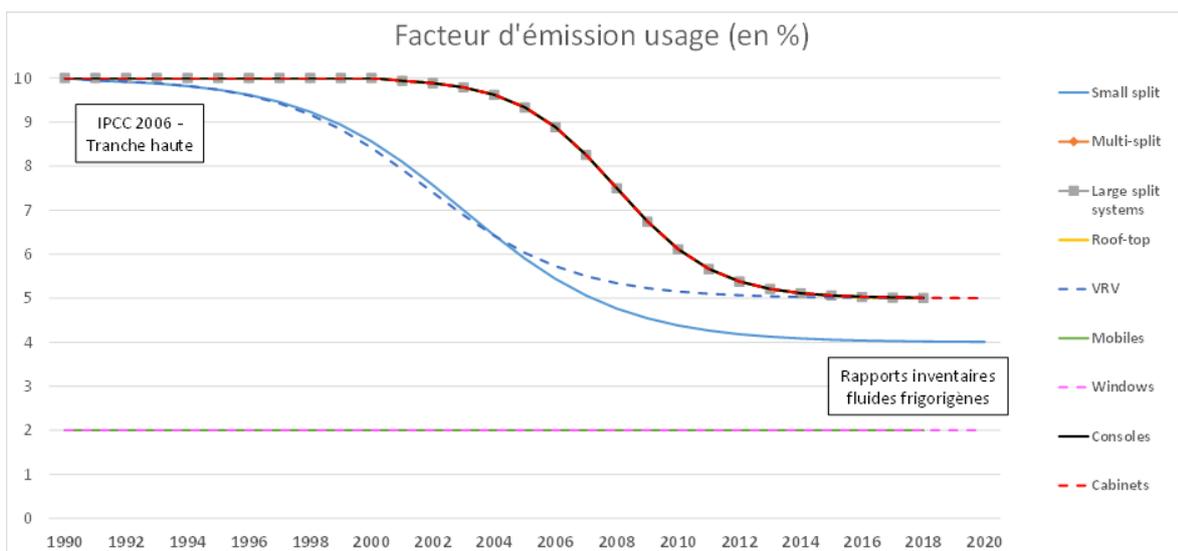


Figure 90 : Facteur d'émission pendant la durée de vie - PAC air/air et climatisation fixe (en %)

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 2021.

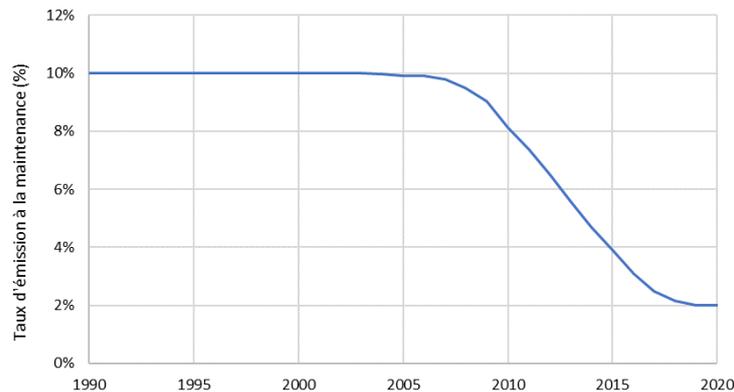


Figure 91 - Taux d'émissions à la maintenance des équipements de climatisation à air

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 %.

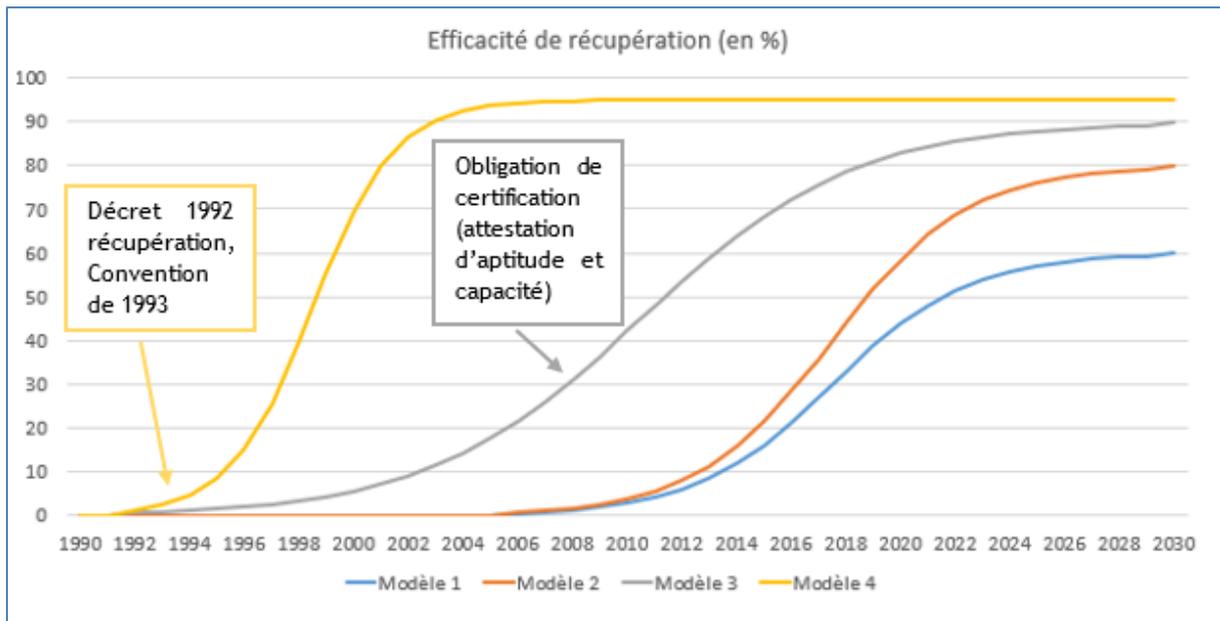


Figure 92 : Efficacité de récupération en fin de vie (en %) des équipements de la climatisation et PAC à air

3. Résultats

3.1 Banque

La banque des équipements de climatisation à air et des PAC air/air est en croissance continue, de 4 % entre 2020 et 2021. Elle s'élève à 14 000 tonnes et est constituée à 75 % de R-410A (Tableau 79). La banque d'hydrocarbures est faible et ne concerne que les équipements hermétiques de type mobile devant satisfaire, pour l'ensemble du marché, à l'exigence réglementaire de n'utiliser que des fluides frigorigènes de PRG<150 depuis 2020.

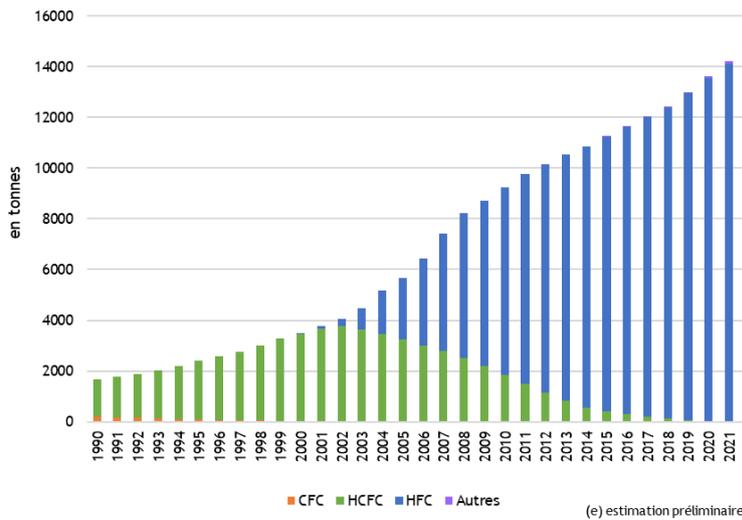


Tableau 79 : Banque de fluide 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-12	0,002
Total CFC	0,002
R-22	0,3
Total HCFC	0,3
R-134a	16
R-32	2 579
R-407C	688
R-410A	10 757
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	68
Total HFC	14 108
R-290	106
Total Autres	106
Total général	14 214

Figure 93 : Répartition sectorielle de la banque de fluides frigorigènes du secteur de la climatisation à air et PAC air/air

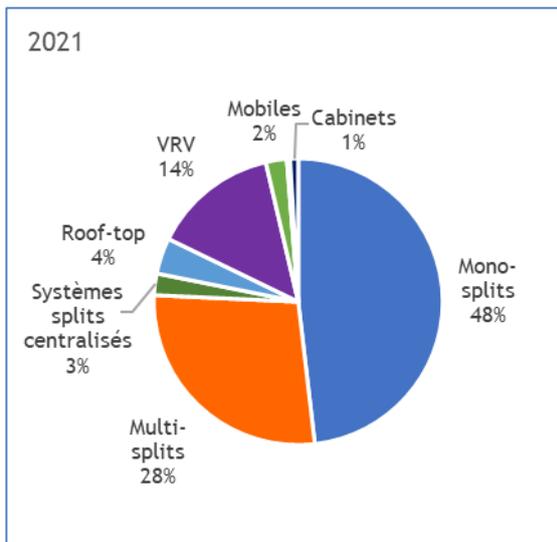


Figure 94 - Répartition sectorielle de la banque 2021 de la climatisation à air et PAC air/air

D'un point de vue sous-sectoriel, la banque est dominée par des équipements de type mono-splits et multisplits (Figure 94).

3.2 Demande

3.2.1 Besoin pour les équipements neufs

Le besoin pour la charge sur site des équipements de climatisation fixe et des PAC air/air est dans sa totalité constituée de HFC, de R-32 et de R-410A à parts égales. En 2021, on estime cette quantité à 390 tonnes

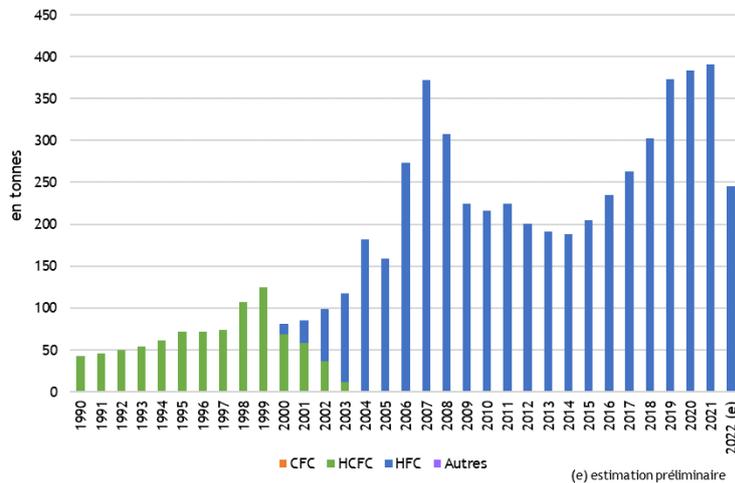


Tableau 80 : Besoin pour la charge 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-32	193
R-410A	199
Total HFC	391
Total général	391

Figure 95 : Quantités nécessaires à la charge des équipements de la climatisation fixe

Le besoin pour la production des équipements de climatisation et PAC air/air en France est, elle, dominée par le R-32 (65 %).

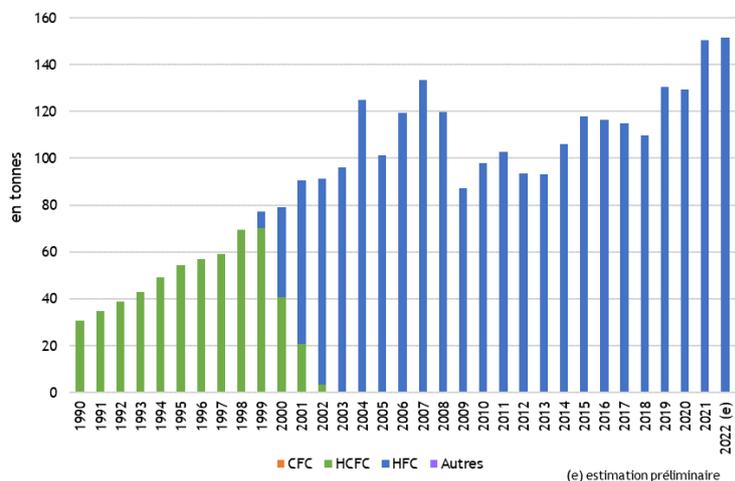


Tableau 81 : Besoin pour la production 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-32	97
R-410A	53
Total HFC	150
Total général	150

Figure 96 : Quantités nécessaires à la production dans le secteur de la climatisation et PAC air/air fixe

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 2021, le besoin pour la maintenance des installations présentes sur le parc de France métropole est évalué à 300 tonnes dont plus grande partie est du R-410A (95%). 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.

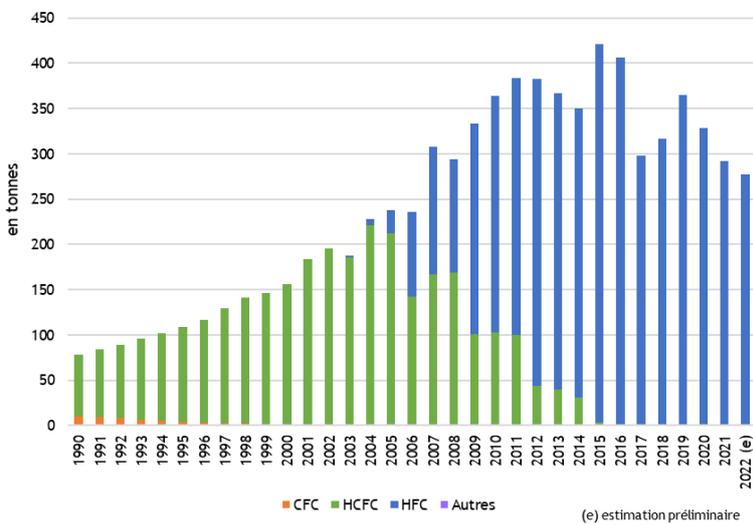


Tableau 82 : Quantités pour la maintenance 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-32	3,9
R-407C	8,8
R-410A	278
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	1,1
Total HFC	292
Total général	292

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

3.2.3 Besoin pour le retrofit

Il n'existe actuellement pas de retrofit possible des installations au R-410A. Les quantités présentées Figure 98 concernent les retrofits des installations au R-22 dans les années 2010.

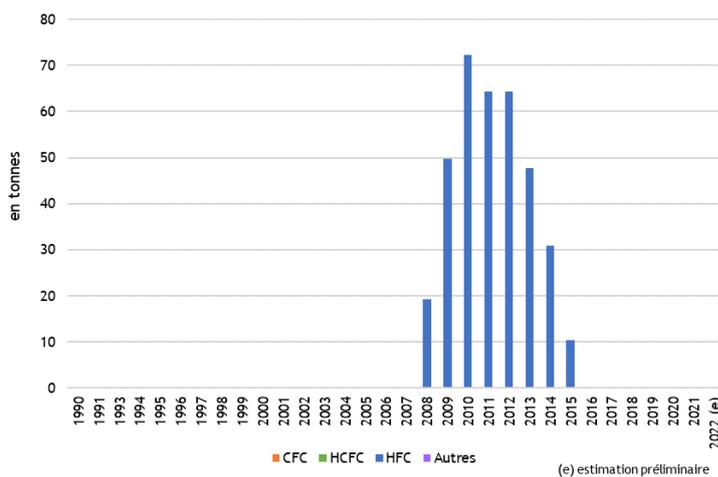


Figure 98 : Quantités requises pour le retrofit dans le secteur de la climatisation et PAC air/air fixe

3.3 Emissions

3.3.1 Emissions totales

Les émissions totales du secteur de la climatisation et PAC à air sont estimées à 950 tonnes pour 2021, en diminution de 2% par rapport à 2020. Comme la banque, les émissions sont dominées par le R-410A (75 %)(Tableau 83).

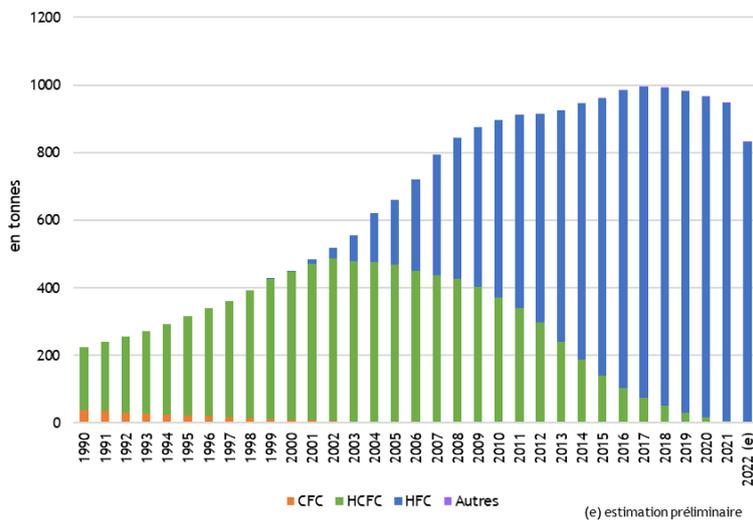


Tableau 83 : Emissions totales 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-12	0,0003
Total CFC	0,0003
R-22	5,9
Total HCFC	5,9
R-134a	1,9
R-32	121
R-407C	97
R-410A	715
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	5,9
Total HFC	941
R-290	2,2
Total Autres	2,2
Total général	949

Figure 99 : Emissions totales du secteur de la climatisation et PAC air/air fixe

Les émissions fugitives de la climatisation et PAC air/air fixe constituent environ 70 % des émissions du secteur. Les émissions de fin de vie des équipements de la climatisation et PAC air/air fixe représentent une part non négligeable des émissions totales (25 % en 2021), du fait, notamment des équipements de climatisation et chauffage domestique dont la filière de récupération est encore peu efficace.

3.3.2 Emissions CO₂ équivalentes

En équivalent CO₂, les émissions du secteur de la climatisation et PAC à air s'élèvent à 1,6 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 100) et des émissions totales (Figure 99) aient la même allure. Les émissions équivalentes CO₂ sont donc également dominées par le R-410A (PRG = 1924 selon le 5^{ème} rapport du GIEC) à 84 %.

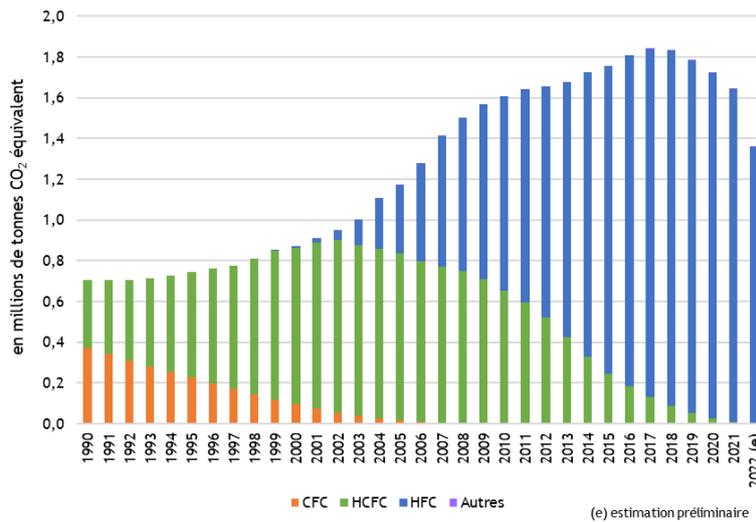


Tableau 84 : Emissions CO₂eq. 2021

Fluide frigorigène	2021 (en ktCO ₂ e)
R-12	0,003
Total CFC	0,003
R-22	10
Total HCFC	10
R-134a	2
R-32	82
R-407C	157
R-410A	1 376
R-417A - R-422A - R-422D - R427A (remplacement du R-22 PRG>2000)	13
Total HFC	1 631
R-290	0,01
Total Autres	0,01
Total général	1 641

Figure 100 : Emissions CO₂ équivalentes de la climatisation et PAC air/air fixe

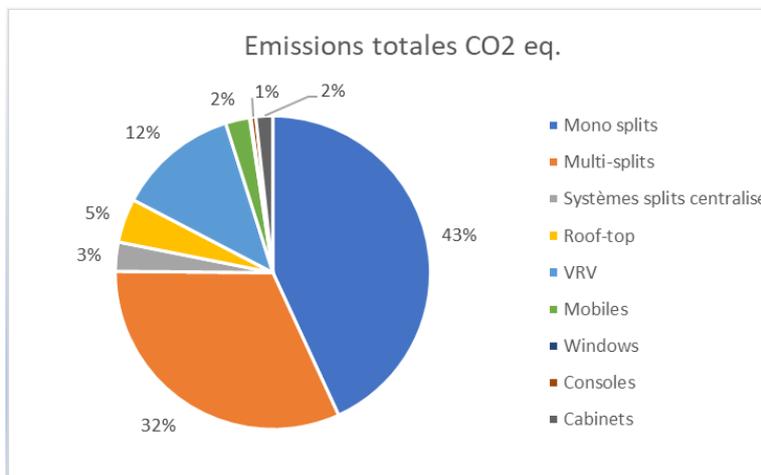


Figure 101 - répartition sectorielle des émissions CO₂ équivalentes de la climatisation & PAC à air en 2021

Les taux d'émissions des différents équipements étant assez proches et les PRG des fluides frigorigènes utilisés en climatisation et PAC à air étant de même ordre, l'allure sectorielle des émissions CO₂ équivalentes est assez proche de celle de la banque, dominée par les splits et multi-splits (Figure 101).

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 8]. Comme pour l'ensemble des équipements une courbe de durée de vie est prise en compte (Figure 102).

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 34] pour différentes gammes de puissance, 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 8] 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 35] et d'Uniclimate [Ref 34]. Ce marché a débuté en 2008.

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 8] 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 8] et plus récemment, d'Uniclimate. Par ailleurs, il est considéré que la charge des PAC 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 2021 sont présentées au Tableau 85.

Tableau 85 - charges nominales des PAC en 2021

Sous-secteur	Charge moyenne 2021 (kg)
PAC Air/Eau	2,6 pour le R-410A 2,3 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 [Ref 34].

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 [Ref 8]. 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 2021 sont présentées au tableau suivant.

Tableau 86 - Fluides frigorigènes utilisés sur le marché neuf des PAC en 2021

Sous-secteur	Fluides frigorigènes
PAC Air/Eau	55% R-410A / 42% R-32 / 3% R-290
PAC Eau/Eau	65% R-410A / 30% R-407C / 5% R-32
PAC Sol/Eau	65% R-410A / 30% R-407C / 5% R-32
PAC Sol/Sol	65% R-410A / 35% R-407C
CET	50% R-134a / 10% R-32 / 35% R-290 / 5% R-513A

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.

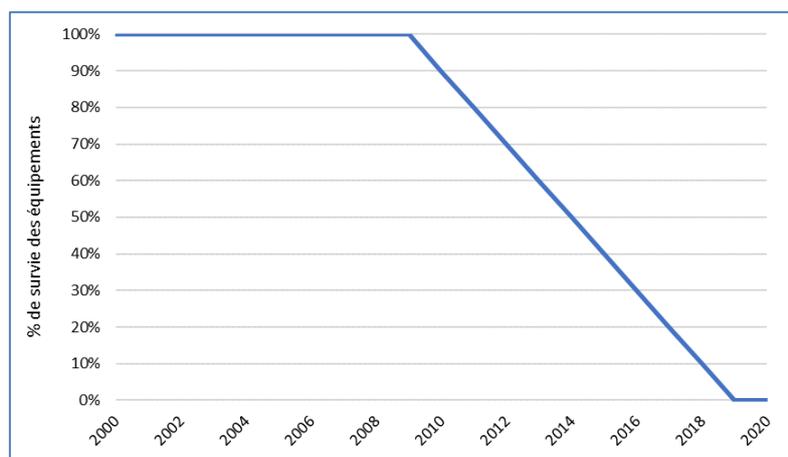


Figure 102 - Courbe de durée de vie des pompes à chaleurs réversibles

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 prises en compte (Figure 89).

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 %)

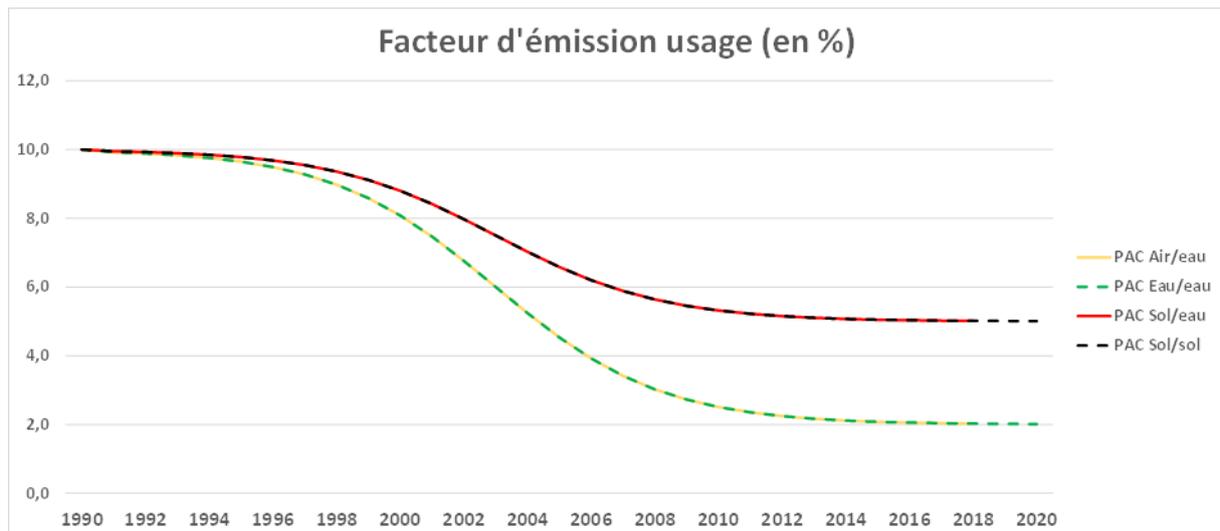


Figure 103 : Facteur d'émission fugitif - pompes à chaleurs réversibles (en %)

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 2021 (Figure 91).

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 92. L'efficacité de récupération de la filière est évaluée à 48 % en 2021.

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 4 400 tonnes en 2021. Elle représente actuellement seulement 7 % de la banque totale de fluides frigorigènes en France mais elle a augmenté de plus de 5% par an ces trois dernières années, du fait de la forte hausse du marché des PAC air/eau. Elle est dominée par le R-410A à 72 %. La progression des PAC utilisant le propane est relativement lente du fait des barrières règlementaires, la banque d'hydrocarbures ne représente que 1 % de la banque des PAC 2021.

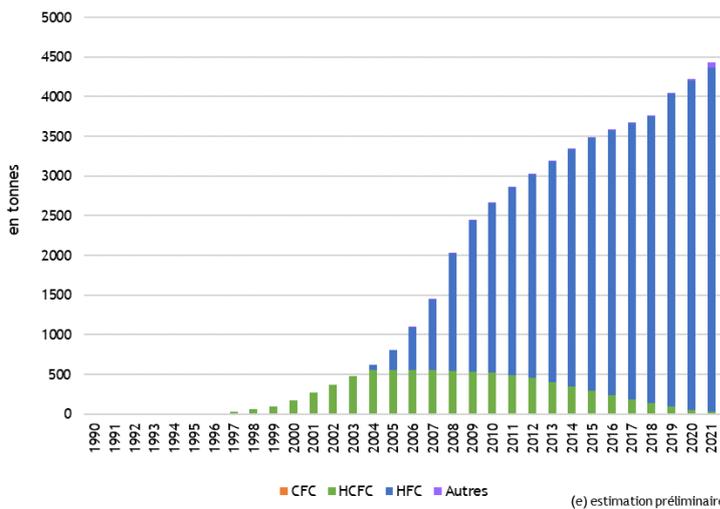


Figure 104 : Banque de fluide dans le secteur des pompes à chaleur

Tableau 87 : Banque de fluide 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-22	25
Total HCFC	25
R-134a	444
R-32	140
R-404A - R507 (PRG~3950)	25
R-407C	456
R-410A	3 178
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	43
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	60
Total HFC	4 345
R-290	58
R-744	0,6
Total Autres	59
Total général	4 429

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 (60 % du total des fluides). En 2021, cette quantité est faible, estimée à 130 tonnes.

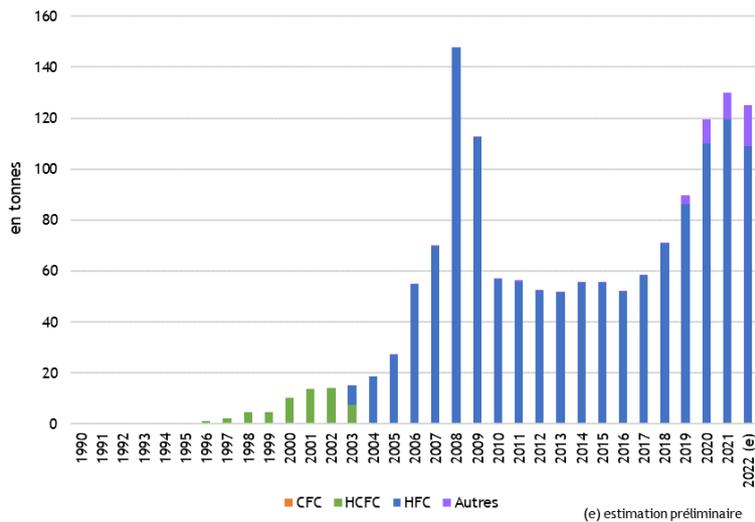


Figure 105 : Quantités requises à la production dans le secteur des pompes à chaleur

Tableau 88 : Besoin production 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	5,1
R-32	16
R-407C	0,3
R-410A	76
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	8,7
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	13
Total HFC	119
R-290	11
Total Autres	11
Total général	130

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 et est estimé à seulement 12 tonnes en 2021.

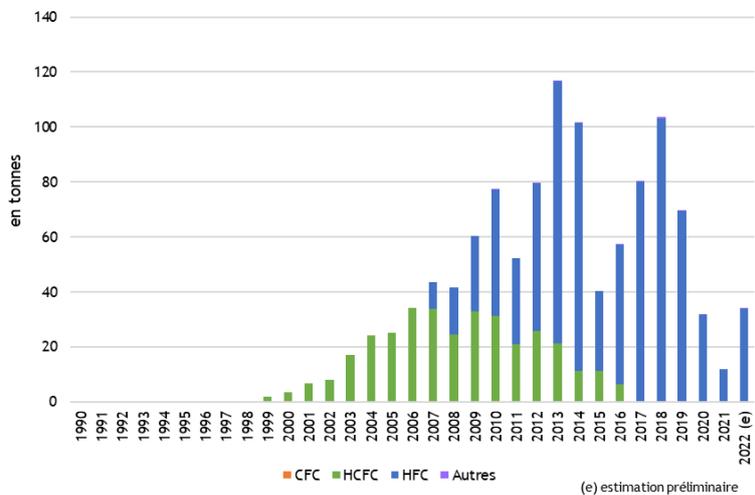


Figure 106 : Besoin pour la maintenance dans le secteur des pompes à chaleur

Tableau 89 : Quantités pour la maintenance 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	0,05
R-404A - R507 (PRG~3950)	0,4
R-407C	5,4
R-410A	6,1
Total HFC	12
Total général	12

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 a crû significativement seulement à partir de 2005. Avec une durée de vie moyenne de 15 ans, le nombre d'équipements parvenant à leur fin de commence à être significatif et la filière de fin de vie encore peu efficace. Les émissions présentées Figure 107 sont dominées par les émissions en fin de vie à 52 %. Les émissions totales, à l'image de la banque sont composées essentiellement de R-410A (70 %).

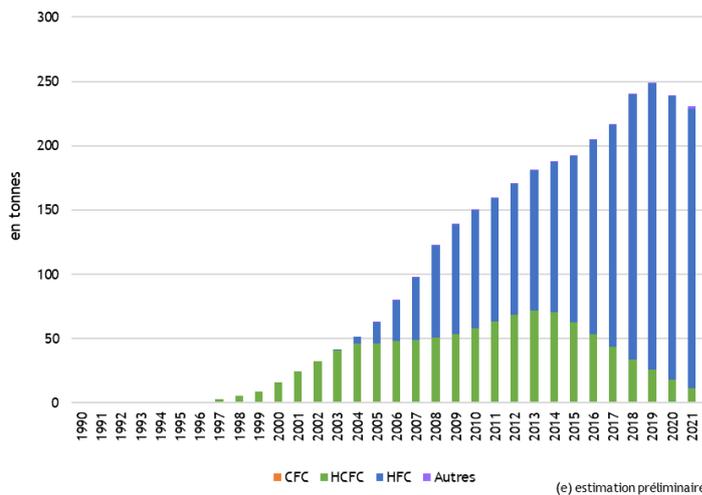


Figure 107 : Emissions totales du secteur des pompes à chaleur

Tableau 90 : Emissions totales 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-22	11
Total HCFC	11
R-134a	1,8
R-32	3,1
R-404A - R507 (PRG~3950)	1,4
R-407C	47
R-410A	161
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	1,0
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	1,5
Total HFC	218
R-290	1,6
R-744	0,05
Total Autres	1,6
Total général	230

3.3.2 Emissions CO₂ équivalentes

L'impact du secteur des PAC sur les émissions CO₂ équivalentes est faible, de seulement 420 000 tonnes, les parcs d'équipements arrivant en fin de vie étant encore peu nombreux et les charges nominales et taux d'émissions des équipements étant faibles.

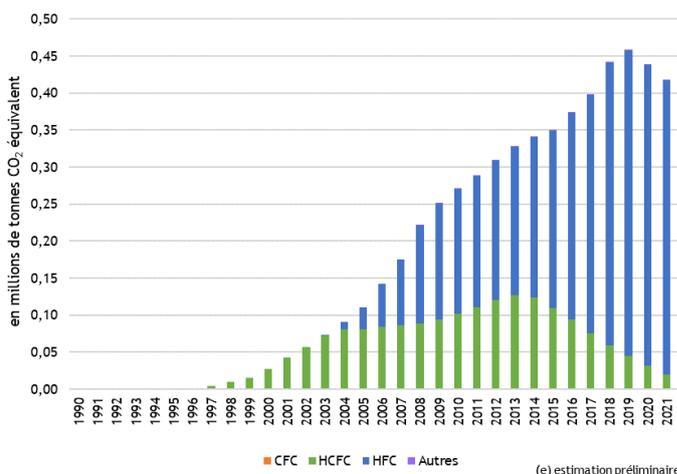


Figure 108 : Emissions CO₂ équivalentes des pompes à chaleur (millions de tonnes)

Tableau 91 : Emissions CO₂eq. 2021

Fluide frigorigène	2021 (en ktCO ₂ e)
R-22	20
Total HCFC	20
R-134a	2,4
R-32	2,1
R-404A - R507 (PRG~3950)	5,6
R-407C	77
R-410A	311
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	0,6
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	0,001
Total HFC	398
R-290	0,005
R-744	0,0001
Total Autres	0,005
Total général	418

X. 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 au Tableau 92.

Tableau 92 - 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 93. Elles sont cohérentes avec les hypothèses des précédentes études d'inventaires [Ref 8].

Tableau 93 - 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.

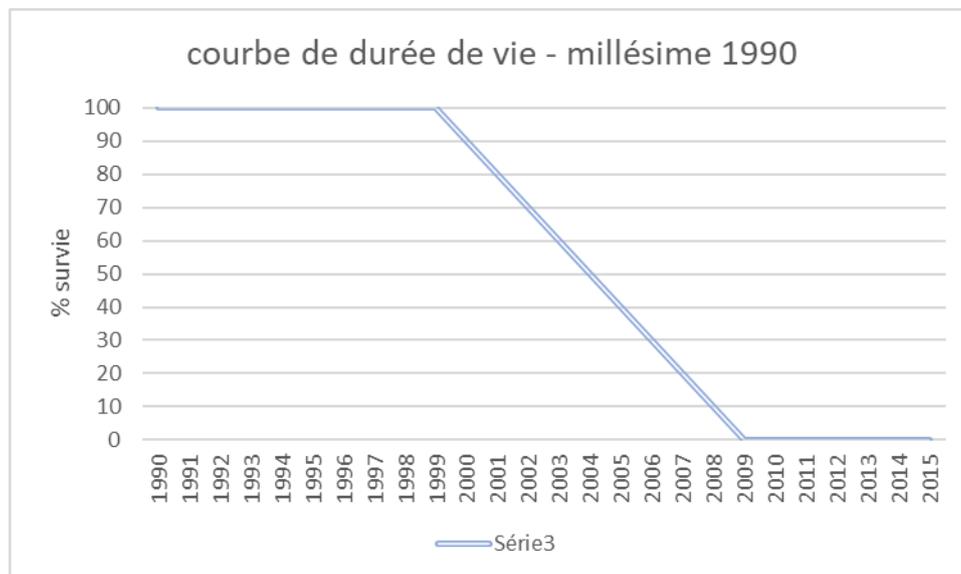


Figure 109 : Courbe de fin de vie climatisation automobile

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 36] 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 37] et [Ref 38].

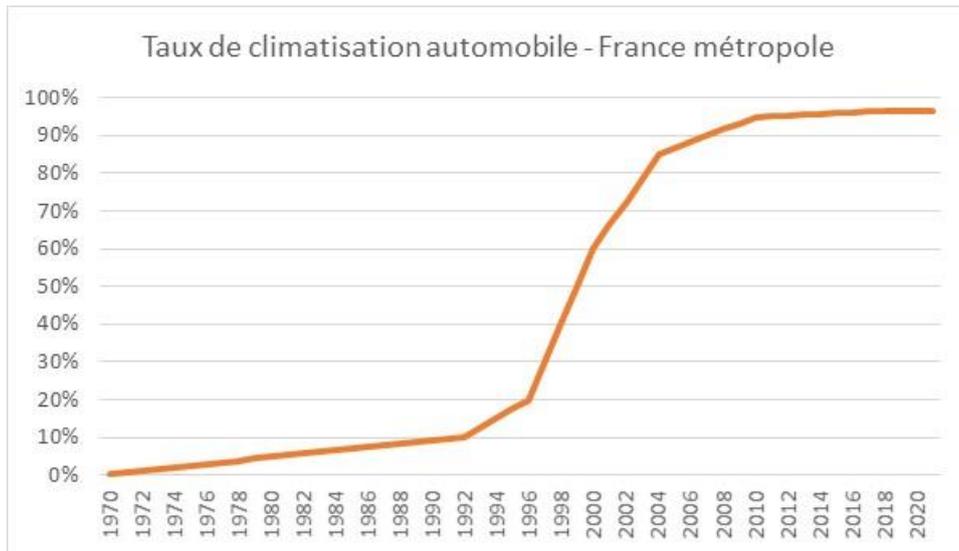


Figure 110 : Evolution du taux de climatisation automobile en France métropole (en %)

Véhicules industriels

Le marché de véhicules industriels supérieurs à 5t en France est connu par les données du CCFA [Ref 36] pour toute la période à partir de 1990.

Le taux de climatisation est supposé être identique à celui de la climatisation automobile (Figure 110) à la différence qu'il continue à progresser à partir de 2010 pour atteindre 99% en 2018 selon un fabricant [Ref 39].

Car et bus

Le marché de cars et bus en France est connu à l'aide des données du CCFA [Ref 36] 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 8] et de données fabricants [Ref 40]. La courbe ainsi générée conduit à un niveau de 80 % de véhicules climatisés mis sur le marché en 2021.

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 41].
- 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 8]) ;
 - 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 parisien [Ref 42] 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. Pour l'année 2021, les niveaux moyens de charge par application sont donnés au Tableau 94.

Tableau 94 - Charges nominales 2021 - Climatisation mobile

2021	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 43] et [Ref 44]) et des meilleures ventes de véhicules [Ref 36].

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 13] 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 2021. 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 13].

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 45] et de données fabricant [Ref 40].

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 42] 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) a 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 46] 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 47].

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. En 2021, il est considéré que 80% du marché est encore au R-134a.

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 2021]. 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 est le R-134a [Ref 42]. Depuis 2020, le R-32, le R-450A et le R-1234yf sont introduits sur le marché.

2.1.4 Durée de vie

Les courbes de durée de vie (Figure 111, Figure 112) 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.

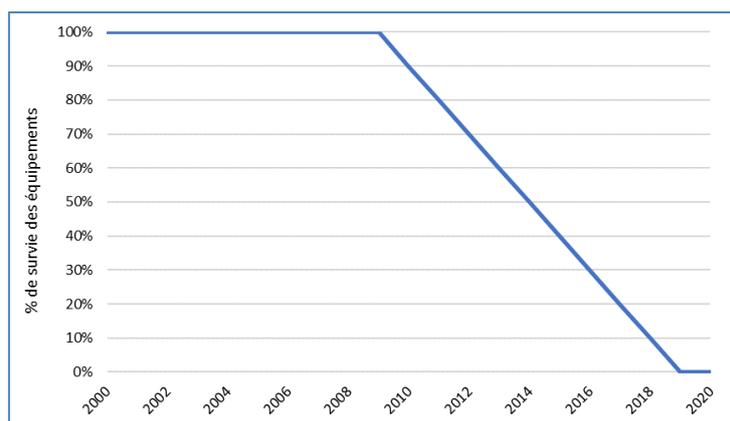


Figure 111 : Courbe de durée de vie des car, bus et du transport ferroviaire

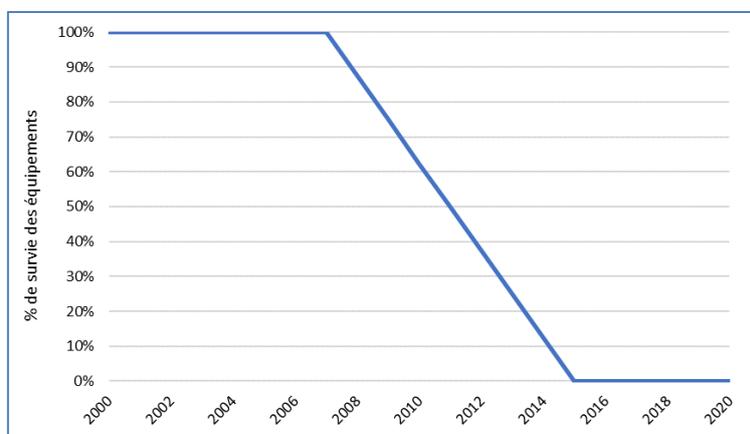


Figure 112 : Courbe de durée de vie de la climatisation et des véhicules industriels

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

2021	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 13].

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 13] 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 96

2021	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 13] :

Tableau 97 - 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%.

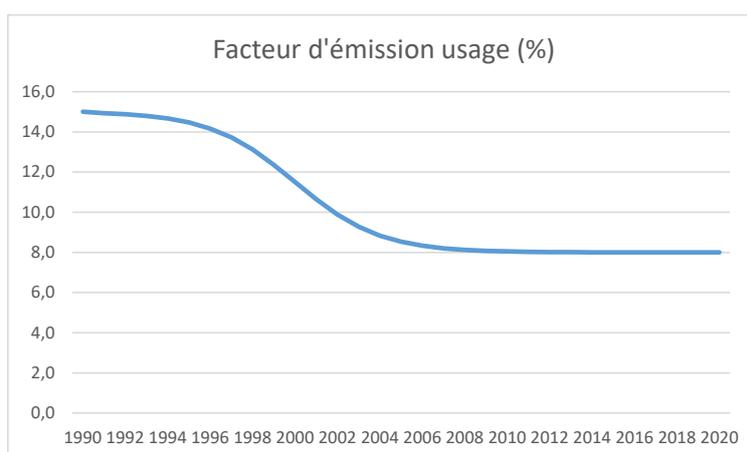


Figure 113 : Facteur d'émission fugitif des véhicules (en %) en moyenne sur la flotte de véhicules

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 48] : 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 8] 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 2021 restent à confirmer.

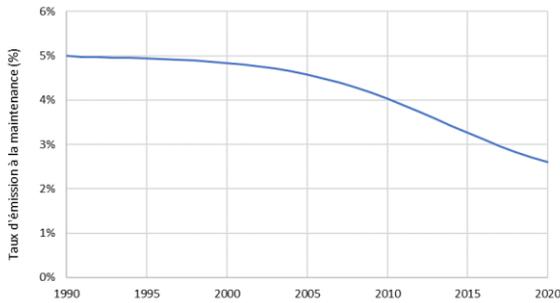


Figure 114 : Taux d'émission à la maintenance - Bus, cars et véhicules industriels

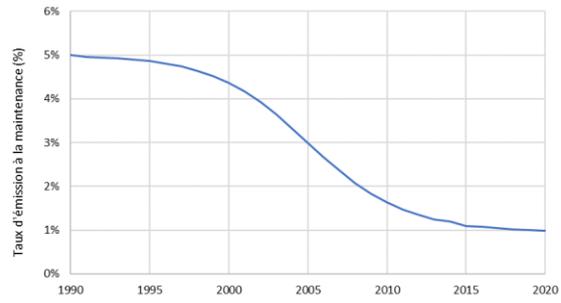


Figure 115 : Taux d'émission à la maintenance - Climatisation automobile et trains

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 98 - taux d'émission en fin de vie des véhicules automobiles en 2021

2021	Climatisation automobile	Véhicules industriels	Cars et bus	Trains
Facteur d'émission de fin de vie	44 %	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 8].

Le nombre de VHU traités chaque année est communiqué dans les rapports VHU de l'ADEME [Ref 49] de que 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 36]. 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 2019-2021 ont été estimés tendanciuellement, pour atteindre 56 % d'efficacité de récupération, tenant compte des exportations, en 2021.

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 8] 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 2021.

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 14 000 tonnes en 2021, 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 42 % de la banque de climatisation embarquée en 2021 (Tableau 99).

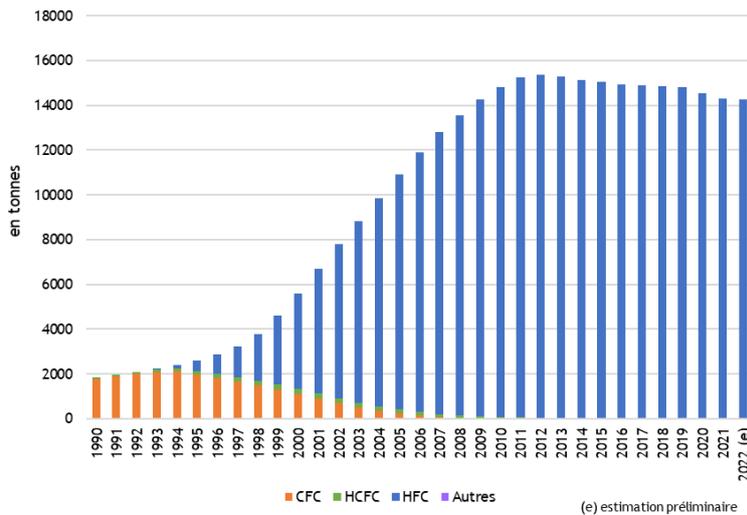


Figure 116 : Banque de fluides frigorigènes en France métropole dans le secteur de la climatisation automobile

Tableau 99 : Banque 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	8 023
R-32	12
R-407C	177
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	19
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	6 052
Total HFC	14 284
Total général	14 284

3.2 Demande

3.2.1 Besoin pour les équipements neufs

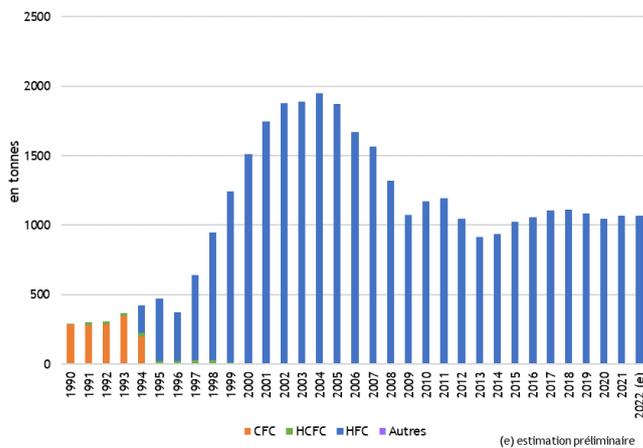


Figure 117 : Quantités nécessaires à la production dans le secteur de la climatisation mobile

Tableau 100 : production 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	304
R-32	7,1
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	14
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	740
Total HFC	1 065
Total général	1 065

La demande relative à la production dans le secteur de la climatisation automobile est dans sa totalité constituée de HFC, principalement de R-1234yf (70 % du total des fluides). En 2021, on estime le besoin pour la production à 1 065 tonnes.

3.2.2 Besoin pour la maintenance

Le besoin évalué pour la maintenance dans le secteur de la climatisation automobile est estimé à 500 tonnes en 2021. 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 posé à 60 % par hypothèse.

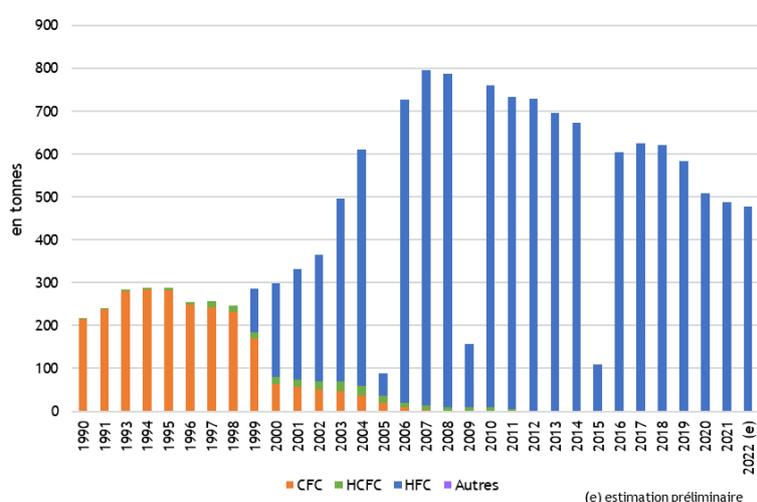


Tableau 101 : Besoin pour la maintenance 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	488
Total HFC	488
Total général	488

Figure 118 : Quantités requises pour la maintenance dans le secteur de la climatisation automobile

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 1 650 tonnes en 2021. Désormais, 30% des émissions du secteur sont des émissions de 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.

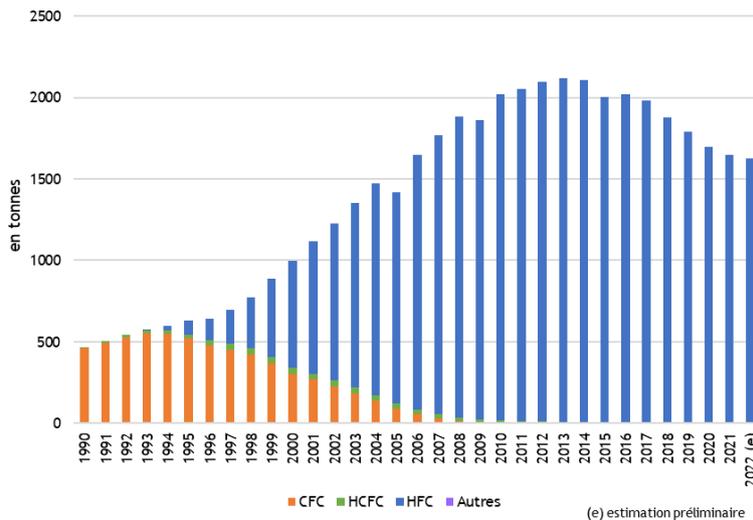


Figure 119 : Emissions totales du secteur de la climatisation mobile

Tableau 102 : Emissions totales 2021

Fluide frigorigène	2021 (en t)
R-134a	1 147
R-32	0,7
R-407C	11
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	1,2
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	489
Total HFC	1 649
Total général	1 649

3.3.2 Emissions CO₂ équivalentes

La pénétration du R-1234yf sur le parc automobile impacte très significativement les émissions CO₂ équivalentes du secteur, en baisse de 10% par an sur les 4 dernières années.

Les émissions de R-1234yf représentant en 2021 près d'un quart des émissions du secteur, CO₂ équivalentes de 630 000 tonnes de CO₂ équivalent. Par conséquent, la transition du R-134a au R-1234yf permet de réduire les émissions de clim auto d'environ 30 % en 2021.

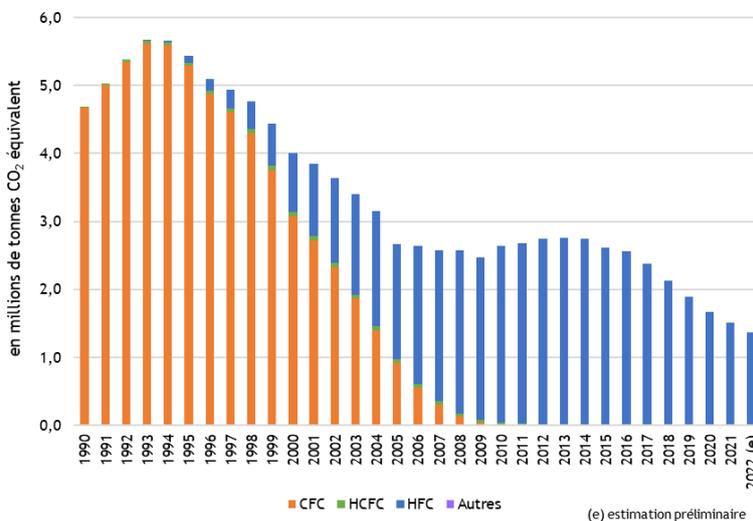


Figure 120 : Emissions CO₂ équivalentes de la climatisation automobile (millions de tonnes)

Tableau 103 : Emissions CO₂eq. 2021

Fluide frigorigène	2021 (en ktCO ₂ e)
R-134a	1 491
R-32	0,5
R-407C	18
R-513A - R-513B - R-450A - R-456A (PRG~600)	0,7
HFO (R-1234yf - R-1234ze - R-1233zd)	0,5
Total HFC	1 510
Total général	1 510

XI. Annexes

1. PRG donnés par le 4^{ème} & 5^{ème} rapport du GIEC (AR4 - AR5)

Tableau 104 - PRG des fluides frigorigènes pris en compte dans le calcul

Réfrigérant	PRG4	PRG5
R-11	4 750	4 660
R-12	10 900	10 200
R-1233zd	5	5
R-1234yf	4	1
R-1234ze	7	1
R-125	3 500	3 170
R-134a	1 430	1 300
R-143a	4 470	4 800
R-152a	124	138
R-22	1 810	1 760
R-290	3	3
R-32	675	677
R-401A	975	951
R-404A	3 922	3 943
R-407A	2 107	1 923
R-407C	1 774	1 624
R-407F	1 825	1 674
R-408A	3 152	3 257
R-410A	2 088	1 924
R-417A	2 346	2 127
R-422A	3 143	2 847
R-422D	2 729	2 473
R-427A	2 138	2 024
R-448A	1 387	1 273
R-449A	1 397	1 282
R-450A	605	547
R-452A	2 140	1 945
R-454C	148	146
R-455A	148	146
R-456A	687	626
R-502	4 657	4 786
R-507	3 985	3 985
R-513A	631	573
R-513B	596	540
R-600a	3	3
R-717	0	0
R-744	1	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 »).

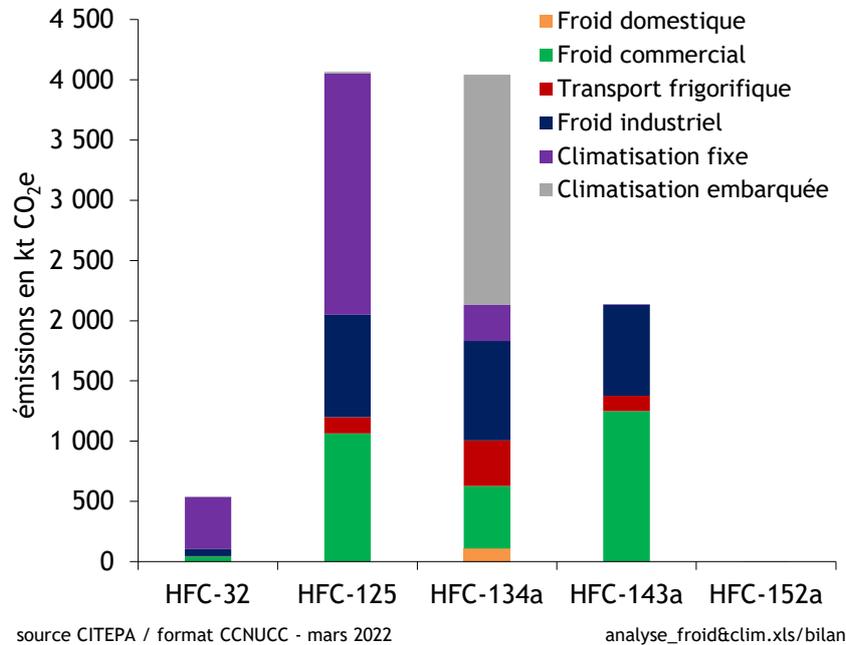
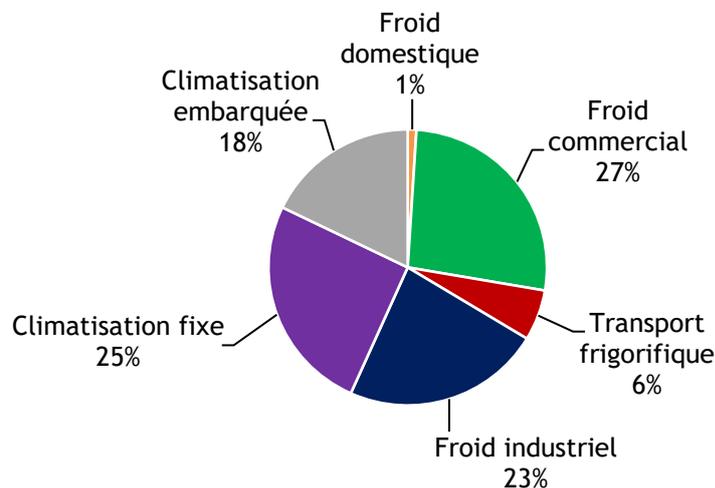


Figure 121 - Distribution des émissions de HFC en CO₂e du CRF 2F1 en 2021 (périmètre Kyoto)



source CITEPA / format CCNUCC - mars 2022

analyse_froid&clim.xls/bilan

Figure 122 - Contribution des secteurs aux émissions de HFC en CO₂e de la catégorie CRF 2F1 en 2021 (périmètre Kyoto)

3. Acronymes et abréviations

AR4	Assessment Report 4 (4 ^{ème} rapport du GIEC)
AR5	Assessment Report 5 (5 ^{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.....	9
Figure 3 - Principes de la méthode de calcul des émissions de fluides frigorigènes	14
Figure 4 - Répartition des émissions de GES en 2021 (Métropole & territoires d'outre mer compris dans l'Europe)	18
Figure 5 - Répartition sectorielle des gaz fluorés en 2021 (Métropole)	18
Figure 6 - 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>	18
Figure 7 - Evolution des émissions de gaz fluorés (HFC, PFC, SF ₆ , NF ₃) en France de 1990 à 2021, Périmètre Kyoto (France métropole et territoires d'Outre-mer inclus dans l'UE). <i>Source : Citepa, rapport CNUCC 2023.</i>	19
Figure 8 - Evolution de la banque totale de fluides frigorigènes en France métropole	20
Figure 9 - Répartition sectorielle de la banque de R-134a en 2021 en France métropole.....	20
Figure 10 - Répartition sectorielle de la banque de HFC en France métropole en 2021.	21
Figure 11 - Répartition sectorielle de la banque équivalente CO ₂ de HFC en France métropole en 2021	21
Figure 12 - Evolution en tonnes des émissions de fluides frigorigènes en France métropole (1990-2022)	22
Figure 13 - Répartition sectorielle des émissions de HFC (en tonnes) en France métropole en 2021	22
Figure 14 - Evolution, en tonnes de CO ₂ équivalent, des émissions de fluides frigorigènes en France métropole	24
Figure 15 - Répartition sectorielle des émissions CO ₂ équivalentes de HFC en France métropole en 2021	24
Figure 16 - Evolution des parts sectorielles des émissions CO ₂ équivalentes de fluides frigorigènes .	24
Figure 17 - Demande totale en fluides frigorigènes pour la France métropole	25
Figure 18 - Besoin en fluides frigorigènes pour la production d'équipements pré-chargés en France métropole	26
Figure 19 - Besoin en fluides frigorigènes pour la charge d'équipements sur site en France métropole	26
Figure 20 - Evolution du besoin estimé pour la maintenance des installations sur le parc d'équipements en France.....	27
Figure 21 - Evolution du besoin estimé pour le retrofit des installations utilisant des HFC à fort PRG en France.....	27
Figure 22 - Comparaison de la demande totale calculée aux marchés déclarés au SNEFCCA.....	28
Figure 23 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-410A.....	29
Figure 24 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-407C.....	29
Figure 25 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-134a.....	29
Figure 26 - Comparaison de la demande calculée et du marché déclarée de R-404A.....	29
Figure 27 - Comparaison des données sur la récupération en France métropole	30
Figure 28 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés sur le marché des réfrigérateurs domestiques	35
Figure 29 : Banque de fluide dans le secteur du froid domestique	38
Figure 30 : Demande en fluides frigorigènes pour la production dans le secteur du froid domestique	39
Figure 31 : Emissions totales du froid domestique	39
Figure 32 : Emissions CO ₂ équivalentes du froid domestique (millions de tonnes)	40
Figure 33 - courbe de durée de vie des équipements du froid commercial	43
Figure 34 : Ratios de charge surfacique en supermarchés et hypermarchés	45

Figure 35 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les nouvelles installations des hypermarchés	46
Figure 36 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés en supermarchés	47
Figure 37 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les petits commerces (groupes de condensation).....	47
Figure 38 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les petits commerces (groupes hermétiques)	48
Figure 39 : Courbe de durée de vie pour le froid commercial	48
Figure 40 : Taux d'émission à la maintenance - Froid commercial.....	50
Figure 41 : Efficacité de récupération en fin de vie des équipements dans le secteur du froid commercial	51
Figure 42 : Banque de fluide dans le secteur du froid commercial	52
Figure 43 : Quantités requises pour la production d'équipements en France dans le secteur du froid commercial	53
Figure 44 : Besoin en fluides frigorigènes pour la charge sur site des équipements neufs pour le secteur du froid commercial	53
Figure 45 : Besoin en fluides frigorigènes pour la maintenance du parc d'installations dans le secteur du froid commercial	54
Figure 46 : Besoin en fluides frigorigènes pour le retrofit d'installations dans le secteur du froid commercial	54
Figure 47 : Emissions totales du froid commercial	55
Figure 48 : Emissions CO ₂ équivalentes du froid commercial (millions de tonnes)	55
Figure 49 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les systèmes poulie courroie	60
Figure 50 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les systèmes semi-remorques	60
Figure 51 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les conteneurs frigorifiques (transport maritime).....	61
Figure 52 : Courbe de durée de vie pour les reefers.....	62
Figure 53 : Courbe de durée de vie pour les conteneurs frigorifiques.....	62
Figure 54 : Courbe de durée de vie pour le transport frigorifique routier.....	62
Figure 55 : Taux d'émissions à la maintenance - transports frigorifiques	64
Figure 56 : Banque de fluide dans le secteur du transport frigorifique	65
Figure 57 : Quantités nécessaires à la production dans le secteur du transport frigorifique	66
Figure 58 : Quantités nécessaires à la charge des équipements sur site pour le secteur du transport frigorifique.....	66
Figure 59 : Besoin pour la maintenance dans le secteur du transport frigorifique	67
Figure 60 : Emissions totales du transport frigorifique	67
Figure 61 : Emissions CO ₂ équivalentes du transport frigorifique (millions de tonnes)	68
Figure 62 : Ratio de charge équivalent - Exemple de l'industrie laitière	73
Figure 63 - Evolution des réfrigérants utilisés dans les installations neuves de l'industrie du lait	74
Figure 64 - Evolution des réfrigérants utilisés dans les installations neuves de l'industrie de la viande	75
Figure 65 : Courbe de durée de vie pour le froid industriel	75
Figure 66 : Taux d'émission à la maintenance - Froid industriel	77
Figure 67 : Banque de fluide dans le secteur du froid industriel.....	78
Figure 68 : Besoin en fluides frigorigènes pour les installations neuves du froid industriel	79
Figure 69 : Quantités requises pour la maintenance dans le secteur du froid industriel	79
Figure 70 : Besoin pour le retrofit dans le secteur du froid industriel	80
Figure 71 - Emissions totales du froid industriel.....	80
Figure 72 : Emissions CO ₂ équivalentes du froid industriel (millions de tonnes).....	81
Figure 73 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés par gamme de chillers	86
Figure 74 : Courbe de durée de vie des chillers de petites et moyennes puissances.....	86

Figure 75 : Facteur d'émission à la charge des chillers (en %)	87
Figure 76 : Facteur d'émission pendant la durée de vie - chillers (en %)	87
Figure 77 : Taux d'émission à la maintenance - Compresseurs centrifuges	88
Figure 78 : Taux d'émission à la maintenance - Chillers de petites, moyennes et grandes puissances	88
Figure 79 : Efficacité de récupération en fin de vie des chillers (en %)	89
Figure 80 : Banque de fluide dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)	90
Figure 81 : Quantités nécessaires à la production des groupes refroidisseurs à eau (GRE) en France métropole.	91
Figure 82 - Besoin pour la maintenance dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)	91
Figure 83 - Besoin pour le retrofit dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)	92
Figure 84 : Emissions totales du secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)	92
Figure 85 : Emissions CO ₂ équivalentes des groupes refroidisseurs à eau (GRE) (millions de tonnes)	93
Figure 86 - Evolution de la charge des systèmes splits centralisés	98
Figure 87 : 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	101
Figure 88 : Courbe de durée de vie des climatiseurs fenêtres et climatiseurs mobiles	101
Figure 89 : Facteur d'émission à la charge (en %) des équipements de climatisation à air	102
Figure 90 : Facteur d'émission pendant la durée de vie - PAC air/air et climatisation fixe (en %) .	102
Figure 91 - Taux d'émissions à la maintenance des équipements de climatisation à air	103
Figure 92 : Efficacité de récupération en fin de vie (en %) des équipements de la climatisation et PAC à air	104
Figure 93 : Répartition sectorielle de la banque de fluides frigorigènes du secteur de la climatisation à air et PAC air/air	105
Figure 94 - Répartition sectorielle de la banque 2021 de la climatisation à air et PAC air/air	105
Figure 95 : Quantités nécessaires à la charge des équipements de la climatisation fixe	106
Figure 96 : Quantités nécessaires à la production dans le secteur de la climatisation et PAC air/air fixe	106
Figure 97 : Quantités nécessaires à la maintenance dans le secteur de la climatisation et PAC air/air fixe	107
Figure 98 : Quantités requises pour le retrofit dans le secteur de la climatisation et PAC air/air fixe	107
Figure 99 : Emissions totales du secteur de la climatisation et PAC air/air fixe	108
Figure 100 : Emissions CO ₂ équivalentes de la climatisation et PAC air/air fixe	109
Figure 101 - répartition sectorielle des émissions CO ₂ équivalentes de la climatisation & PAC à air en 2021	109
Figure 102 - Courbe de durée de vie des pompes à chaleurs réversibles	113
Figure 103 : Facteur d'émission fugitif - pompes à chaleurs réversibles (en %)	114
Figure 104 : Banque de fluide dans le secteur des pompes à chaleur	115
Figure 105 : Quantités requises à la production dans le secteur des pompes à chaleur	116
Figure 106 : Besoin pour la maintenance dans le secteur des pompes à chaleur	116
Figure 107 : Emissions totales du secteur des pompes à chaleur	117
Figure 108 : Emissions CO ₂ équivalentes des pompes à chaleur (millions de tonnes)	117
Figure 109 : Courbe de fin de vie climatisation automobile	120
Figure 110 : Evolution du taux de climatisation automobile en France métropole (en %)	121
Figure 111 : Courbe de durée vie des car, bus et du transport ferroviaire	124
Figure 112 : Courbe de durée de vie de la climatisation et des véhicules industriels	124
Figure 113 : Facteur d'émission fugitif des véhicules (en %) en moyenne sur la flotte de véhicules	126
Figure 114 : Taux d'émission à la maintenance - Bus, cars et véhicules industriels	127
Figure 115 : Taux d'émission à la maintenance - Climatisation automobile et trains	127
Figure 116 : Banque de fluides frigorigènes en France métropole dans le secteur de la climatisation automobile	129

Figure 117 : Quantités nécessaires à la production dans le secteur de la climatisation mobile	129
Figure 118 : Quantités requises pour la maintenance dans le secteur de la climatisation automobile	130
Figure 119 : Emissions totales du secteur de la climatisation mobile	131
Figure 120 : Emissions CO ₂ équivalentes de la climatisation automobile (millions de tonnes)	131
Figure 121 - Distribution des émissions de HFC en CO ₂ e du CRF 2F1 en 2021 (périmètre Kyoto)....	134
Figure 122 - Contribution des secteurs aux émissions de HFC en CO ₂ e de la catégorie CRF 2F1 en 2021 (périmètre Kyoto).....	134

5. Table des tableaux

Tableau 1 - Evolution des PRG des principaux CFC, HCFC et HFC utilisés en réfrigération et climatisation [Ref 6].....	11
Tableau 2 - Structure de la base de données des secteurs du froid et de la climatisation.....	12
Tableau 3 - Données d'activité nécessaires par application et par an pour le calcul des émissions de réfrigérants	15
Tableau 4 - Banque 2021	20
Tableau 5 - Emissions 2021	22
Tableau 6 - Emissions CO ₂ eq. 2021	24
Tableau 7 - Demande 2021	25
Tableau 8 - Production 2021.....	26
Tableau 9 - Charge 2021	26
Tableau 10 - Besoin maintenance 2021	27
Tableau 11 - Besoin retrofit 2021	27
Tableau 12 - Marchés d'équipements du secteur de froid domestique	33
Tableau 13 - Estimation des productions d'équipements du secteur de froid domestique.....	33
Tableau 14 - Hypothèses de charges nominales des équipements de froid domestiques en 2021.....	34
Tableau 15 - Facteur d'émission à la charge des équipements de froid domestique	36
Tableau 16 - facteur d'émission fugitif des équipements de froid domestique.....	36
Tableau 17 - Facteur d'émission de fin de vie des équipements de froid domestique.....	37
Tableau 18 : Banque de fluide 2021	38
Tableau 19 : Production 2021	39
Tableau 20 : Emissions totales 2021	39
Tableau 21 : Emissions CO ₂ eq. 2021	40
Tableau 22 - Catégories de magasin prises en compte dans les équipements des petits commerces	42
Tableau 23 - Modes de maintenance des équipements de froid commercial.....	43
Tableau 24 - Parcs de magasins.....	44
Tableau 25 - Charges moyennes en super et hypermarchés	45
Tableau 26 - Charges moyennes des équipements par type de petits commerces	45
Tableau 27 - hypothèses de facteurs d'émission à la charge des équipements de froid commercial .	49
Tableau 28 - Hypothèses de facteurs d'émission fugitifs - secteur du froid commercial	49
Tableau 29 - Hypothèses de facteurs d'émission fin de vie - secteur du froid commercial	51
Tableau 30 : Banque 2021	52
Tableau 31 : Production 2021	53
Tableau 32 : Charges 2021	53
Tableau 33 : Quantités pour la maintenance 2021	54
Tableau 34 : Quantités pour le retrofit 2021.....	54
Tableau 35 : Emissions totales 2021	55
Tableau 36 : Emissions CO ₂ eq. 2021	55
Tableau 37 - prise en compte de la maintenance dans la méthode de calcul pour le transport frigorifique.....	57
Tableau 38 : Marchés des groupes frigorifiques pour le transport routier	58
Tableau 39 : Productions estimées des groupes frigorifiques pour le transport routier	59
Tableau 40 : Flotte mondiale de navires réfrigérés et de conteneurs frigorifiques	59
Tableau 41 - Evolution des niveaux de charge nominale des équipements frigorifiques du transport routier	59
Tableau 42 - charges nominales des équipements frigorifiques du transport maritime	59
Tableau 43 - Facteurs d'émissions à la charge pour le transport frigorifique	63

Tableau 44 - Facteurs d'émissions fugitives 2021 pour les applications du transport frigorifique	63
Tableau 45 - Facteurs d'émission en fin de vie des équipements du transport frigorifique.....	64
Tableau 46 : Banque 2021	65
Tableau 47 : production 2021	66
Tableau 48 : charges sur site 2021	66
Tableau 49 : Quantités pour la maintenance 2021	67
Tableau 50 : Emissions totales 2021	67
Tableau 51 : Emissions CO ₂ eq. 2021	68
Tableau 52 - Répartition des surfaces d'entrepôts frigorifiques en France - Insee 2012	72
Tableau 53 - Ratios frigorifiques caractéristiques par application.....	73
Tableau 54 - facteur d'émission à la charge des installations de froid industriel	76
Tableau 55 - Facteurs d'émissions fugitives par application du froid industriel pour 2021	76
Tableau 56 - Facteurs d'émissions 2021 en fin de vie des équipements du froid industriel.....	77
Tableau 57 : Banque 2021	78
Tableau 58 : Charges sur site 2021	79
Tableau 59 : Quantités pour la maintenance 2021	79
Tableau 60 - Besoin retrofit 2021	80
Tableau 61 : Emissions totales 2021	80
Tableau 62 : Emissions CO ₂ eq. 2021	81
Tableau 63 - rythme de maintenance des Chillers	83
Tableau 64 - durée de vie moyenne des chillers	83
Tableau 65 - ratios de charge par gamme de chillers en 2021	85
Tableau 66 - fluides frigorigènes utilisés sur le marché des chillers en 2021	85
Tableau 67 : Banque de fluide 2021	90
Tableau 68 : Production 2021	91
Tableau 69 : Quantités pour la maintenance 2021	91
Tableau 70 : Besoin retrofit 2021	92
Tableau 71 : Emissions totales 2021	92
Tableau 72 : Emissions CO ₂ eq. 2021	93
Tableau 73 - modes de charge des équipements de climatisation à air.....	95
Tableau 74 - Modes de maintenance des équipements de climatisation à air	96
Tableau 75 - Durées de vie moyenne des équipements de climatisation à air	96
Tableau 76 - hypothèses de charge nominale constante pour certains équipements de climatisation à air	98
Tableau 77 - charges nominales 2021 des équipements de climatisation à air	99
Tableau 78 - Fluides frigorigènes utilisés sur les marchés neufs des équipements de climatisation à air en 2021	100
Tableau 79 : Banque de fluide 2021	105
Tableau 80 : Besoin pour la charge 2021	106
Tableau 81 : Besoin pour la production 2021	106
Tableau 82 : Quantités pour la maintenance 2021	107
Tableau 83 : Emissions totales 2021	108
Tableau 84 : Emissions CO ₂ eq. 2021	109
Tableau 85 - charges nominales des PAC en 2021	112
Tableau 86 - Fluides frigorigènes utilisés sur le marché neuf des PAC en 2021	113
Tableau 87 : Banque de fluide 2021	115
Tableau 88 : Besoin production 2021.....	116
Tableau 89 : Quantités pour la maintenance 2021	116
Tableau 90 : Emissions totales 2021	117
Tableau 91 : Emissions CO ₂ eq. 2021	117

Tableau 92 - hypothèses concernant les conditions de maintenance des systèmes de climatisation automobile.....	119
Tableau 93 - Durées de vie moyennes par sous-secteur de la climatisation automobile	119
Tableau 94 - Charges nominales 2021 - Climatisation mobile	122
Tableau 95 - facteurs d'émissions à la charge des systèmes de climatisations automobiles.....	125
Tableau 96	125
Tableau 97 - Données GIEC sur les taux d'émission fugitifs en climatisation automobile	126
Tableau 98 - taux d'émission en fin de vie des véhicules automobiles en 2021	127
Tableau 99 : Banque 2021	129
Tableau 100 : production 2021.....	129
Tableau 101 : Besoin pour la maintenance 2021	130
Tableau 102 : Emissions totales 2021	131
Tableau 103 : Emissions CO ₂ eq. 2021	131
Tableau 104 - PRG des fluides frigorigènes pris en compte dans le calcul	133

6. Références bibliographiques

Ref 2 - Rapport d'inventaire d'émissions de fluides frigorigènes pour la France métropole. Résultats 2020 et estimation provisoire 2021. Citepa - AFCE. Juin 2022. [Rapport AFCE - Inventaire des émissions de fluides frigorigènes - AFCE - Alliance Froid Climatisation Environnement](#)

Ref 3 - Lignes directrices du GIEC 2006 & Raffinements 2019 (Chapter 7: Emissions of Fluorinated Substitutes for Ozone Depleting Substances)

Ref 4 - Thèse Sabine Saba, MINES-ParisTech, 2009 Global inventories and direct emissions estimation of greenhouse gases of the refrigeration systems

Ref 5 - RTOC 2018 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 6 - Synthèse des PRG données par les 2nd, 4^{ème} et 5^{ème} rapport du GIEC
https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf

Ref 7 - Gifam (Groupement des marques d'appareils pour la maison).
<https://www.gifam.fr/accueil/gem/refrigerateur/#chiffres-clc>

Ref 8 - 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 9 - WHIRLPOOL - Communication interne

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

Ref 11 - Eurocave - Communication interne

Ref 12 - Enquête terrain Citepa - fluide frigorigène équipements domestiques

Ref 13 - Lignes directrices du GIEC 2006 - Volume 3 - Chapitre 7 - Tableaux 7.9

Ref 14 - ADEME - Rapports annuels Equipement Electriques et Electroniques

Ref 15 - Nielsen - Retour sur 40 ans de distribution française

Ref 16 - INSEE - Les points de vente du commerce de détail 1982 à 1992

Ref 17 - INSEE - Base de données : évolution du commerce 1992 - 2004

Ref 18 - INSEE - Base de données : hyper super 2004 à 2009

Ref 19 - INSEE - Enquête d'établissement dans le commerce 1980

Ref 20 - ACOSS - Les dénombrements annuels selon la NAF 732

Ref 21 - LSA - Communication de Dominique Amar pour le Citepa.

Ref 22 - Perifem - Communication interne

Ref 23 - European Partnership for Energy and the Environment - Communication interne

Ref 24 - RTOC 1998 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 25 - Lignes directrices du GIEC 1996 - Volume 3 - Chapitre 2.17

Ref 26 - 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 27 - Fédération Française de Carrosserie (FFC) - Communication interne

Ref 28 - Container Handbook

Ref 29 - Petit Forestier - Communication interne

Ref 30 - RTOC 2002 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 31 - Annuaire du Syndicat National des patinoires,
<https://www.syndicatdespatinoires.com/annuaire/>

Ref 32 - FAO (Food and Agriculture Organization of the united Nations), statistics Division,
<http://www.fao.org/faostat/fr/#home>

Ref 33 - Informations d'experts - Daikin et Denis Clodic

Ref 34 - Uniclimate - extractions annuelles de données internes

Ref 35 - AFPAC - La Pompe à Chaleur : De nos ambitions 2030 à nos perspectives 2050 - Mars 2018

Ref 36 - CCFA - Rapports annuels Analyse statistiques

Ref 37 - PSA - Communication interne

Ref 38 - Renault - Communication interne

Ref 39 - Scania - Communication interne

Ref 40 - Iveco - Communication interne

Ref 41 - CGDD - Chiffres clés du transport - Edition 2019

Ref 42 - RATP - Communication interne

Ref 43 - Base Behr Hella Service - Quantité de remplissage d'huile et réfrigérant VL/VUL/PL

Ref 44 - NRF - Airconditioning Filling Chart - R134a/R1234yf

Ref 45 - RTOC 2014 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 46 - RTOC 1998 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 47 - Renault - Communication interne

Ref 48 - RTOC 2010 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 49 - ADEME - Rapports annuels Automobile (VHU)

Ref 50 - Rapport d'inventaire AFCE / Citepa, 2022. Inventaire des émissions de fluides frigorigènes pour la France métropole. Résultats 2020 et estimation provisoire 2021.

Ref 51 - Entretien avec M.Doucet SYNEG (Union des fabricants d'équipements et d'ustensiles pour la restauration et les arts culinaires), Avril 2023.

Ref 52 - Interview Marie-Line Moutel-Hornung, groupe Serap, novembre 2022.

Ref 53 - Communications de Jean-Michel Carré, Lennox, pour le Citepa.



© Citepa 2023
www.citepa.org
infos@citepa.org
42, rue de Paradis
75010 PARIS