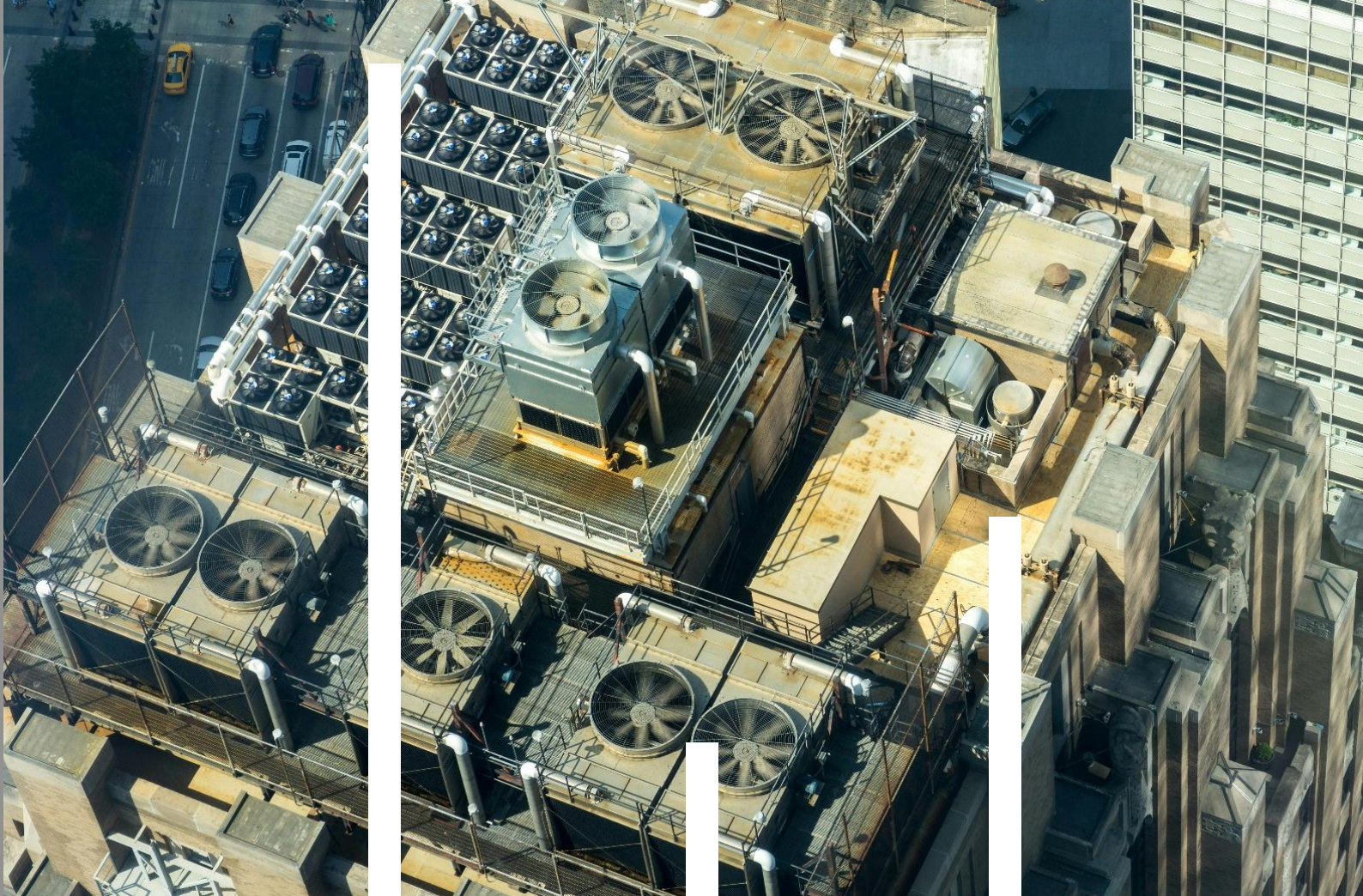




Rapport Fluides frigorigènes

Septembre 2025

INVENTAIRE DES EMISSIONS DE FLUIDES
FRIGORIGENES POUR LA FRANCE
METROPOLE

RESULTATS 2023 ET ESTIMATION PROVISoire
2024



Promouvoir
une attitude
responsable



RÉDACTION

	Prénom, nom	Fonction au sein du Citepa
Coordinateur	Stéphanie Barrault	Responsable de Département & Experte gaz fluorés
Rédacteur principal	Ariane Druart	Responsable Traitement de données

VÉRIFICATION

	Nom	Fonction au sein du Citepa
Validation	Stéphanie Barrault	Responsable de Département & Experte gaz fluorés

Pour citer ce document :

Citepa/AFCE, 2025. Inventaire des émissions de fluides frigorigènes pour la France métropole.
Résultats 2023 et estimation provisoire 2024

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). Cette édition annule et remplace toutes les éditions antérieures relatives au même rapport.

Référence Citepa | 2581



17, rue de l'Amiral
Hamelin 75016 Paris

Pour obtenir des éléments contenus dans
ce rapport :

dg@afce.asso.fr

<https://www.afce.asso.fr>



42 rue de Paradis
75010 Paris

01 44 83 68 83
infos@citepa.org

citepa.org

Sommaire

Résumé	4
1. Résultats globaux 2023 – France métropole	5
2. Applications domestiques	23
3. Froid commercial	32
4. Transports frigorifiques	48
5. Froid industriel	60
6. Groupes refroidisseurs à eau (GRE).....	72
7. Climatisation / Chauffage - Air/Air.....	83
8. Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie.....	98
9. Climatisation embarquée / climatisation automobile	106
10. Synthèse des résultats	119
11. Annexes	128

Résumé

Le rapport Fluides frigorigènes de l'AFCE présente le bilan des émissions, des banques, de la demande, de la récupération, par grand secteur du froid et de la climatisation. Il se base sur l'inventaire annuel des émissions de gaz à effet de serre réalisé par le Citepa, dans le cadre des obligations de rapportage de la France auprès de la CCNUCC.

Chaque année, le Citepa réalise pour l'AFCE un rapport d'analyse sur les émissions et l'utilisation des fluides frigorigènes pour l'ensemble de la filière du froid et de la climatisation/ chauffage. L'édition 2025 adopte une nouvelle structure visant à améliorer la lisibilité et à faciliter la comparaison entre secteurs. Les chapitres sectoriels présentent, pour chaque type de résultat de calcul, des graphiques clairs illustrant les évolutions. Les résultats détaillés par fluide frigorigène, par an et par secteur sont regroupés dans un chapitre annexe, enrichi de graphiques de comparaison permettant une vision d'ensemble. La méthodologie de calcul est également présentée en annexe.

Les analyses présentées dans ce rapport reposent sur les calculs réalisés par le Citepa pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre de la France, dans le cadre de ses engagements au titre du Protocole de Kyoto et l'Accord de Paris. Conformément aux obligations internationales, les émissions de HFC sont déclarées avec l'ensemble des gaz à effet de serre à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) ainsi qu'à la Commission européenne. Dans le cadre de l'analyse menée pour l'AFCE, le bilan est élargi à l'ensemble des fluides frigorigènes, sur la période 1990 – 2023 (avec une pré-estimation pour 2024) : CFC, HCFC, HFC (y compris HFO) et fluides frigorigènes non fluorés. Les chapitres sectoriels présentent les données et hypothèses utilisées pour le calcul, ainsi que les résultats en termes de banque, émissions, émissions CO₂ équivalentes, récupération et demande. Une analyse globale est donnée en introduction, montrant l'évolution de la situation pour l'ensemble des secteurs du froid/ climatisation/ chauffage/ pompes à chaleur.



Résultats globaux 2023 – France métropole

1.1. Les émissions de gaz fluorés parmi les émissions de gaz à effet de serre

En 2023, les émissions de HFC représentent seulement 2,3 % des émissions de gaz à effet de serre de la France (Figure 1). D'un point de vue sectoriel, 84 % des émissions de gaz fluorés sont attribuables aux applications du froid et de la climatisation (Figure 2).

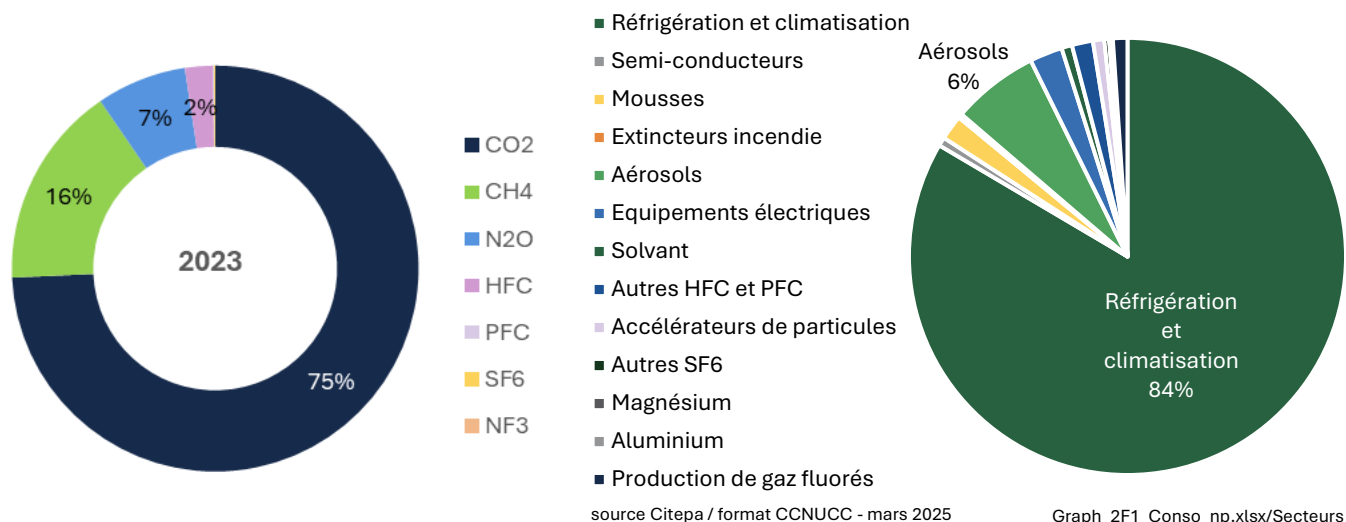


Figure 1 - Répartition des émissions de GES en 2023 (Métropole & territoires d'Outre-mer compris dans l'Europe)

Figure 2 - Répartition sectorielle des gaz fluorés en 2023 (Métropole)

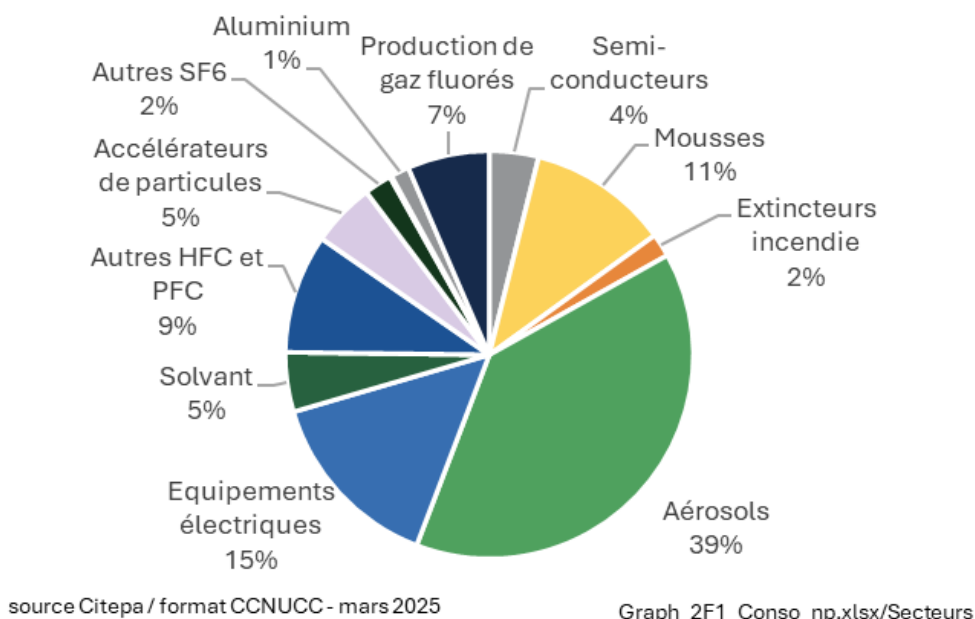


Figure 3 - Répartition sectorielle hors réfrigération et climatisation des gaz fluorés en 2023 (Métropole)

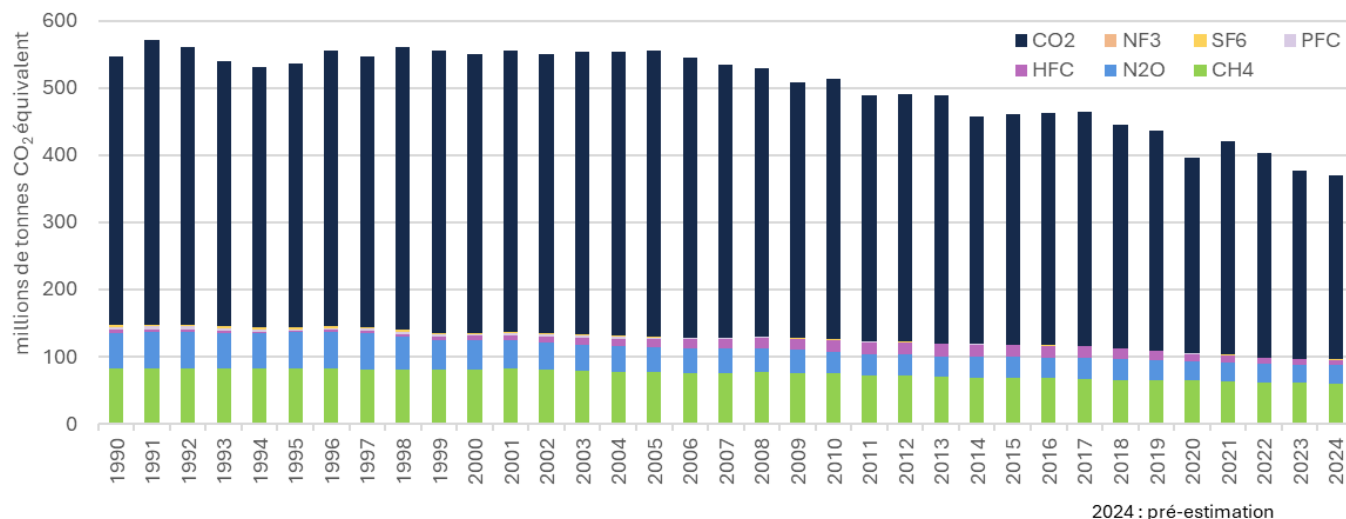


Figure 4 - Répartition des émissions de GES en CO₂ équivalent en France (Métropole & territoires d'Outre-mer compris dans l'Europe). Source : Citepa, données Secten 2025.

La Figure 4 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 5 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.

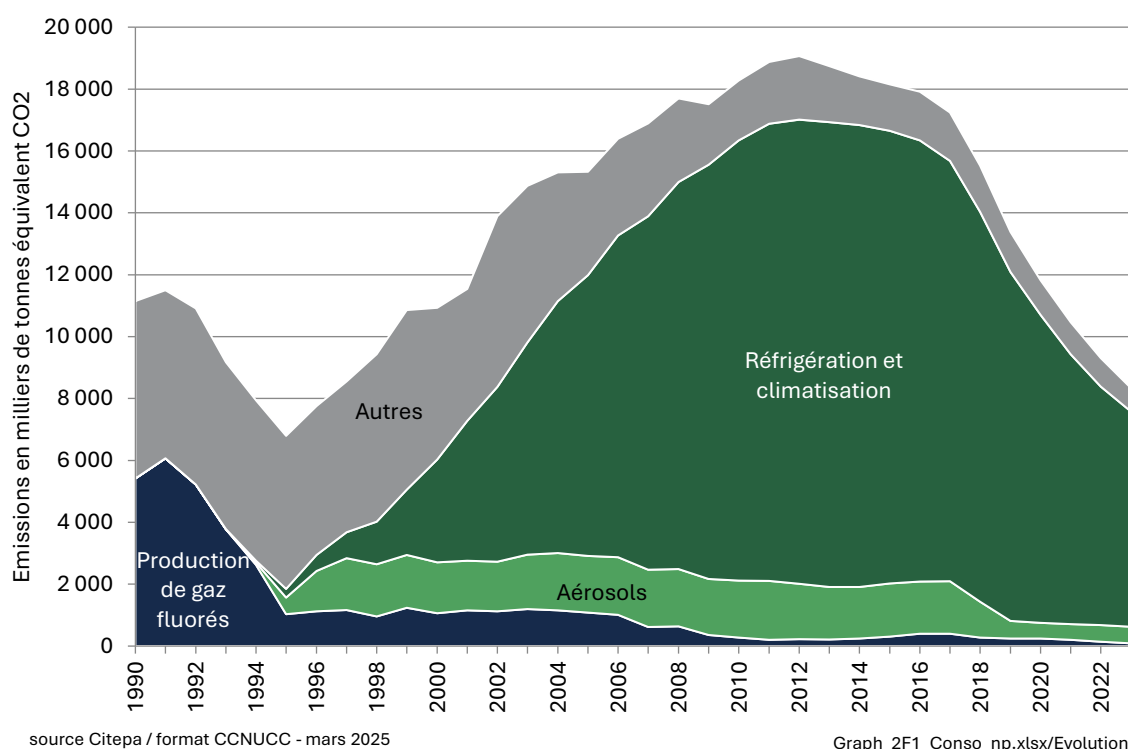


Figure 5 - Evolution des émissions de gaz fluorés (HFC, PFC, SF₆, NF₃) en France de 1990 à 2023, (France métropole et territoires d'Outre-mer inclus dans l'UE). Source : Citepa, rapport CNUCC 2025

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 des HFC et les secteurs du froid et de la climatisation en sont les principaux utilisateurs. La suite du rapport se limitera à ces secteurs mais englobera l'ensemble des fluides frigorigènes : CFC, HCFC, HFC (incluant les HFO) et les fluides frigorigènes non fluorés (HC, R-744/CO₂ et R-717/NH₃).

1.2. Banque

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 elle qui émet, de façon fugitive et représente un potentiel d'émissions ou de quantités à récupérer tant que les équipements n'ont pas atteint leur fin de vie.

La banque totale de fluides frigorigènes en France métropole est en croissance régulière, plus marquée depuis 2018, du fait de celle des secteurs de la climatisation air/air (+5,4% par an en moyenne entre 2018 et 2023) et des pompes à chaleur air/eau ou eau/eau (+11,8% en moyenne ces 3 dernières années). Elle a atteint 67 000 tonnes en 2023 dont 14% de fluides frigorigènes non fluorés (voir Tableau 51 en annexe). La banque augmente de 4,5% entre 2022 et 2023, la même tendance est prévue pour 2024, à confirmer par le prochain inventaire. La banque de R-134a est toujours élevée et représente environ 20% de la banque totale de fluides frigorigènes en France en 2023 mais elle est désormais dépassée par celle de R-410A qui représente 24% de la banque totale. Cependant, la banque de R-134a est en décroissance depuis 2015 (-6,4% par an en moyenne sur la période 2015-2023, avec une accélération ces dernières années, soit -10% entre 2022 et 2023), du fait de la réglementation concernant la climatisation automobile, ainsi que celle de R-410A depuis 2023 avec -2,5% entre 2022 et 2023. On observe parallèlement une montée progressive de l'utilisation des HFO. Ils représentent 13% de la banque en 2023 et ont augmenté de 1 400 tonnes, soit de 19% comparé à 2022. Le R-410A banque majoritaire en 2023, n'est quasiment utilisé qu'en climatisation : à 64% pour le secteur climatisation chauffage air/air, 13% pour les groupes refroidisseurs à eau et 23% pour la Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie.

Au total, la banque de HFC, représente près de 57 360 tonnes, dont 8 780 tonnes de HFO. Elle est dominée par la climatisation chauffage air/air à 28% et la climatisation mobile à 24%. La banque en équivalent CO₂ de la climatisation automobile ne représente plus que 11% (Figure 9) de la banque totale car le parc se renouvelle progressivement vers du R-1234yf, avec un PRG faible. A l'inverse, en climatisation air/air, le renouvellement du parc au R-32 n'est encore qu'à ses débuts, ce qui fait apparaître ce secteur comme la banque CO₂ équivalente la plus importante (33%). Le froid commercial représente 10% de la banque CO₂ équivalente de HFC, la banque résiduelle de R-404A étant estimée à environ 1 835 tonnes en 2023. Celle de HCFC est liée au transport maritime, qui est traité au niveau international.

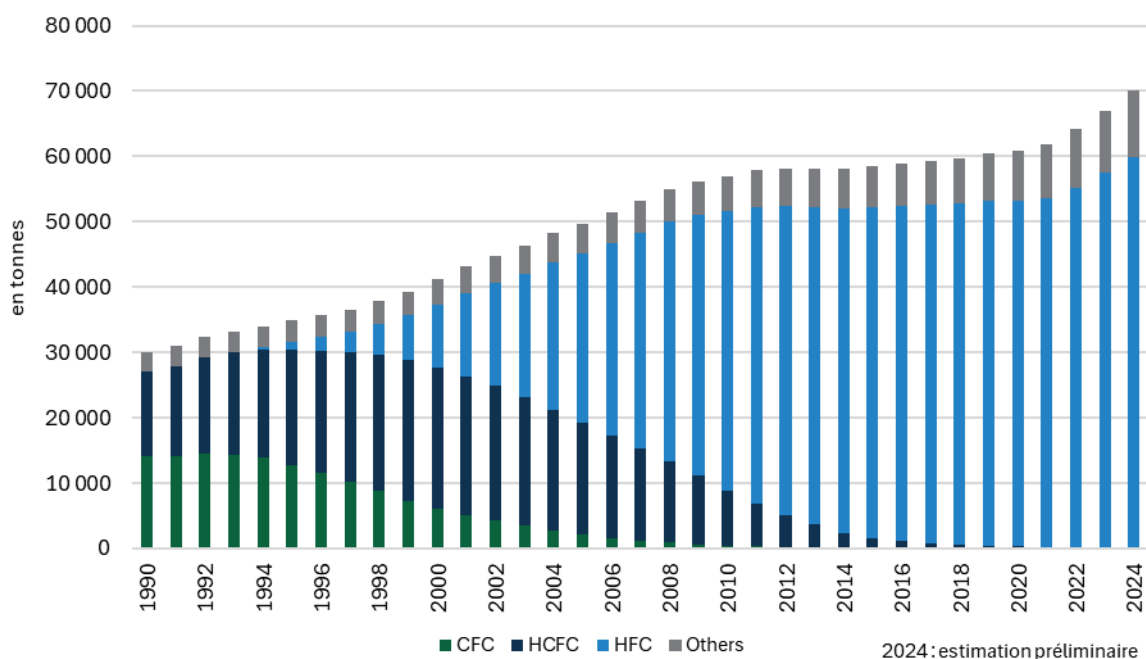


Figure 6 - Evolution de la banque totale de fluides frigorigènes en France métropole

Note : Dans le graphe de la Figure 7 et tous ceux qui vont suivre et présentent les **résultats concernant les HFCs seuls**, les HFOs sont distingués en orange car bien qu'ils fassent partie de la famille des HFCs, ils ne sont pas déclarés à la CCNUCC et constituent ainsi une famille à part.

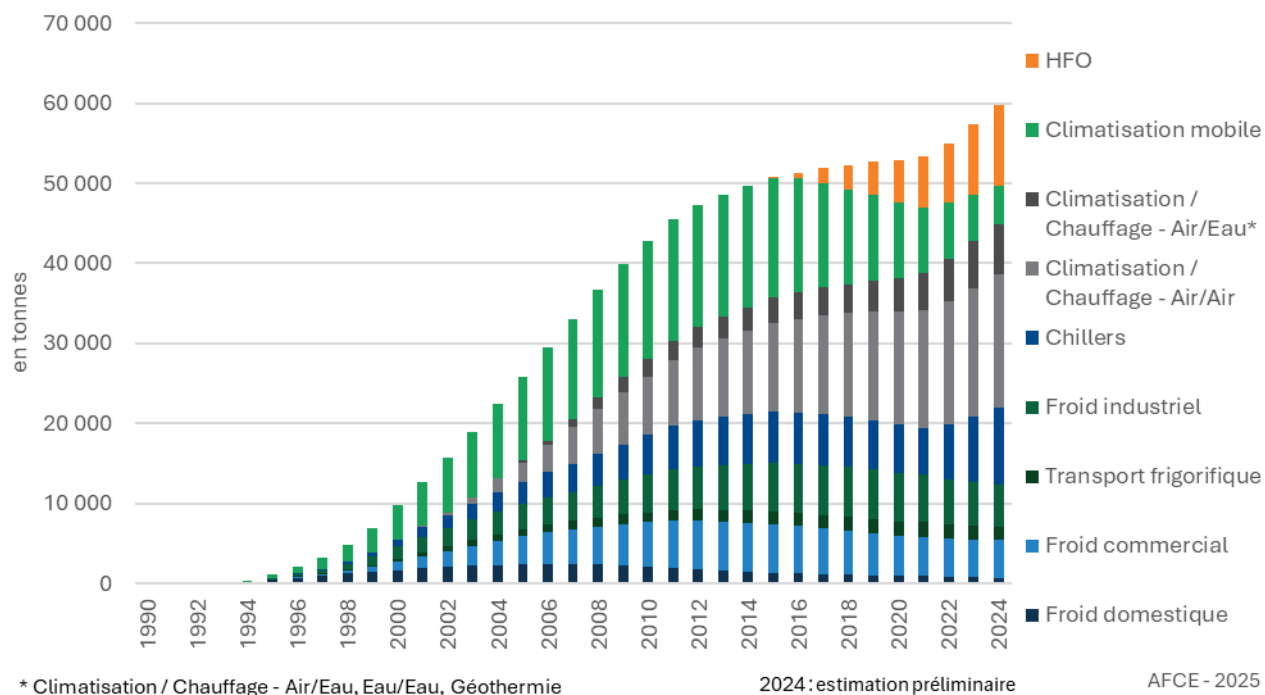


Figure 7 - Evolution de la banque de HFC par secteur en France métropole

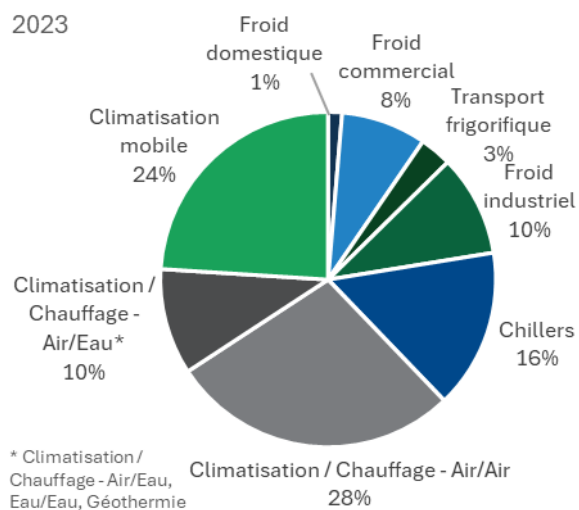


Figure 8 - Répartition sectorielle de la banque de HFC (en tonnes) en France métropole

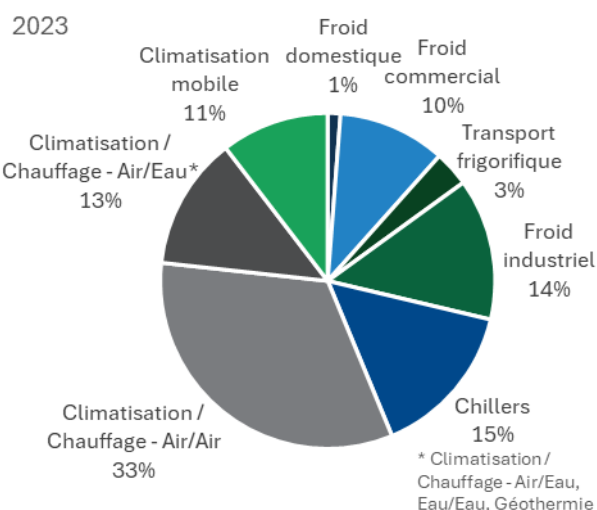


Figure 9 - Répartition sectorielle de la banque équivalente CO₂ de HFC en France métropole

1.3. Emissions de fluides frigorigènes

1.3.1. Emissions totales en tonnes

Les émissions totales de fluides frigorigènes de la France métropole, incluent les émissions à toutes les étapes de la vie des équipements, c'est-à-dire : à la charge, lors de la vie de l'équipement ainsi que lors de son démantèlement en fin de vie. Elles sont estimées à 5 910 tonnes en 2023 (voir Tableau 57 en annexe), soit une diminution de 1,7% par rapport à 2022, ce qui correspond également à la tendance des émissions de HFC. En 2024, les émissions totales devraient continuer leur chemin à la baisse aux alentours de 1,5%. Les émissions de fluides frigorigènes sont en décroissance, grâce à l'amélioration des pratiques, 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. A l'image de la constitution de la banque, les émissions (voir Tableau 57 en annexe) viennent majoritairement des fluides frigorigènes R-134a (30%) et R-410A (17%). La conversion progressive des installations et la réduction des taux de fuites permettent le fait que les émissions de R-404A ne représentent plus que 5% du total.

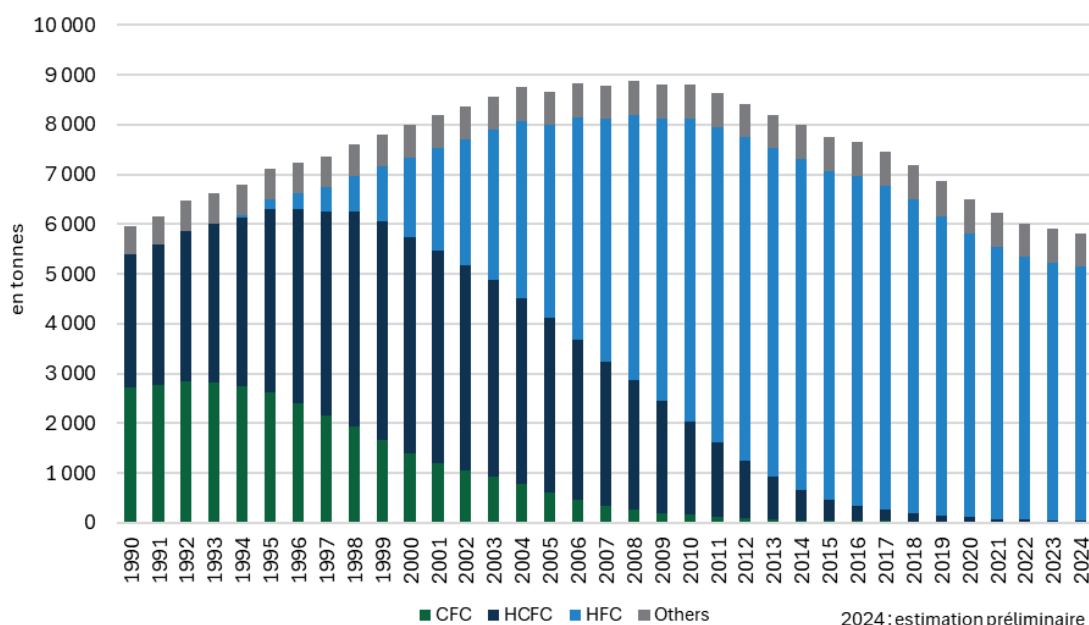


Figure 10 - Evolution des émissions de fluides frigorigènes en France métropole

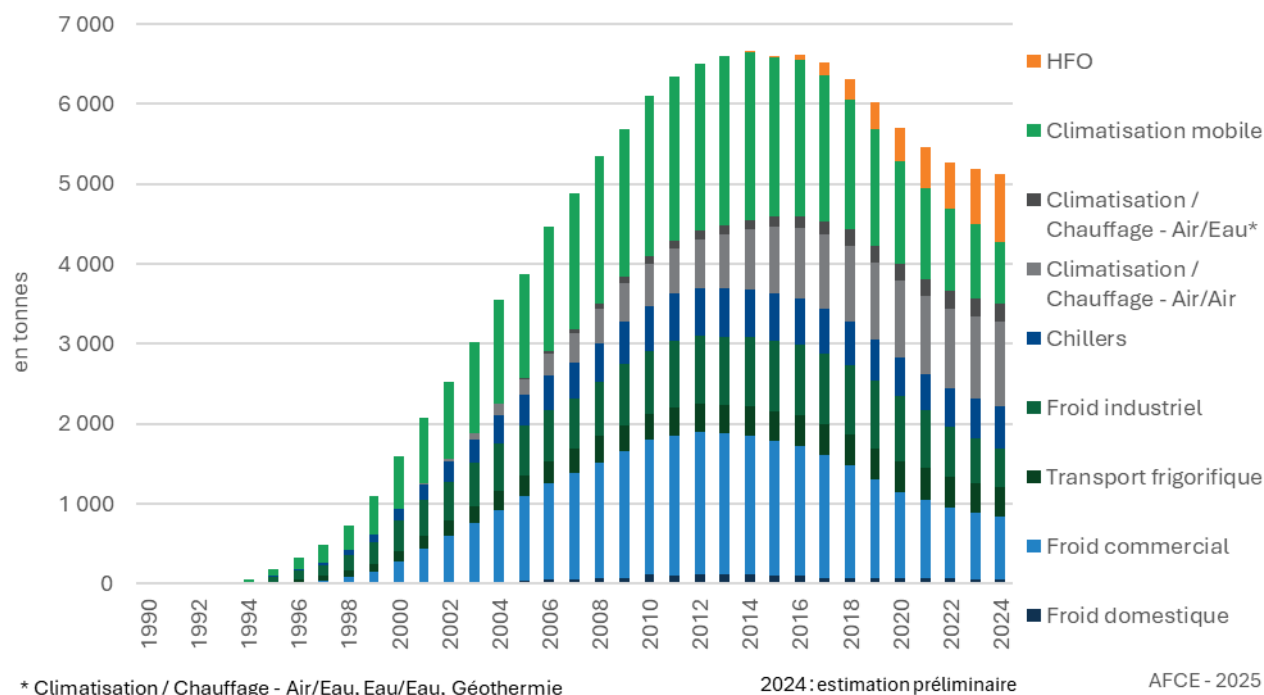


Figure 11 - Evolution des émissions de HFC par secteur en France métropole

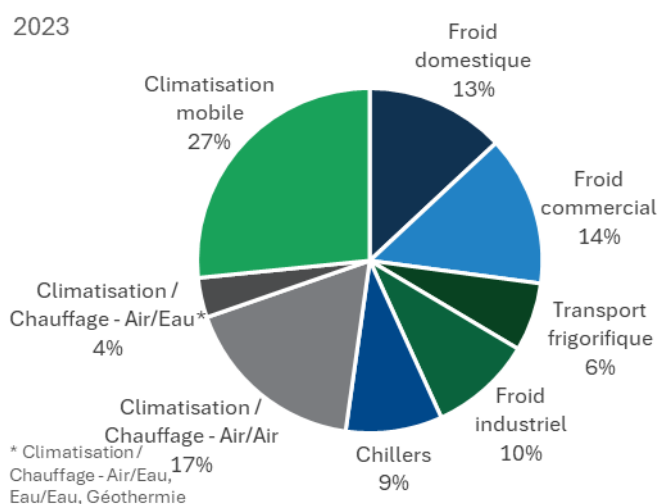


Figure 12 - Répartition sectorielle des émissions de HFC (en tonnes) en France métropole

1.3.2. Emissions CO₂ équivalentes

Conformément aux exigences de la CCNUCC dans le cadre de la mise en œuvre de l'Accord de Paris, les émissions en CO₂ équivalent doivent être calculées, depuis l'inventaire 2021, en tenant compte des PRG donnés par le 5^{ème} rapport du GIEC (AR5). Ce rapport présentera donc les émissions CO₂ équivalentes en tenant compte des valeurs de PRG données par l'AR5, au total, et par secteur, dans les chapitres suivants.

Les émissions de fluides frigorigènes en France métropole sont estimées à **7,1 millions de tonnes de CO₂ équivalent (AR5)** dont 7,0 millions de HFC en 2023 (voir Tableau 58 en annexe). Ces émissions, en CO₂ équivalent, sont en forte décroissance depuis 2018, avec une moyenne de 12% par an sur la période 2018-2023 (Figure 13). La baisse est de

10% entre 2022 et 2023, et pourrait être identique entre 2023 et 2024 avec 6,4 millions de tonnes de CO₂ en 2024, selon les premières estimations. Cette décroissance s'explique selon plusieurs facteurs et, notamment :

- Le renouvellement du parc automobile, dont les émissions CO₂ équivalentes ont ainsi baissé de plus de 10 % par an depuis 2018 avec la montée progressive de l'utilisation de HFO, plus faibles en PRG ;
- 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 = 1 924), 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.

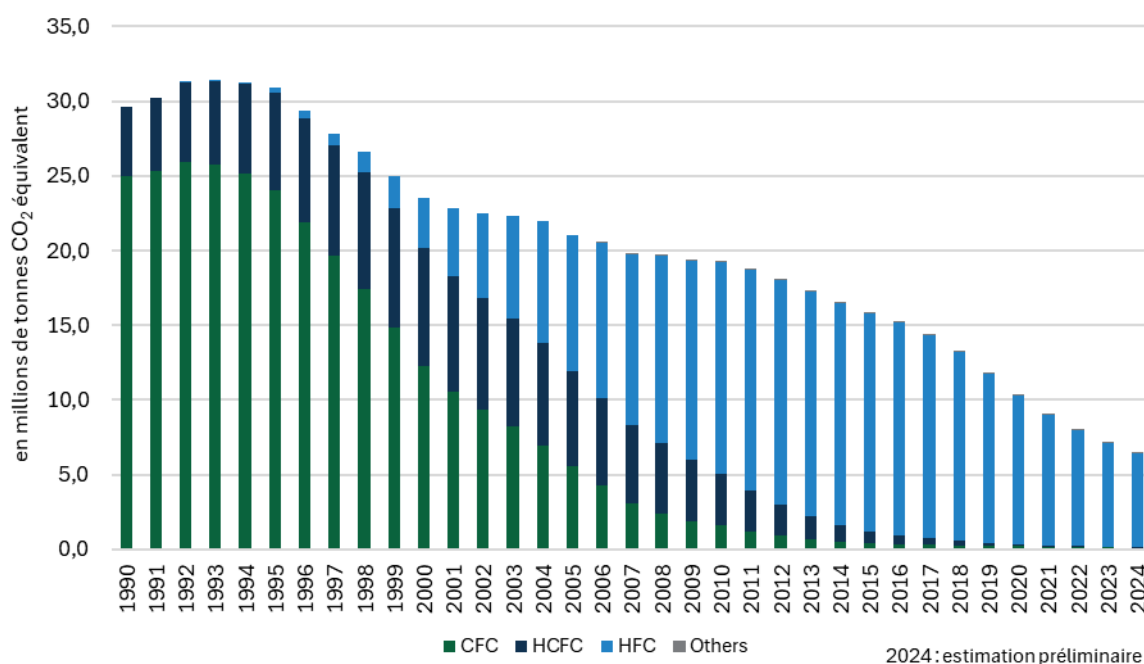


Figure 13 - Evolution, en tonnes de CO₂ équivalent (AR5), des émissions de fluides frigorigènes en France métropole

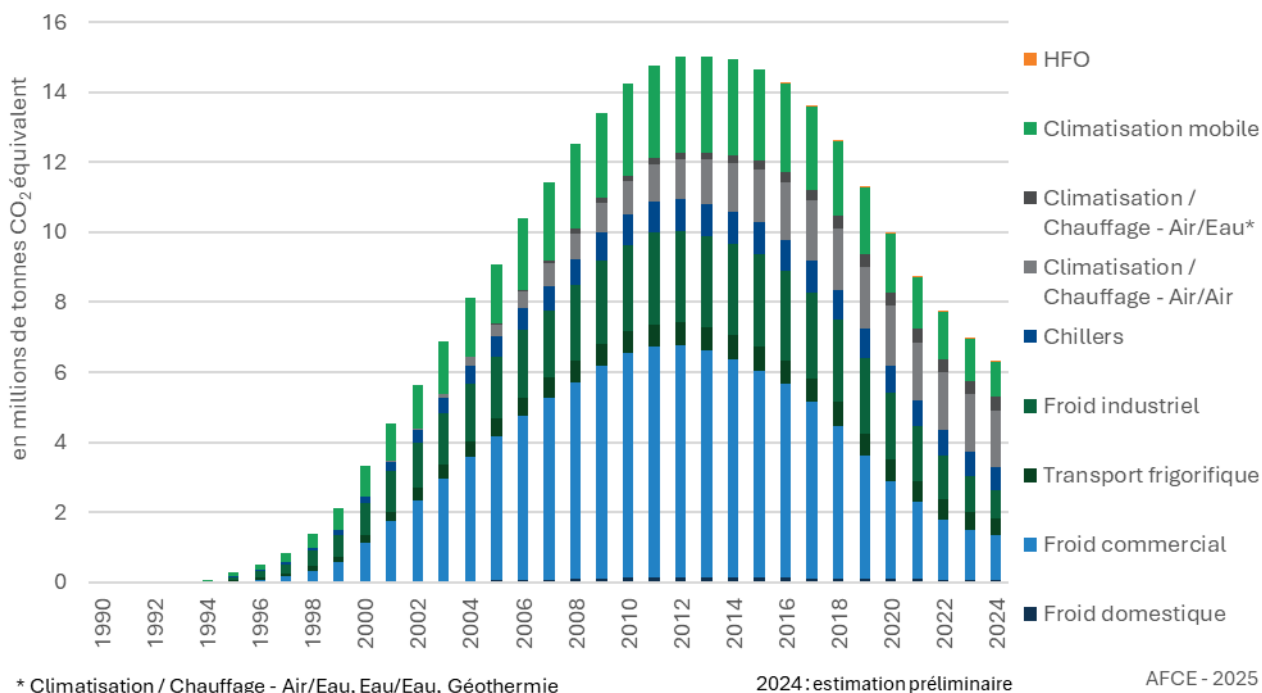


Figure 14 - Evolution, en tonnes de CO₂ équivalent (AR5), des émissions de HFC par secteur en France métropole

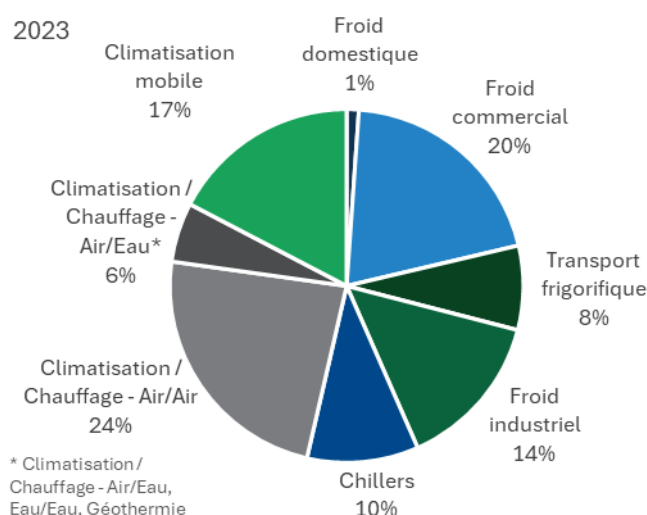


Figure 15 - Répartition sectorielle des émissions CO₂ équivalentes (AR5) de HFC en France métropole

En 2023, la part des émissions de la climatisation fixe représente environ un tiers des émissions CO₂ équivalentes des HFC si l'on considère l'ensemble du secteur incluant la climatisation air/air, air/eau et eau/eau, 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 (-20% en moyenne par an pour le froid commercial et -16% pour le froid industriel sur la période 2019-2023). La banque de R-404A s'est réduite de près de 80 % entre 2015 et 2023, d'où le déclin des émissions CO₂ équivalentes du froid commercial. Toutefois, ce secteur représente encore 20 % 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 significatives. La part des émissions CO₂ du froid industriel (14%) est plus faible grâce à l'usage répandu de l'ammoniac. Le renouvellement progressif du parc automobile vers des véhicules équipés d'un système de climatisation au R-1234yf (PRG = 1 (AR5)), a réduit fortement les émissions de la climatisation automobile qui ne représentent désormais que 17% (Figure 15) des émissions CO₂ équivalentes de HFC de la France métropole.

1.4. Demande

La demande totale est constituée par 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. Cette demande totale est évaluée à partir des nécessités estimées et tient compte des talons de charge supposés équivalents à 15% de la demande. 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, notamment depuis 2017.

La demande totale en fluides frigorigènes est évaluée à 7 800 tonnes pour l'année 2023, dont 6 800 tonnes de HFC comprenant 1 100 t de HFO (voir Tableau 54 en annexe). Les fluides frigorigènes les plus demandés sont le R-134a (19%), suivi par le R-32 (17%) et les HFO (14%). La part des fluides frigorigènes non fluorés représente 13% de la demande totale en 2023 (environ 1 000 t).

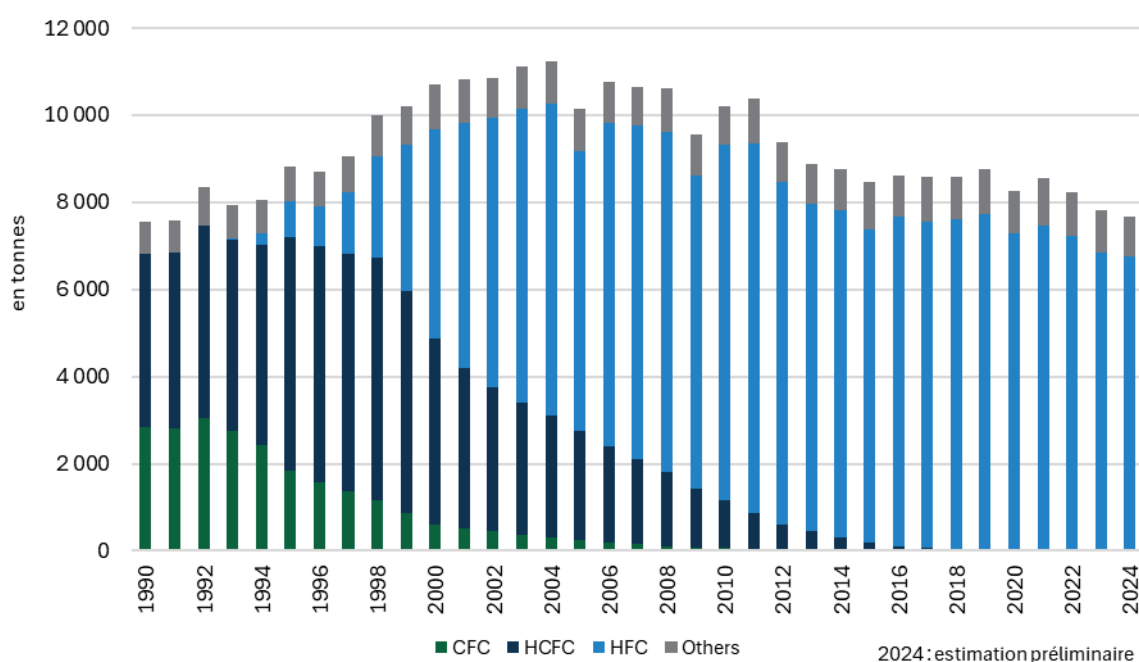


Figure 17 - Demande totale en fluides frigorigènes pour la France métropole

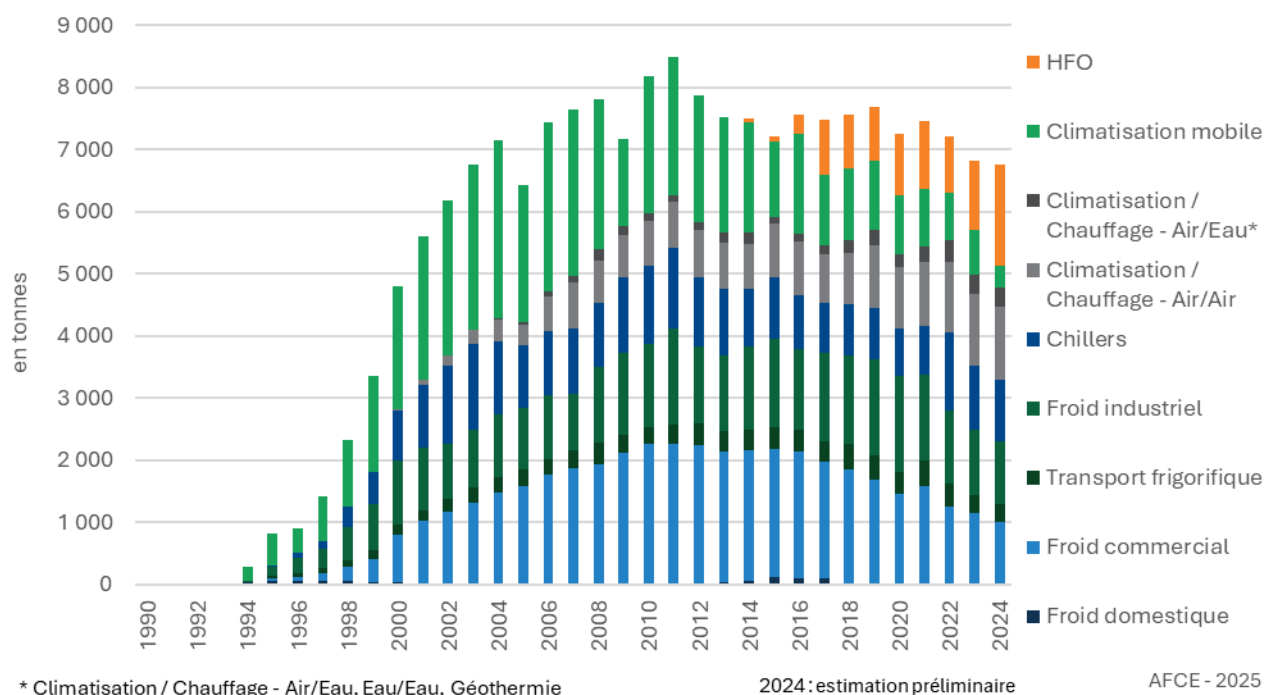


Figure 18 - Demande totale en HFC par secteur pour la France métropole

La demande totale en HFC à fort PRG est en forte décroissance grâce aux retrofits, aux renouvellements d'installations ainsi qu'à la baisse des niveaux d'émissions. En effet, la demande en R-410A diminue de 25% en 2023 comparée à 2022 (après une hausse constatée en 2022 par rapport à 2021), celle en R-404A décroît de 35% et de 25% en R-407C entre 2022 et 2023. Quelques équipements résiduels utilisant encore des CFC/HCFC sont pris en compte. La demande correspond à un besoin estimé par le calcul pour la maintenance de ces équipements. C'est une demande non satisfaite pour des équipements assez étanches qui pourraient ne pas avoir été renouvelés. Cette demande est marquée d'une forte incertitude et dépend des hypothèses de calcul.

La demande totale 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.

Besoin pour les équipements neufs

La demande pour les équipements neufs est constituée par :

- le besoin pour les **équipements** préchargés **produits** en France (Figure 19 ; Tableau 53 en annexe). Une forte incertitude sur ce besoin est liée à la confidentialité des données ;
- le besoin pour la **charge** (Tableau 52 en annexe) sur site des équipements installés en France (Figure 21).

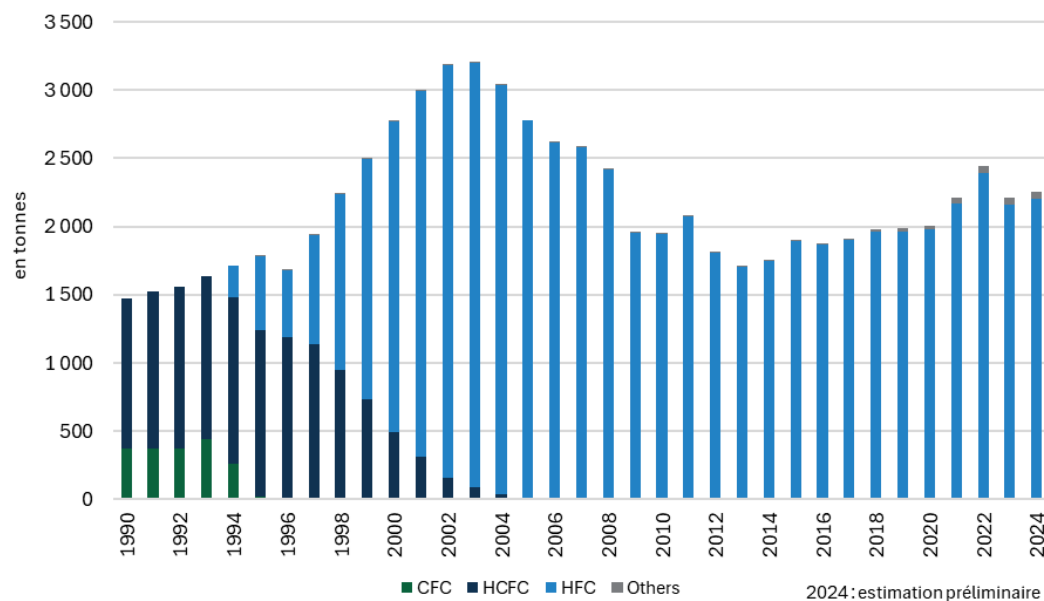


Figure 19 - Besoin en fluides frigorigènes pour la production d'équipements préchargés en France métropole

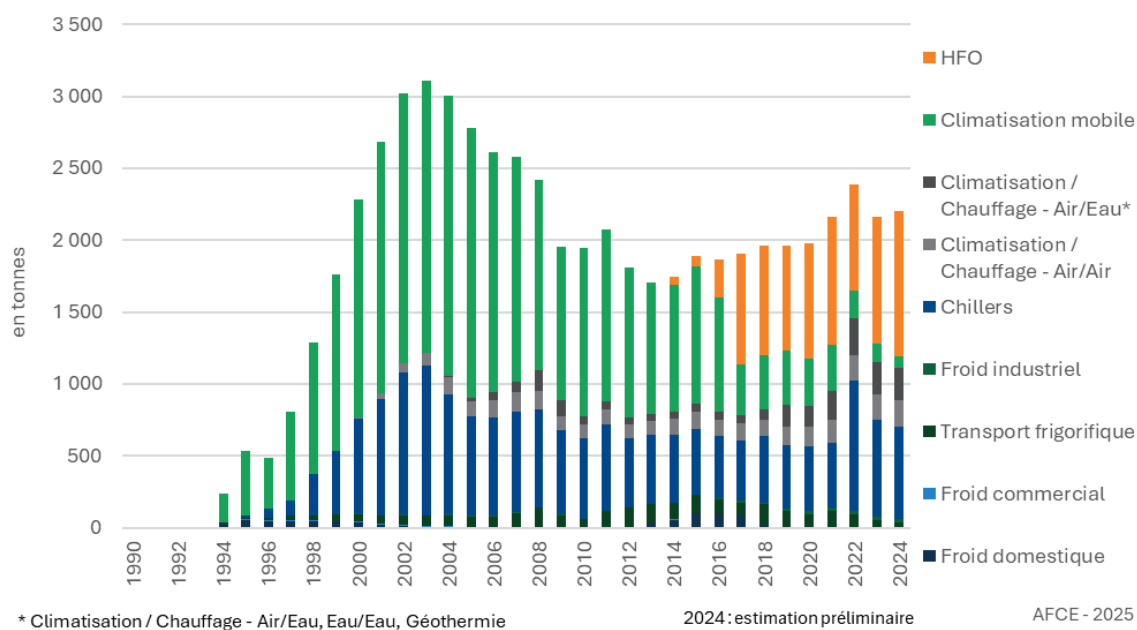


Figure 20 - Besoin HFC par secteur pour la production d'équipements préchargés en France métropole

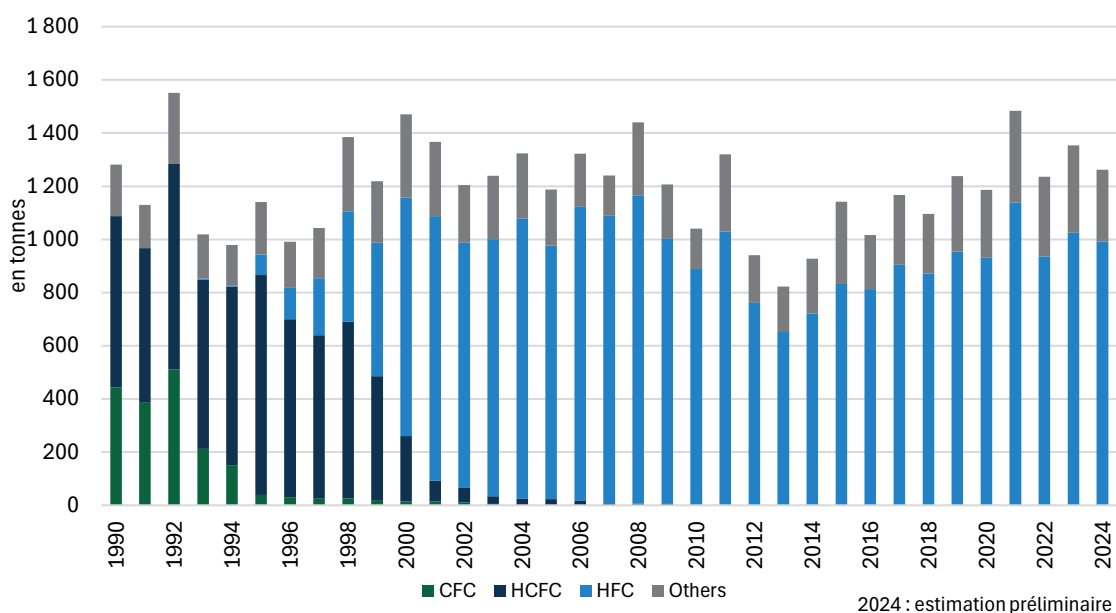


Figure 21 - Besoin en fluides frigorigènes pour la charge d'équipements sur site

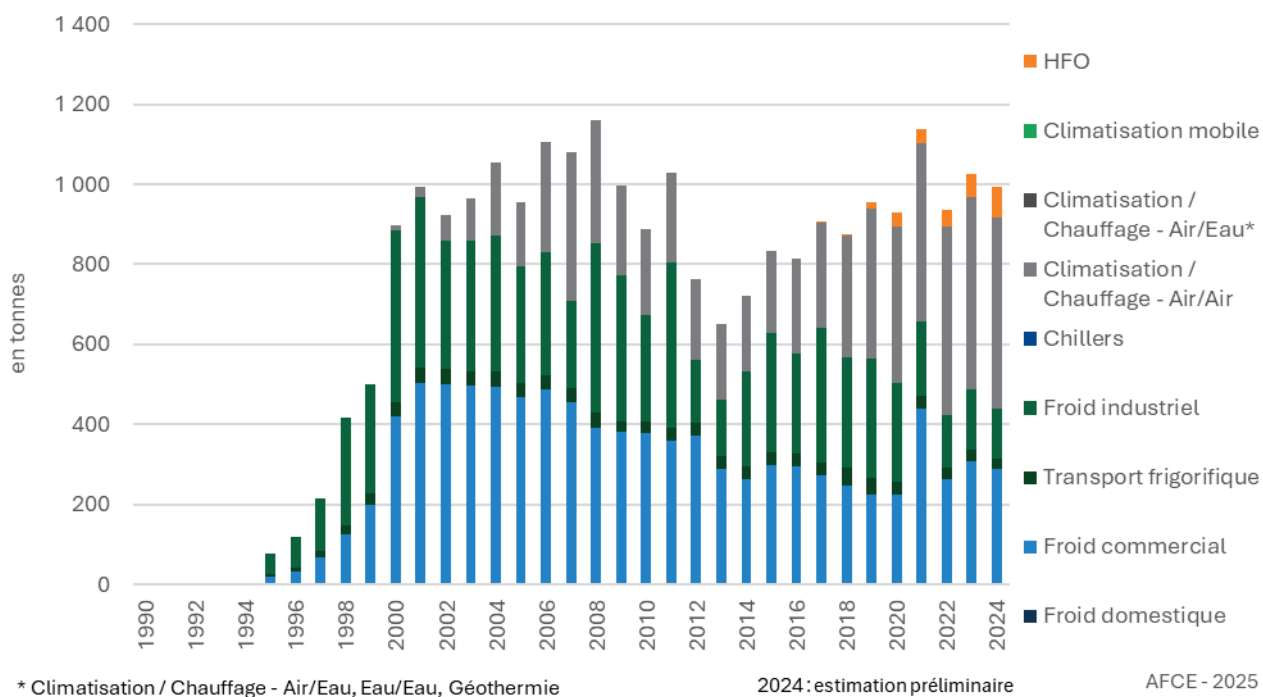


Figure 22 - Besoin en HFC par secteur pour la charge d'équipements sur site

La demande liée aux nouvelles installations est dans une tendance croissante, en lien avec les renouvellements d'installations aux HFC à fort PRG, notamment. La part des nouvelles installations utilisant des fluides frigorigènes non fluorés est également en croissance comme on le voit sur le graphique Figure 21. La demande totale de ces fluides pour la charge a augmenté de 10% entre 2022 et 2023.

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

Le besoin pour la maintenance (Tableau 55 en annexe) des installations est en nette décroissance depuis 2018 (Figure 24).

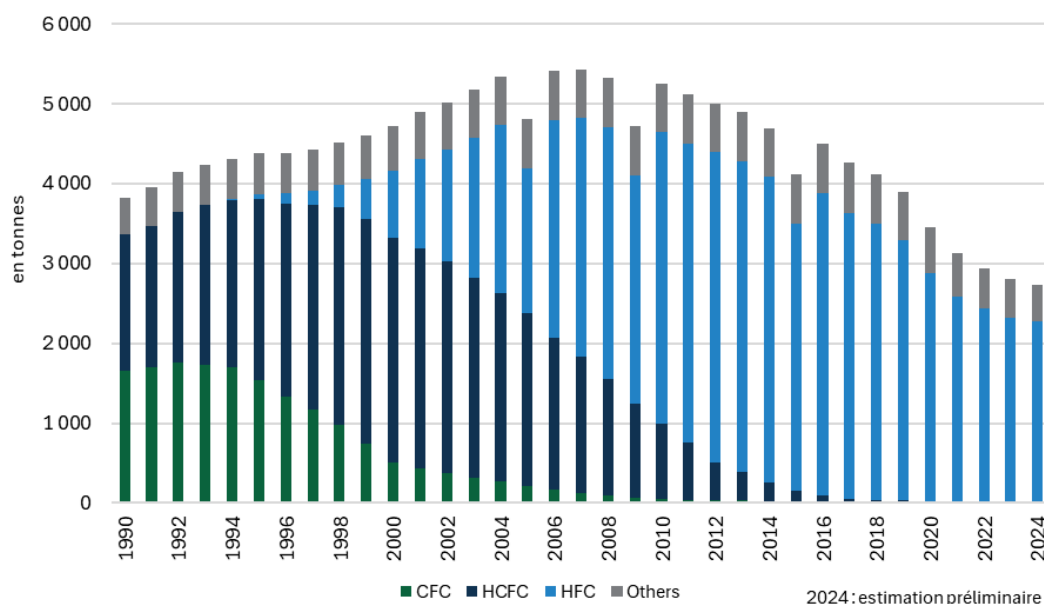


Figure 24 - Evolution du besoin estimé pour la maintenance des installations sur le parc d'équipements en France

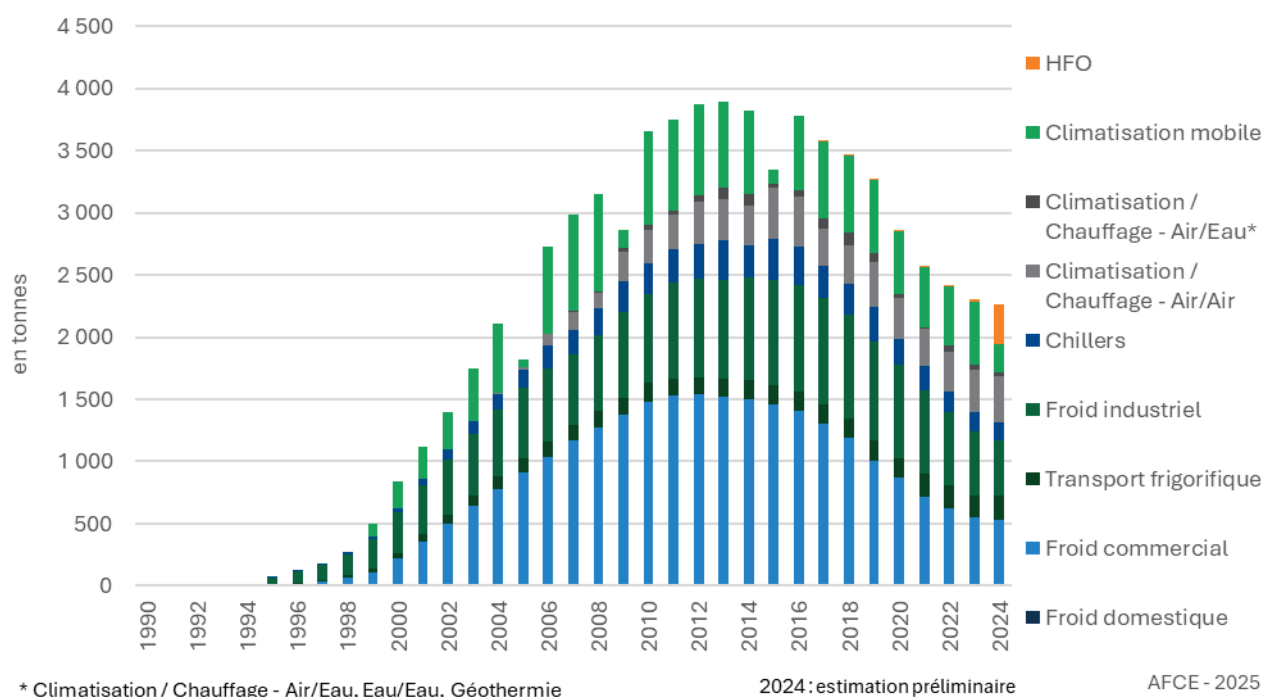


Figure 25 - Evolution du besoin estimé en HFC pour la maintenance des installations sur le parc d'équipements en France

Le besoin pour le retrofit (Tableau 56 en annexe), très inégal selon les secteurs.

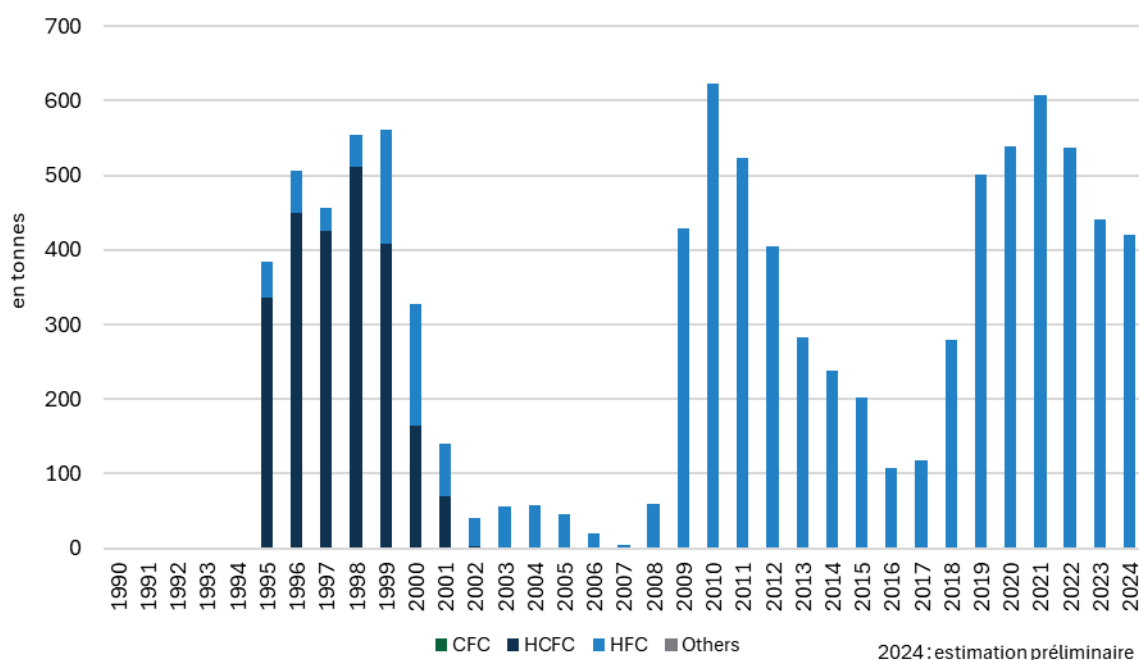


Figure 26 - Evolution du besoin estimé pour le retrofit des installations en France

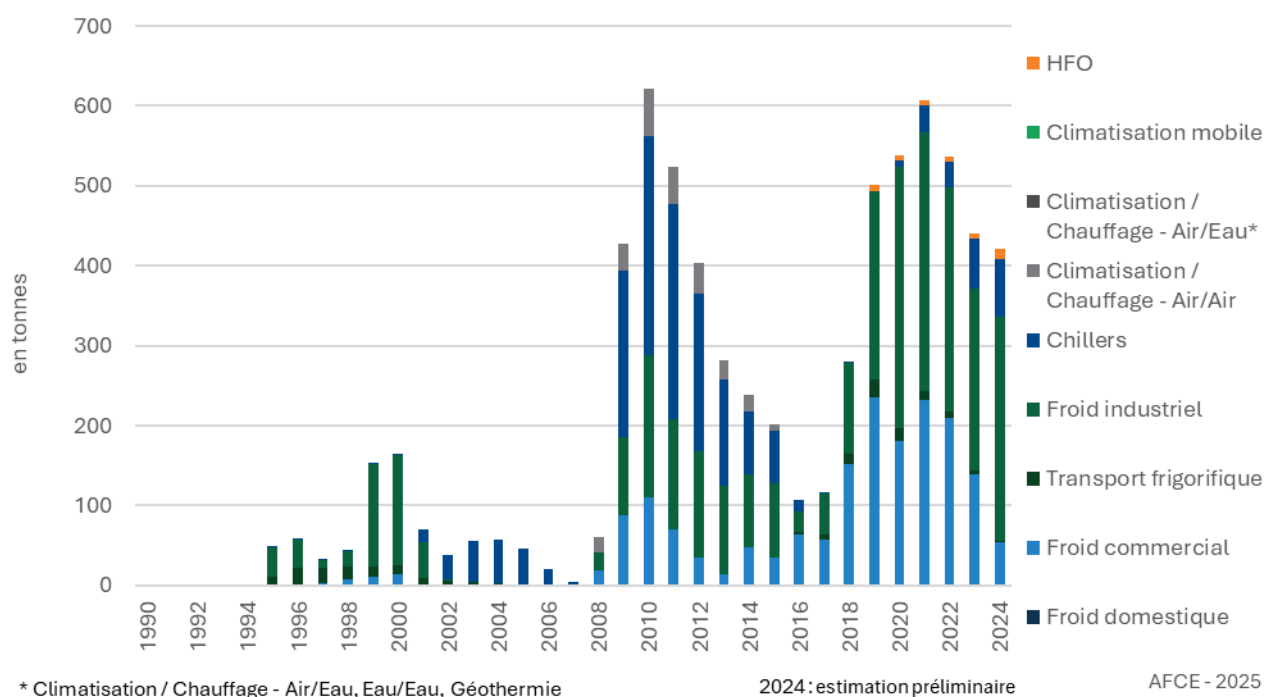


Figure 27 - Evolution du besoin estimé en HFC par secteur pour le retrofit des installations en France

Historiquement, le besoin pour la maintenance représentait 2/3 de la demande totale. Depuis quelques années, les demandes pour les installations neuves et pour la maintenance sont comparables et comptent pour environ la moitié chacun.

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 autre peut être comblée par le recyclage des quantités récupérées lors d'opérations de maintenance.

1.5. Vérification de cohérence

1.5.1. 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. La Figure 28 présente l'évolution des marchés déclarés au SNEFCCA et la demande totale reconstituée par le calcul Citepa.

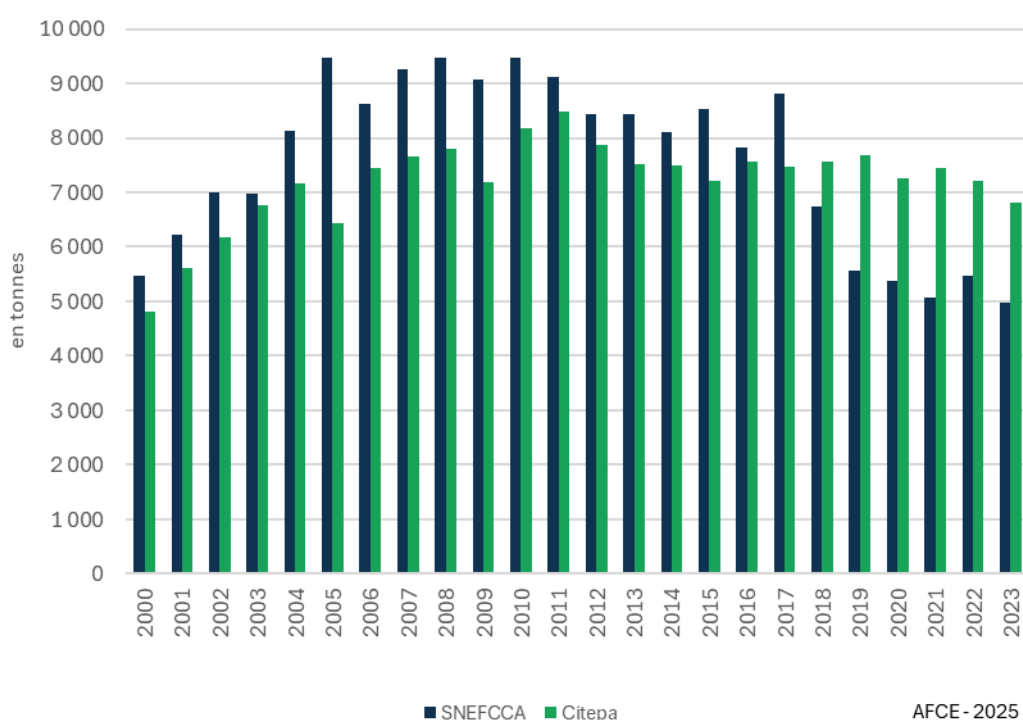


Figure 28 - Comparaison de la demande totale calculée en HFC aux marchés déclarés au SNEFCCA

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 calculée est supérieure au marché déclaré et l'écart s'accroît fortement. Cela signifie qu'une partie du besoin, pour la maintenance, n'est pas satisfait, 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.

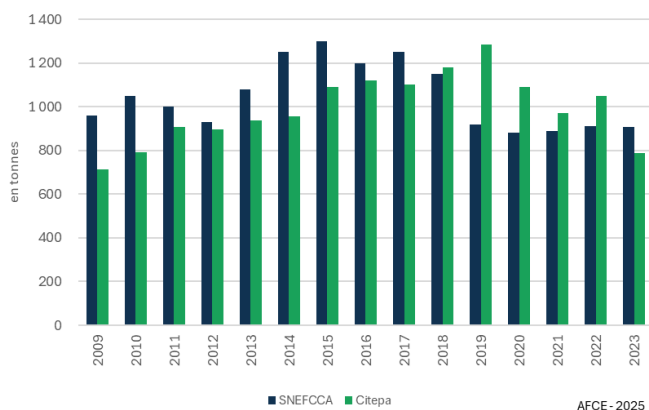
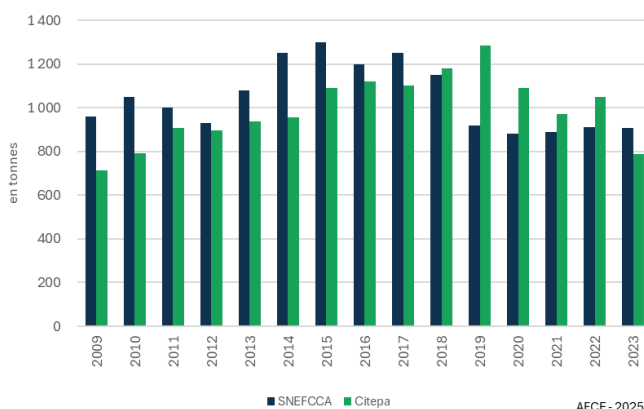


Figure 29 Comparaison de la demande calculée et du marché déclaré de R-410A



Figure 30 Comparaison de la demande calculée et du marché déclaré 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 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 29 et Figure 30) 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 les marchés de peuvent s'expliquer par la forte incertitude sur les données de production en France.

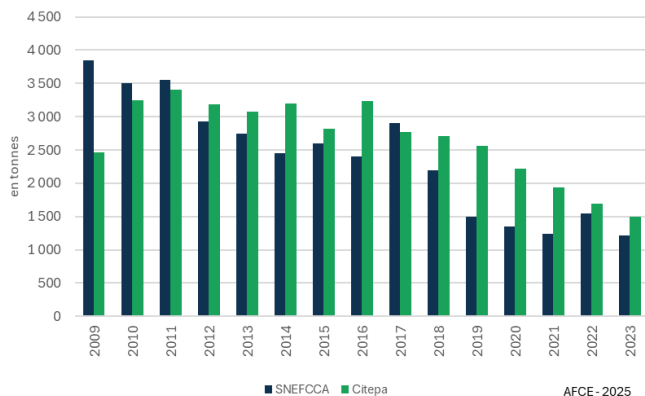


Figure 31 Comparaison de la demande calculée et du marché déclaré de R-134a

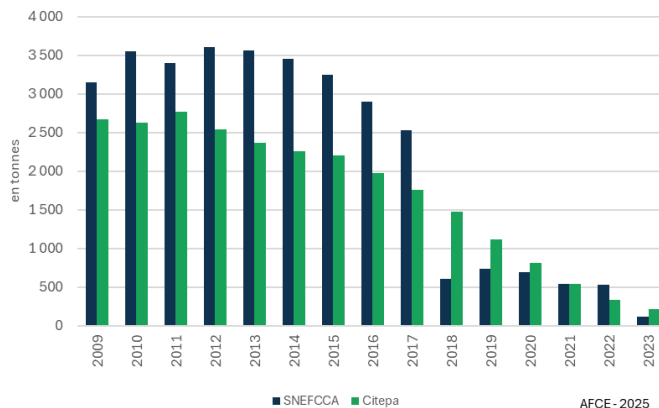


Figure 32 Comparaison de la demande calculée et du marché déclaré de R-404A

Les comparaisons de la demande de R-134a et de R-404A avec les marchés déclarés font apparaître des écarts significatifs avant 2017. Une incertitude sur la demande de R-404A peut être 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. 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.

1.5.2. Analyse des résultats sur la récupération en fin de vie des équipements

La Figure 33 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). Les courbes représentées sont :

- En bleu clair, les quantités cumulées de CFC, HCFC, HFC retournées aux distributeurs pour régénération ou destruction (données SNEFCCA) ;
- En bleu foncé, 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 ;

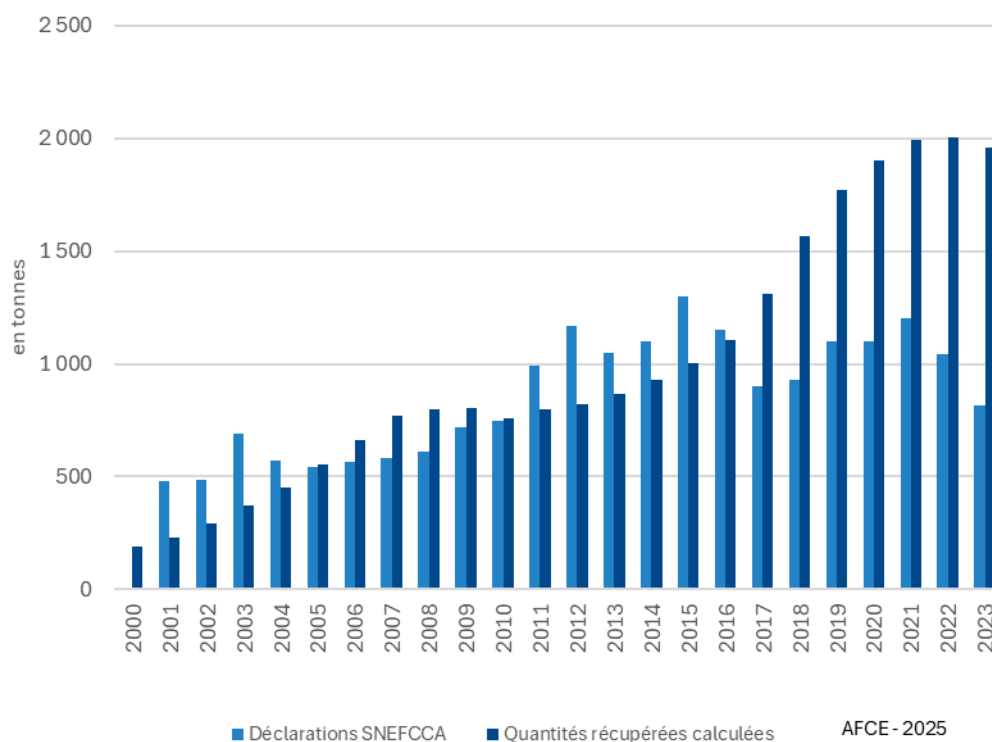


Figure 33 Comparaison des données sur la récupération en France métropole

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 ainsi qu'une pénurie de certains fluides, à la suite de la mise en place du phasedown.



Applications domestiques

2.1. Introduction

Applications prises en compte

SECTEUR	SOUS-SECTEUR
Froid domestique	Réfrigérateurs Congélateurs Sèche-linges thermodynamiques 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 avec pompe à chaleur. Une courbe de durée de vie est associée.

2.2. Données et hypothèses

2.2.1. Données d'activités

2.2.1.1. 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 6]. Une répartition des modèles de réfrigérateurs et congélateurs (en termes de volume moyen) sur le parc français est disponible pour certaines années [Ref 7]. Ainsi, les ventes annuelles en France sont connues avec une bonne précision.
- **Cave 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 6]. Un seul producteur est référencé en France, Eurocave.

- **Sèche-linge avec pompe à chaleur** : Le marché des sèche-linges avec pompe à chaleur en France a été reconstitué depuis 2010 à partir des informations d'un producteur d'équipement [Ref 8] et des données récentes du Gifam [Ref 7] qui fournit les ventes de sèche-linges en France ainsi que la segmentation par produit.

Tableau 3 – Marchés d'équipements du secteur de froid domestique (nombre d'unités)

ANNEE	REFRIGERATEURS	CONGELATEURS	CAVES A VIN	SECHE-LINGES THERMODYNAMIQUES
2023	2 839 000	604 000	199 900	426 477

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.
- **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 9]. Les volumes de productions des années antérieures et postérieures ont été estimées en suivant les tendances d'un taux d'augmentation annuel de 8 %.
- **Sèche-linge avec 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.

Tableau 4 – Estimation des productions d'équipements du secteur de froid domestique

PRODUCTION (NOMBRE D'UNITES)	REFRIGERATEURS	CONGELATEURS	CAVES A VIN	SECHE-LINGES THERMODYNAMIQUES
2023	0	0	26 000	0

2.2.1.2. Charge nominale

Tableau 5 – Hypothèses de charges nominales des équipements de froid domestiques

2023	RATIO DE CHARGE	VOLUME MOYEN (L)
Réfrigérateur	230 g/l (R-600a)	253
Congélateur	300 g/l (R-600a)	202
Sèche-linge thermodynamique	325g / appareil	-
Cave à vin	65g / appareil (R-600a)	-

- **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 avec pompe à chaleur** : La quantité de fluide frigorigène contenu dans un appareil dépend des classes énergétiques. Selon une communication d'un fabricant, elle est de 280g pour les bases A+ et de 370g pour les bases A++ [Ref 8]. 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 10]. Une valeur moyenne de 65 g/appareil est considérée dans l'inventaire. Ce niveau de charge moyenne est également cohérent avec l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 (entre 50 et 500 g/appareil).

2.2.1.3. 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 le 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) pour n'utiliser plus que ce dernier depuis 2015 (Figure 34). L'évolution des fluides frigorigènes utilisés au cours du temps sur le marché français est basée sur des enquêtes de terrain régulières [Ref 7] et les tendances données par le rapport RTOC de l'UNEP. .

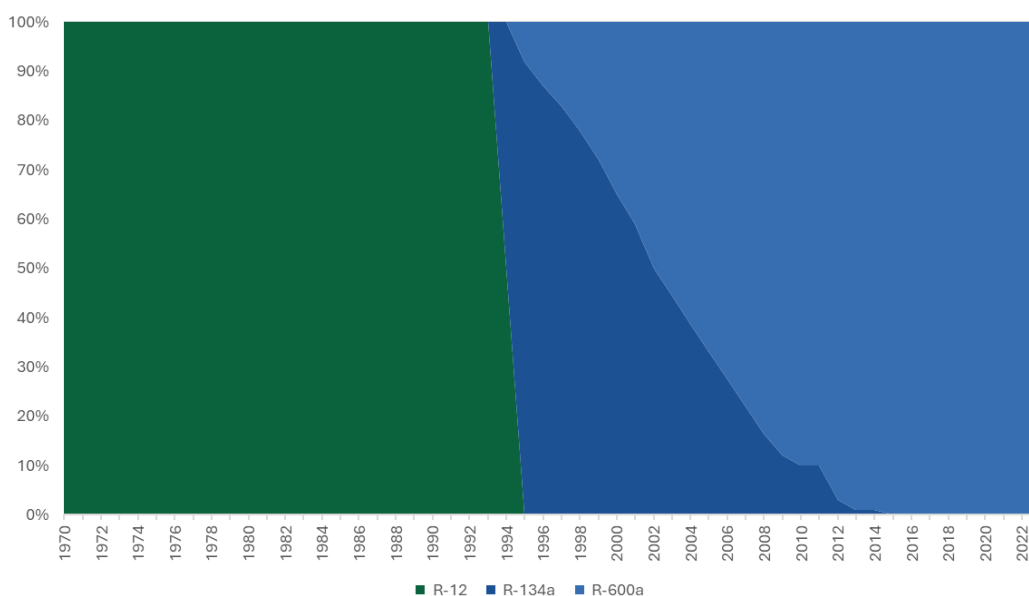


Figure 34 Part des réfrigérants utilisés sur le marché des réfrigérateurs domestiques

- **Sèche-linge avec pompe à chaleur** : Dans l'inventaire, il était supposé que seul le R-134a était utilisé dans les équipements jusqu'en 2018 où une enquête de terrain [Ref 11] a mis en évidence la présence de R-450A et R-290 (Figure 35). Une introduction progressive de ces fluides a donc été prise en compte dans les hypothèses de calcul.

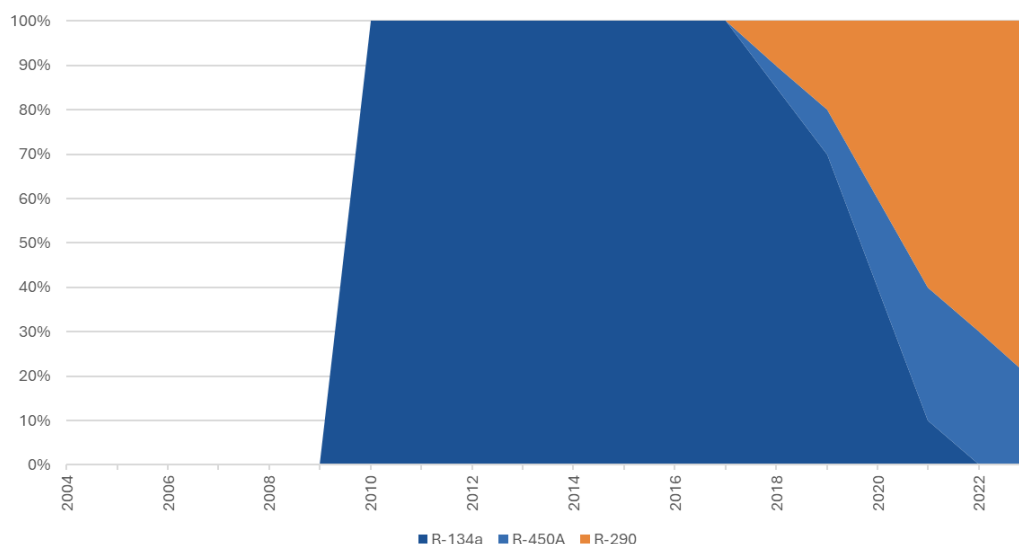


Figure 35 Part des réfrigérants utilisés sur le marché des sèche-linges avec pompe à chaleur

- **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 pour ce sous-secteur [Ref 11] : 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.

2.2.1.4. Durée de vie

La durée de vie moyenne des réfrigérateurs et des caves à vins réfrigérées est supposée identique à celle des congélateurs. Une courbe de durée de vie est construite autour de ces valeurs moyennes.

Tableau 6 – Durée de vie moyenne des équipements de froid domestiques

SECTEUR	DUREE DE VIE
Réfrigérateur	15 ans
Congélateur	15 ans
Sèche-linge thermodynamique	10 ans
Cave à vin	15 ans

2.2.2. Facteurs d'émissions

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. La production en France étant désormais très faible, ces facteurs d'émissions ont peu d'impact sur le calcul des émissions de ce secteur.

Tableau 7 – Facteur d'émission à la charge des équipements de froid domestique

2023	REFRIGERATEURS	CONGELATEURS	CAVES A VIN	SECHE-LINGES THERMODYNAMIQUES
Facteur d'émission à la charge	0,2%	0,2%	0,6%	0,1%

- **Réfrigérateur et congélateur** : L'hypothèse d'un facteur d'émission plus élevé que les années récentes de 2 % a été prise jusqu'à la fin de l'utilisation du R-12. Une décroissance de ce facteur a été appliqué 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 12].
- **Sèche-linge avec 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. La mise en place d'un nouveau process de remplissage du gaz explique en partie la forte baisse de ce facteur d'émission à partir de 2016.
- **Cave à vin** : Le facteur d'émission utilisé correspond à la moyenne de l'intervalle préconisé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 [Ref 12], soit 0,6 %.

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 7]. 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 8 – Facteur d'émission fugitif des équipements de froid domestique

2023	APPAREILS DOMESTIQUES
Facteur d'émission fugitif	0,01%

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

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 13]. 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 présumé caractériser le secteur du froid domestique. Le même taux de récupération, et donc le même facteur d'émission de fin de vie, est appliqué à chaque sous-application.

Tableau 9 – Facteur d'émission de fin de vie des équipements de froid domestique

2023	APPAREILS DOMESTIQUES
Facteur d'émission de fin de vie	60%

2.3. Résultats

2.3.1. Banque

Le parc des appareils de froid domestique s'est renouvelé progressivement. Depuis 2013, l'utilisation des hydrocarbures (R-600a essentiellement) domine et prend de l'ampleur comparée à celle d'autres types de fluides frigorigènes et notamment du R-134a. Le ratio de charge de ces appareils étant plus faible que ceux fonctionnant au R-12 ou R-134a, la banque totale de fluides frigorigènes a décliné entre 2000 et 2014. Les quantités à la banque du secteur du froid domestique repartent à la hausse à partir de 2015, du fait de la croissance 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 environ 3 980 t en 2023, composée à 71 % de R-600a (résultats 2023 en annexe : Tableau 51 – Quantités de fluides frigorigènes - BANQUE par secteur).

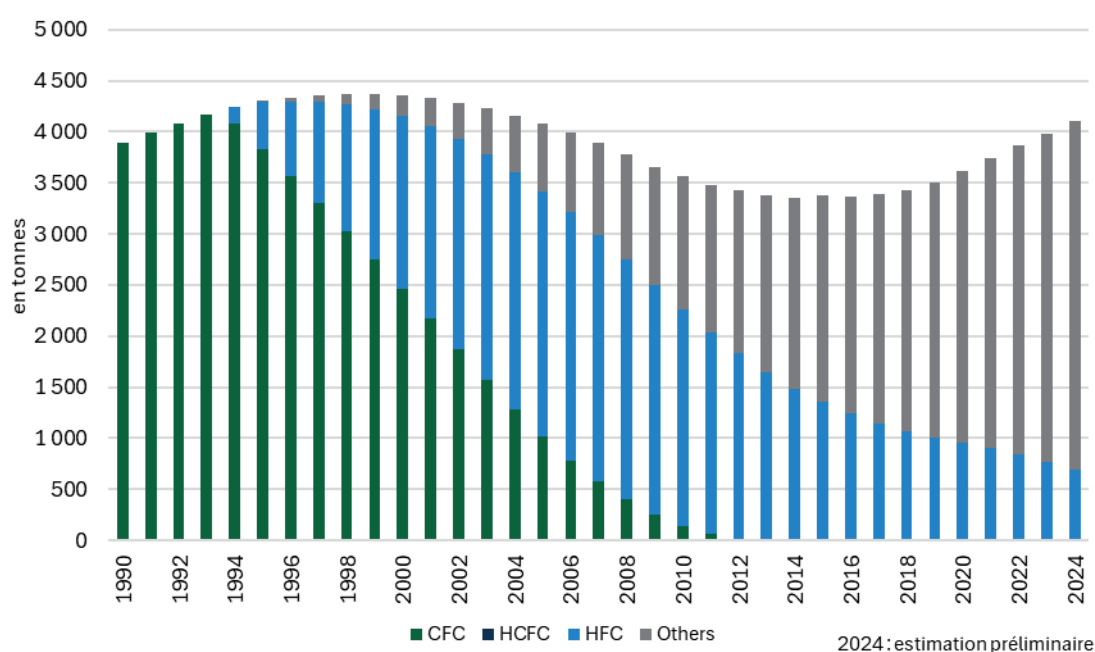


Figure 36 Banque de fluide dans le secteur du froid domestique

2.3.2. Demande

La demande pour les applications de froid domestique est liée à la production (Tableau 53 en annexe) 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, le besoin est lié à la production de sèche-linges thermodynamiques fabriqués en France et utilisant uniquement du R-134a durant cette période. Depuis 2019, les quantités correspondent à la production, assez faible, des caves à vin au R-600a.

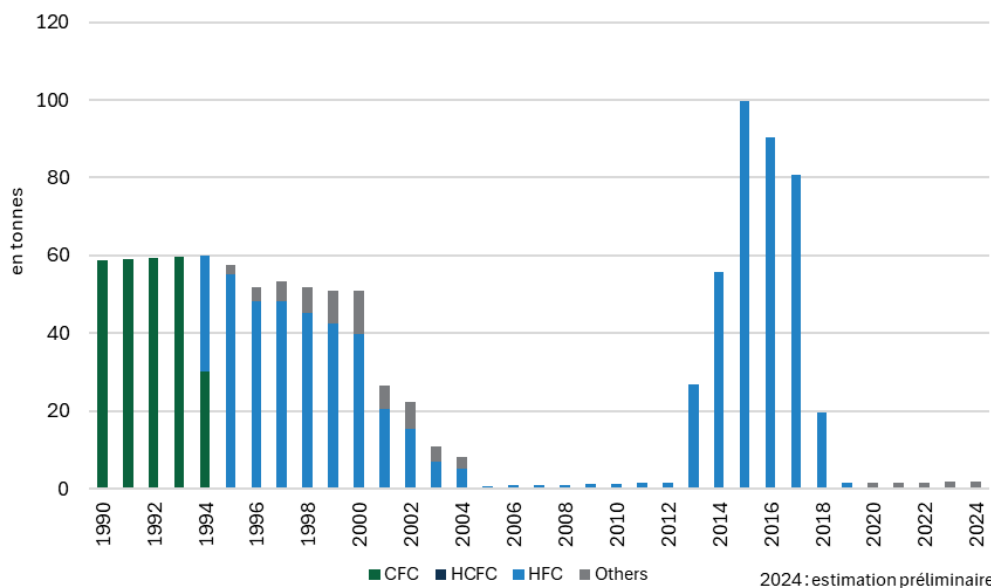


Figure 38 Demande en fluides frigorigènes pour la production dans le secteur du froid domestique

2.3.3. Emissions

Emissions totales

En 2023, les émissions totales du froid domestique sont en leur quasi-totalité constituées des émissions de fin de vie des équipements, les systèmes étant hermétiques, le reste venant de la très faible production des appareils en France. Elles sont assez faibles, de l'ordre de 146 tonnes en 2023 (Tableau 57 en annexe), étant donnée l'efficacité croissante de la filière DEEE. La part des HFC baisse depuis plusieurs années pour atteindre 41% en 2023.

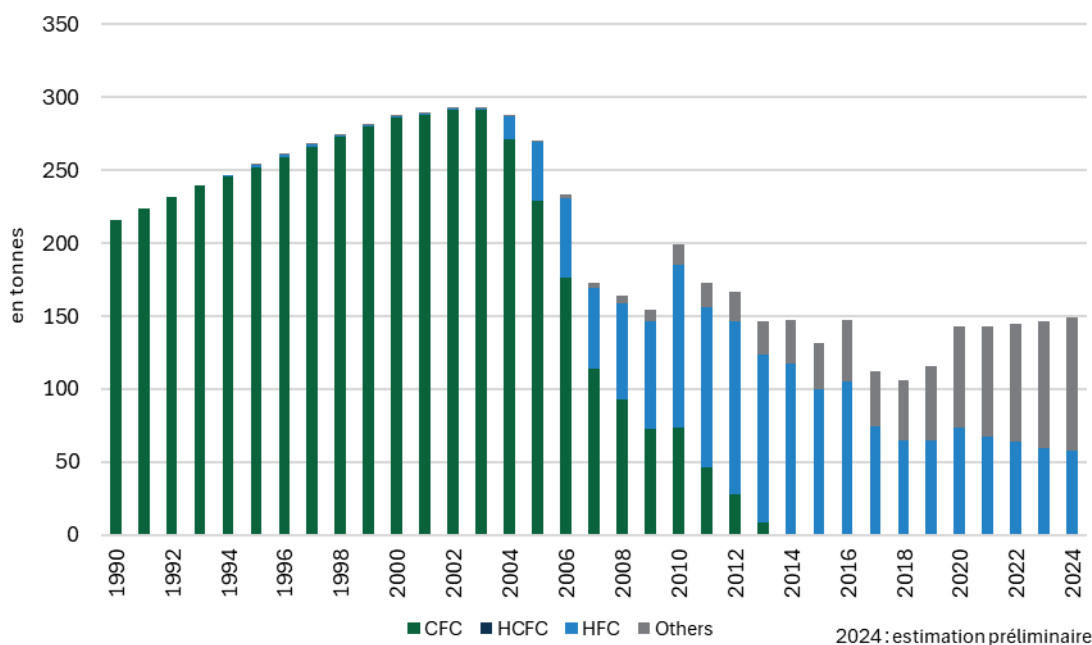


Figure 39 Emissions totales du froid domestique

Emissions totales en CO₂ équivalent

Alors qu'elles culminaient à environ 3 millions de tonnes de CO₂ en 2002, les émissions du froid domestique ne représentent plus que 78 000 tonnes de CO₂ en 2023 (Tableau 58 en annexe) et sont amenées à décroître encore, les équipements parvenant en fin de vie contenant désormais principalement du R-600a (Figure 40).

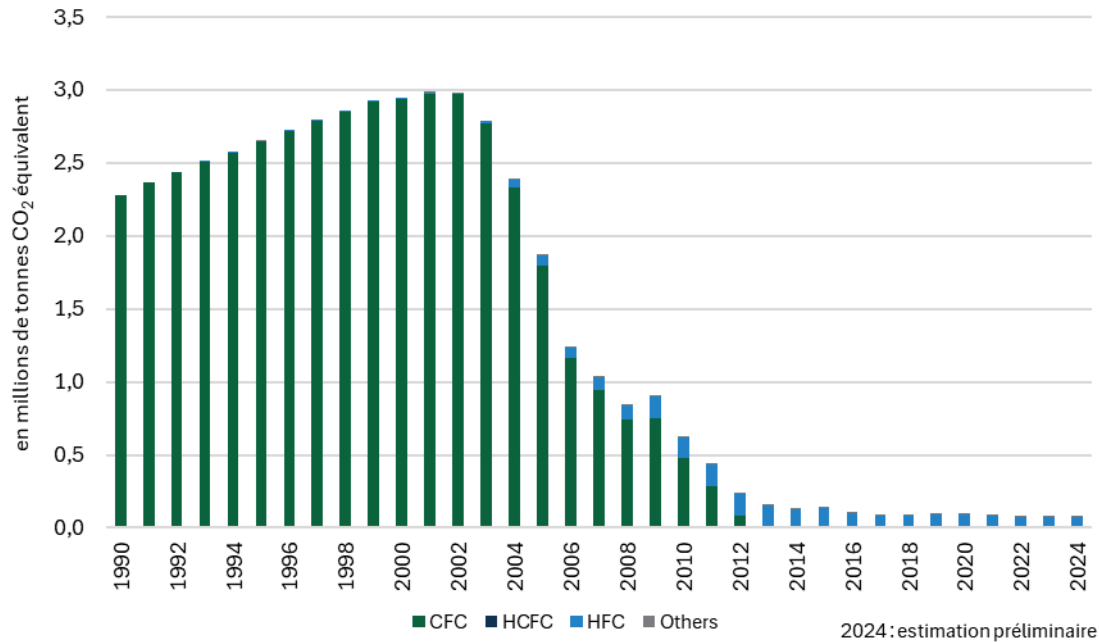


Figure 40 Emissions CO₂ équivalentes du froid domestique (millions de tonnes)

3

Froid commercial

3.1. Introduction

Applications prises en compte

SECTEUR	SOUS-SECTEUR
Froid commercial	Supermarchés (installations frigorifiques, surface de vente comprise entre 400 m ² à 2 500 m ²) Hypermarchés (installations frigorifiques, surface de vente égale ou supérieure à 2 500 m ²) Petits commerces : - équipements frigorifiques utilisant des groupes de condensation (chambre froide, par exemple) - équipements utilisant des groupes hermétiques (armoire réfrigérée par exemple) et distributeurs automatiques

Les super et hypermarchés sont équipés d'une salle des machines comportant deux séries de centrales frigorifiques, l'une dite de froid positif (entre - 10°C et -15°C) pour la conservation des produits frais et l'autre dite 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), eux-mêmes 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 aussi considérés dans l'inventaire. Enfin, concernant les maxidiscomptes 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 dans le Tableau 11, supposés présenter les mêmes caractéristiques en termes d'équipements.

Des échanges avec le SYNEG [Ref 50] ont permis d'évaluer qu'environ la moitié des cuisines professionnelles était prise en compte dans l'inventaire (équipements des restaurants). En revanche, les équipements des collectivités locales ne sont pas comptabilisés. Des données détaillées n'ont pas pu être rassemblées par le Synege afin d'évaluer la charge moyenne de ce type d'équipement et de pouvoir le prendre en compte de façon plus précise dans le calcul.

Tableau 11 – Catégories de magasin prises en compte dans les équipements des petits commerces

SUPERETTES	PETITS COMMERCES SPECIALISES	DRIVES	DISTRIBUTEURS AUTOMATIQUES
Maxidiscomptes, Supérettes, Surgelés	Alimentations générales, 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

Des 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 seuil de 70% de charge (Tableau 12). Il n'est pas considéré de maintenance pour les équipements utilisant des groupes hermétiques. Dans le modèle de calcul, il est estimé 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 12 – Modes de maintenance des équipements de froid commercial

SOUS-SECTEUR	RYTHME DE MAINTENANCE	SEUIL
Hypermarchés	Annuel	-
Supermarchés	Annuel	-
Groupes de condensation	Selon le 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. Cette hypothèse basée sur les rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 7] et les lignes directrices du GIEC [Ref 12]. 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 128).

3.2. Données et hypothèses

3.2.1. Données d'activités

3.2.1.1. 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 7], [Ref 14], [Ref 15], [Ref 16], [Ref 17], [Ref 18], [Ref 19] [Ref 20], [Ref 21]). 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 20]. 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.

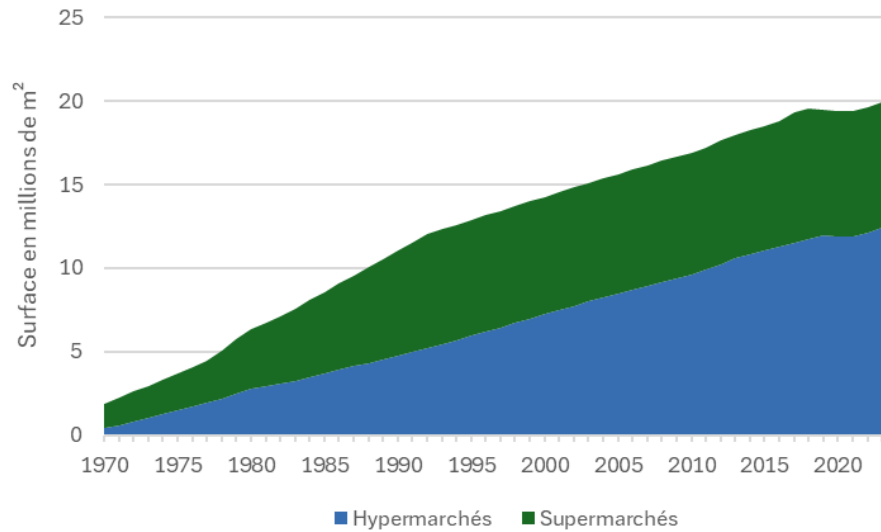


Figure 41 Evolution de la surface des hypermarchés et des supermarchés en France

- **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 7], de la base de données de l'ACOSS [Ref 19] et des bases de données de l'INSEE ([Ref 15], [Ref 16], [Ref 17], [Ref 18]). 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 13 – Parcs de magasins

2023	PARC DE MAGASINS
Hypermarchés	2 262
Supermarchés	5 856
Petits commerces	273 567

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 soit équivalente au marché.

3.2.1.2. 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 7]. La courbe a été lissée, sur l'historique, en utilisant un modèle de courbe en S.

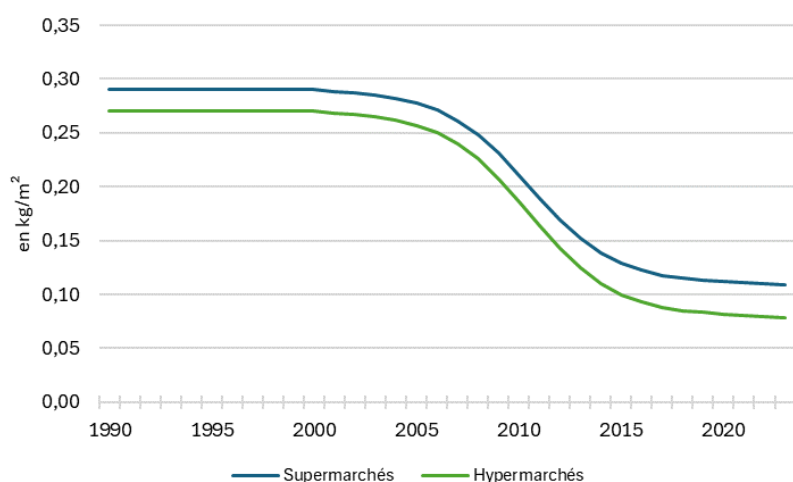


Tableau 14 – Charges moyennes en super et hypermarchés (kg/m²)

SECTEUR	AVANT 2000	2023
Hypermarchés	0,27	0,08
Supermarchés	0,29	0,11

Figure 42 Ratios de charge surfacique en supermarchés et hypermarchés

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

Tableau 15 – Charges moyennes des équipements par type de petits commerces (kg)

SECTEUR	AVANT 2000	2023
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 hermétiques	0,3	0,3
Drives - Groupes de condensation	200	200

3.2.1.3. 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 7] et du rapport RTOC de 1998 [Ref 23], 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 43. Depuis 2015, du fait de la 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 dans les nouvelles installations diminue progressivement et est supposée nulle en 2020 au profit d'autres réfrigérants : 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.

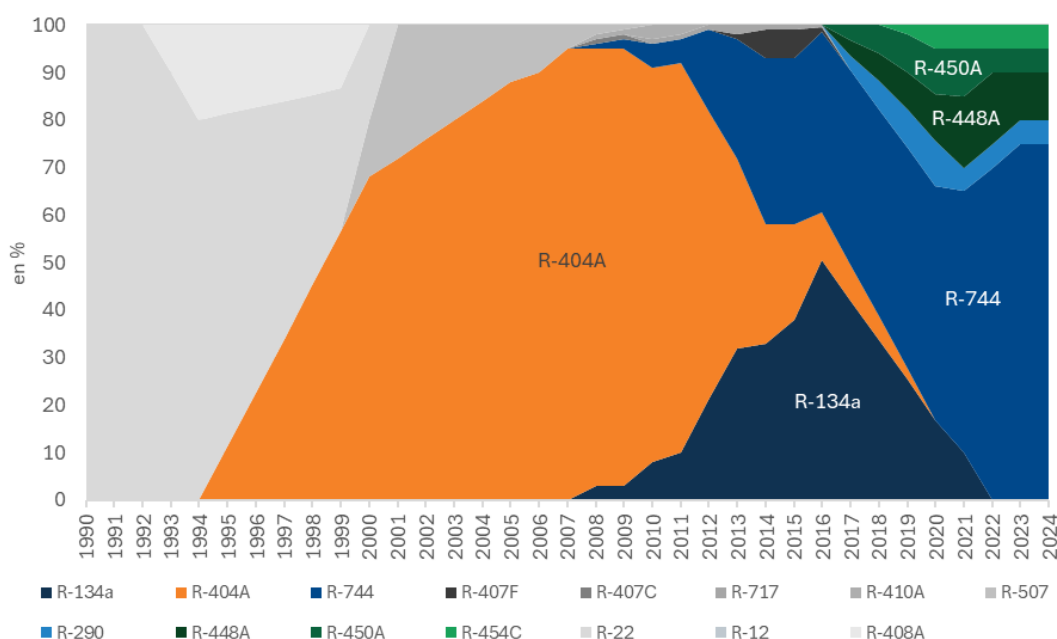


Figure 43 Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les nouvelles installations des hypermarchés

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 2023).

Des informations récentes, qui ont été communiqués entre la finalisation des calculs et la réalisation du rapport tendent à montrer que les hypothèses de retrofit prises pour les hyper et supermarchés sont trop optimistes et que le rythme des conversions d'installations mené par la grande distribution est plus lent qu'attendu. Ces hypothèses seront revues lors du prochain inventaire, ce qui conduira à une réestimation à la hausse de la banque et des émissions de R-404A.

- **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 44).

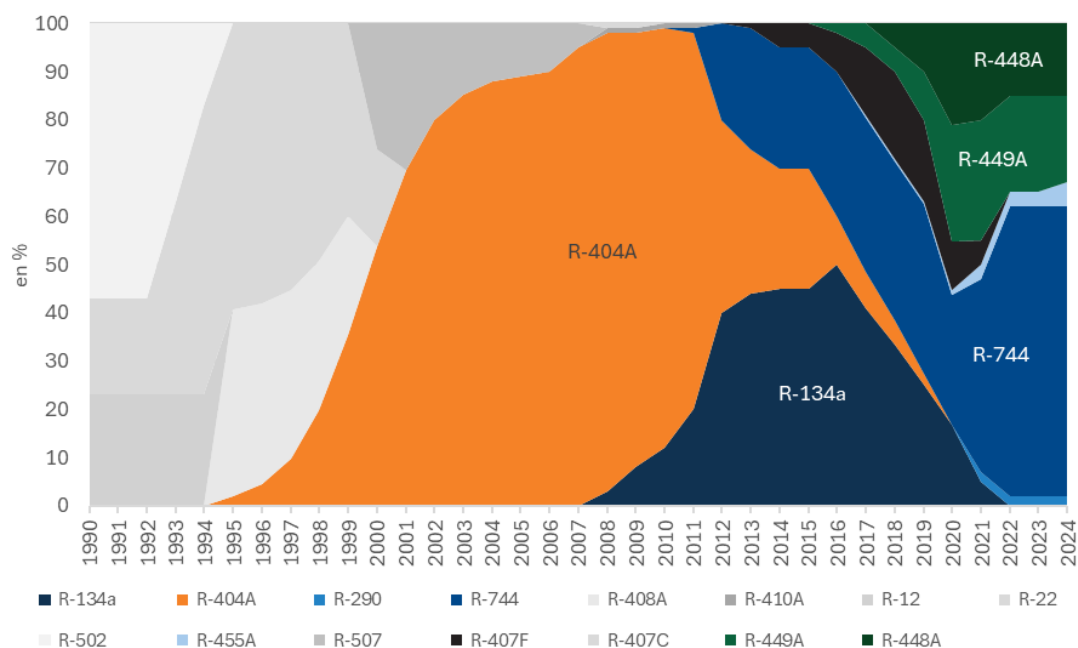


Figure 44 Evolution des fluides frigorigènes utilisés en supermarchés

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 2023, il est à nouveau considéré un niveau de retrofit de 20% de la banque de R-404A vers du R-448A/449A.

- **Groupes de condensation** : depuis 2000, les équipements des petits commerces équipés de groupes de condensation utilisaient 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).

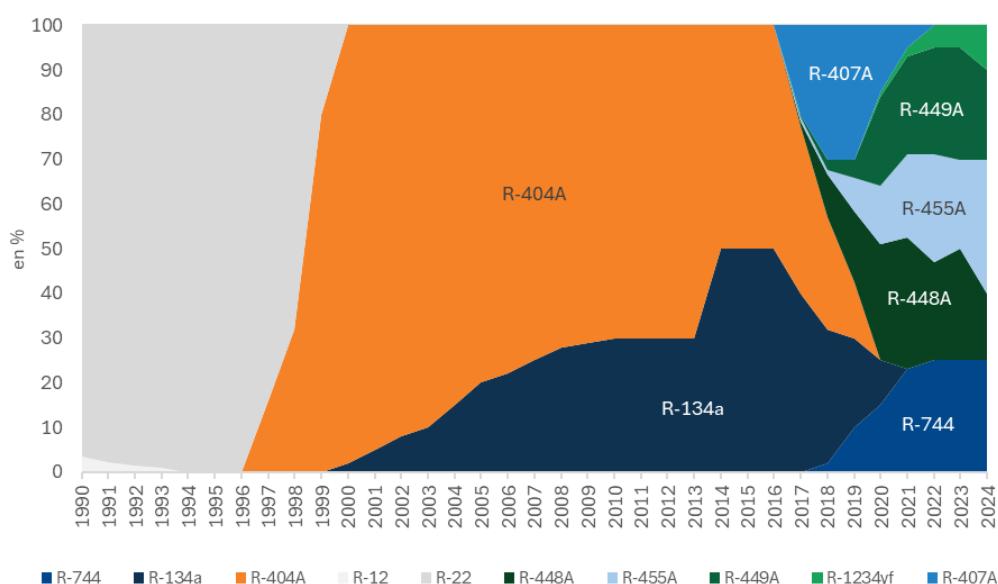


Figure 45 Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les petits commerces (groupes de condensation)

- **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.

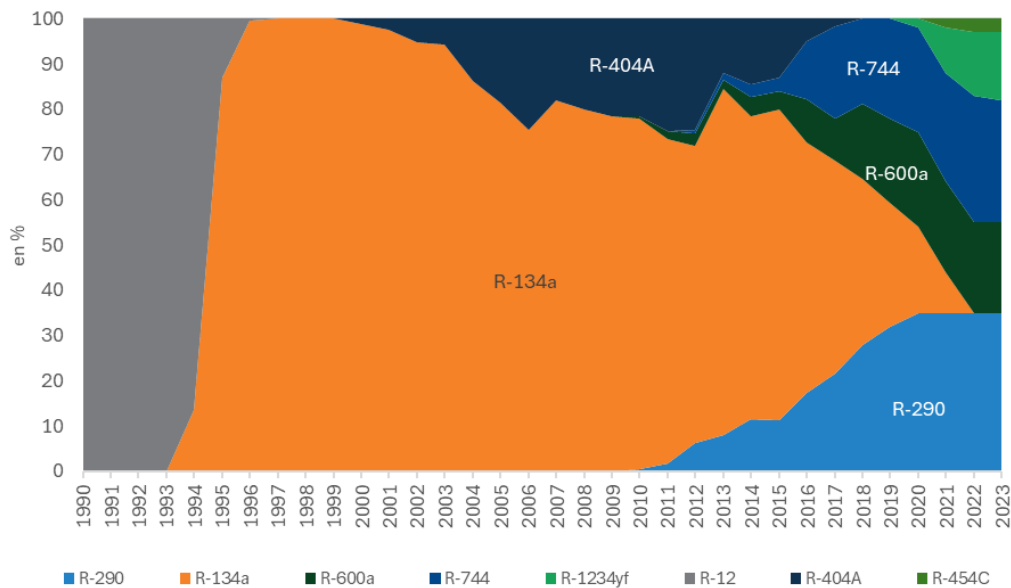


Figure 46 Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les petits commerces (groupes hermétiques)

3.2.1.4. 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 (Figure 128) 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.

3.2.2. Facteurs d'émissions

A la charge

Les facteurs d'émissions utilisés sont issus des Lignes directrices du GIEC ([Ref 24],[Ref 12]) et dépendent du mode de chargement des équipements (d'usine ou sur site). Les chiffres sont donnés dans le Tableau 16.

Tableau 16 – hypothèses de facteurs d'émission à la charge des équipements de froid commercial

SOUS-SECTEUR	TAUX D'EMISSION A LA CHARGE EN 1990	TAUX D'EMISSION A LA CHARGE EN 2023
Hypermarchés	4,5%	1,9%
Supermarchés	4,5%	1,9%
Groupes de condensation	4,5%	1,9%
Groupes hermétiques	3%	2,5%

Fugitif

Les courbes d'évolution des facteurs d'émissions fugitives, 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 17 – Facteur d'émission fugitive des équipements de froid commercial

SOUS-SECTEUR	TAUX D'EMISSION A LA CHARGE EN 1990	TAUX D'EMISSION A LA CHARGE EN 2023
Hypermarchés	35%	22%
Supermarchés	30%	17%
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 (lignes directrices du GIEC). Au-delà, afin de traduire l'amélioration des pratiques, l'hypothèse d'une diminution de ce taux à 10 % en 2035 est retenue et la progression est évaluée par une courbe en S.
- **Groupes hermétiques** : le taux d'émission fugitif associé aux groupes hermétiques est considéré constant à 1% sur toute la série temporelle, afin de prendre en compte les pertes accidentelles, le système étant hermétique.

A la maintenance

L'évolution du taux d'émission à la maintenance pour le secteur du froid commercial est donnée Figure 47. 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. Le même taux est considéré pour tout le secteur du froid commercial.

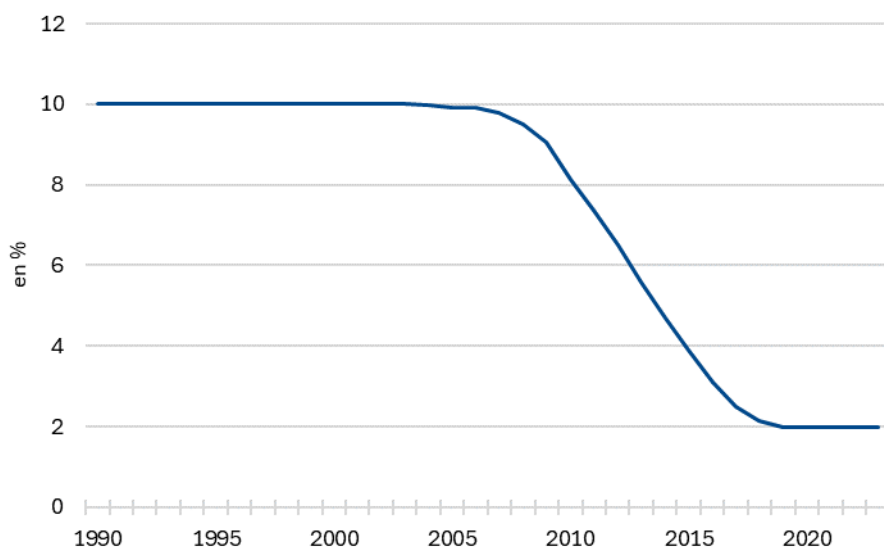


Figure 47 Taux d'émission à la maintenance - Froid commercial

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 48).

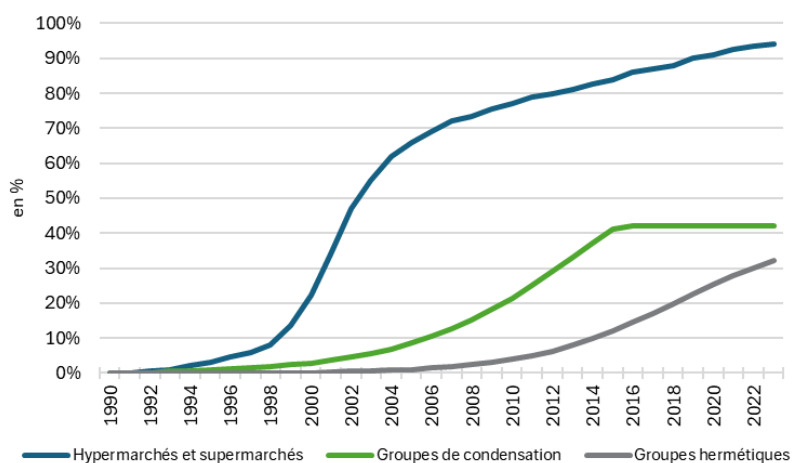


Figure 48 Efficacité de récupération en fin de vie des équipements dans le secteur du froid commercial

Pour 2023, les taux d'émissions de fin de vie présentés au tableau suivant sont pris en compte.

Tableau 18 – Hypothèses de facteurs d’émission fin de vie – secteur du froid commercial

SOUS-SECTEUR	TAUX D’EMISSION A LA CHARGE EN 1990	TAUX D’EMISSION A LA CHARGE EN 2023
Hypermarchés	100%	5%
Supermarchés	100%	6,5%
Groupe de condensation	100%	49%
Groupe hermétique	100%	70%

3.3. Résultats

3.3.1. Banque

La banque de froid commercial est évaluée à 5 924 t en 2023 (Tableau 51 en annexe). La banque des fluides frigorigènes non fluorés représente 20%, en croissance de 18% par rapport à 2022. La banque totale est relativement stable entre 2022 et-2023 (+3%) du fait d’une certaine stabilité du parc de magasins et d’une tendance à la réduction des charges des installations.

La banque de R-404A apparaît en forte réduction depuis plusieurs années, du fait des fins de vie et retrofits d’installations. Les hypothèses prises dans cette étude d’inventaire conduisent à une chute de presque 40% entre 2022 et 2023 et à une banque qui représente moins de 10% de la banque du froid commercial en 2023. *Ce résultat sera corrigé l’an prochain. Les informations récentes vont conduire à une révision des hypothèses concernant le rythme de retrofit des installations au R-404A et à une banque résiduelle de R-404A significativement plus élevée.*

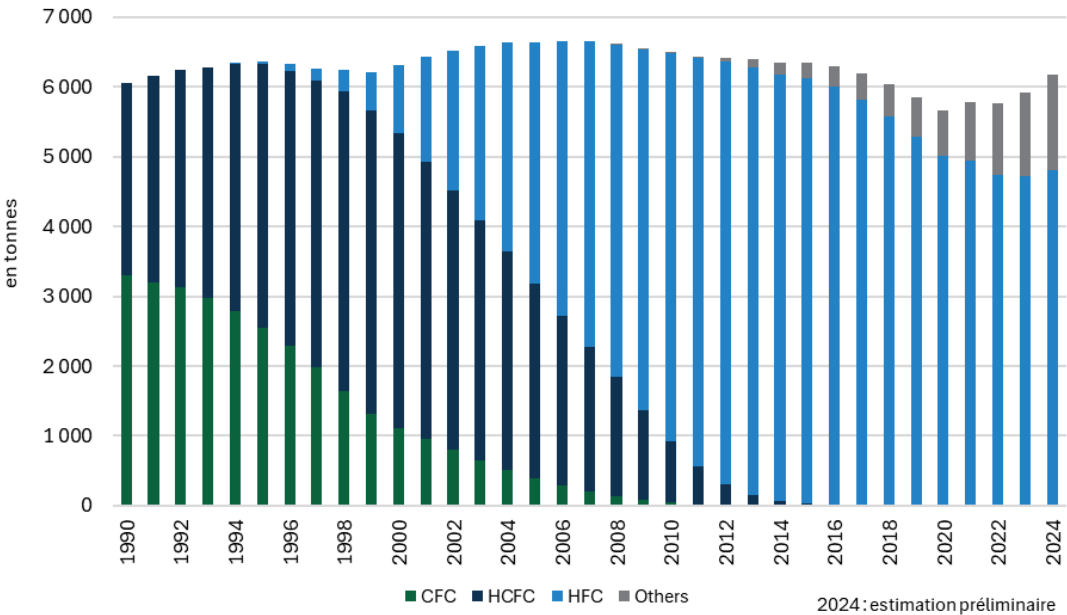


Figure 49 Banque de fluide dans le secteur du froid commercial

3.3.2. Demande

Demande totale

La demande totale comprend les besoins en production, à la charge pour les équipements neufs et pour la maintenance. C’est d’ailleurs cette dernière qui fait varier le plus les quantités utilisées et constitue presque la moitié de la demande. En 2023, le besoin est estimé à 1 580 tonnes en diminution de 4% comparée à 2022. Les principaux fluides frigorigènes, mis sur le marché pour le froid commercial, sont le R-448A/R-449A et le R-744 en 2023 (Tableau 54 en annexe). Les gaz non-fluorés remplacent peu à peu les HFC et représentent environ un quart de la demande aujourd’hui. *La répartition par fluide frigorigène de la demande pour le froid commercial sera revue dans la prochaine édition d’inventaire, au vu d’informations récentes. La part du R-404A s’en trouvera augmentée.*

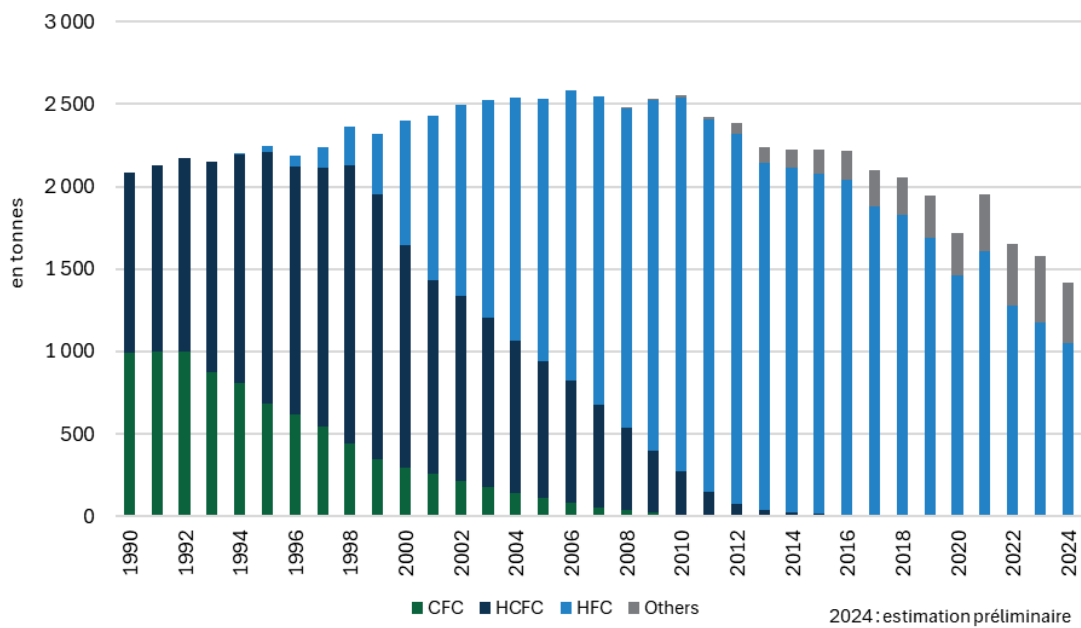


Figure 50 Quantités totales mises sur le marché en France dans le secteur du froid commercial

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.

82% de la demande pour la production d’équipements de froid commercial en France est constituée de fluides non fluorés, du fait de la part croissante des hydrocarbures dans les groupes équipant les petits commerces (Tableau 53 en annexe). Ces chiffres sont à prendre avec précaution car les données de production sont marquées d’une forte incertitude.

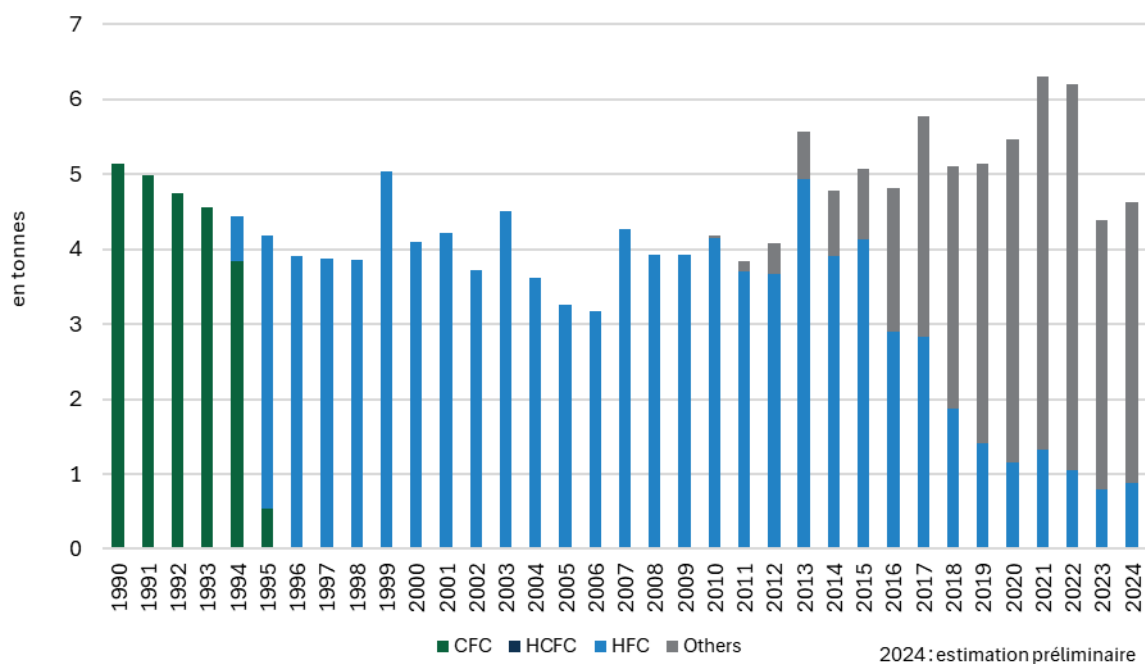


Figure 51 Quantités nécessaires à la production d'équipements en France dans le secteur du froid commercial

Les quantités nécessaires à la charge sur site des nouveaux équipements de froid commercial étaient en baisse régulière de 2011 à 2020 (Figure 52) du fait de la tendance à la réduction des charges induite par l'augmentation du nombre d'installations indirectes ou cascade. Depuis 2021, du fait des renouvellements d'installations, les quantités sont à la hausse. En 2023, ce besoin est estimé à environ 511 tonnes dont les deux tiers sont constitués de HFC et le reste de fluides non fluorés (Tableau 52 en annexe).

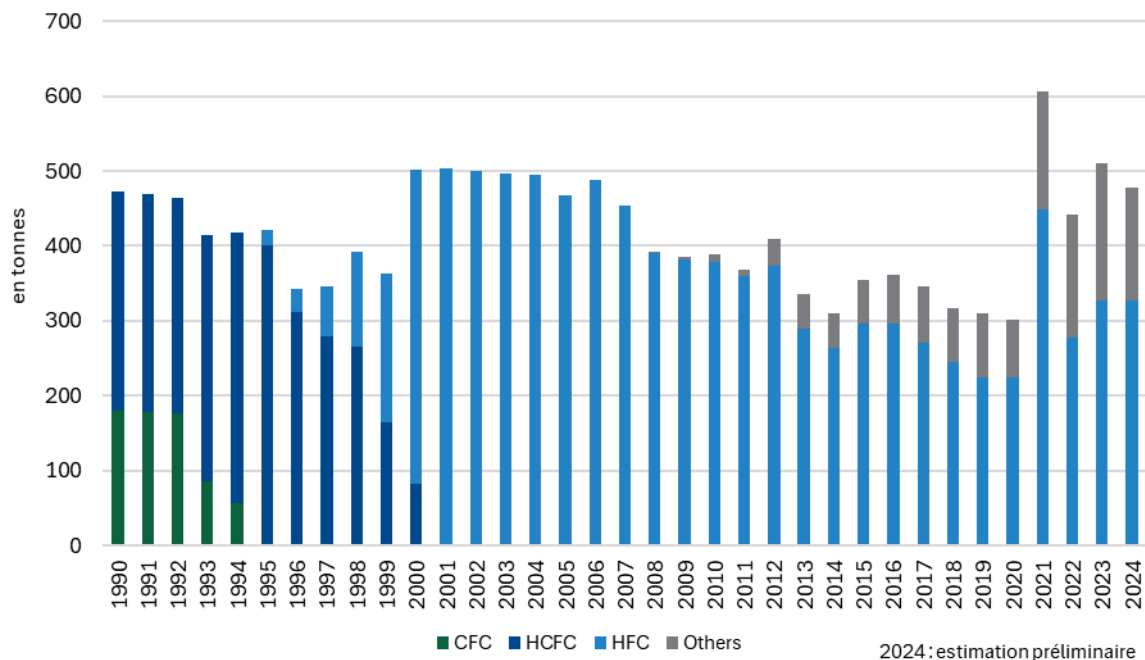


Figure 52 Besoin en fluides frigorigènes pour la charge sur site des équipements neufs pour le secteur du froid commercial

Besoin pour la maintenance

Le besoin pour la maintenance des installations est estimé à un peu plus de 700 tonnes en 2023 (Tableau 55 en annexe). Ce besoin est inférieur de plus de 50% du niveau de 2016. Une baisse significative depuis 2016-2017 des quantités nécessaires à la maintenance dans le secteur du froid commercial vient 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 ont incité à une meilleure récupération.

La répartition du besoin pour la maintenance en 2023 est à l'image de la banque : les parts du R-448A et du R-134a restent prépondérantes, suivies désormais par le R-744, le R-404A perdant de la vitesse au cours du temps.

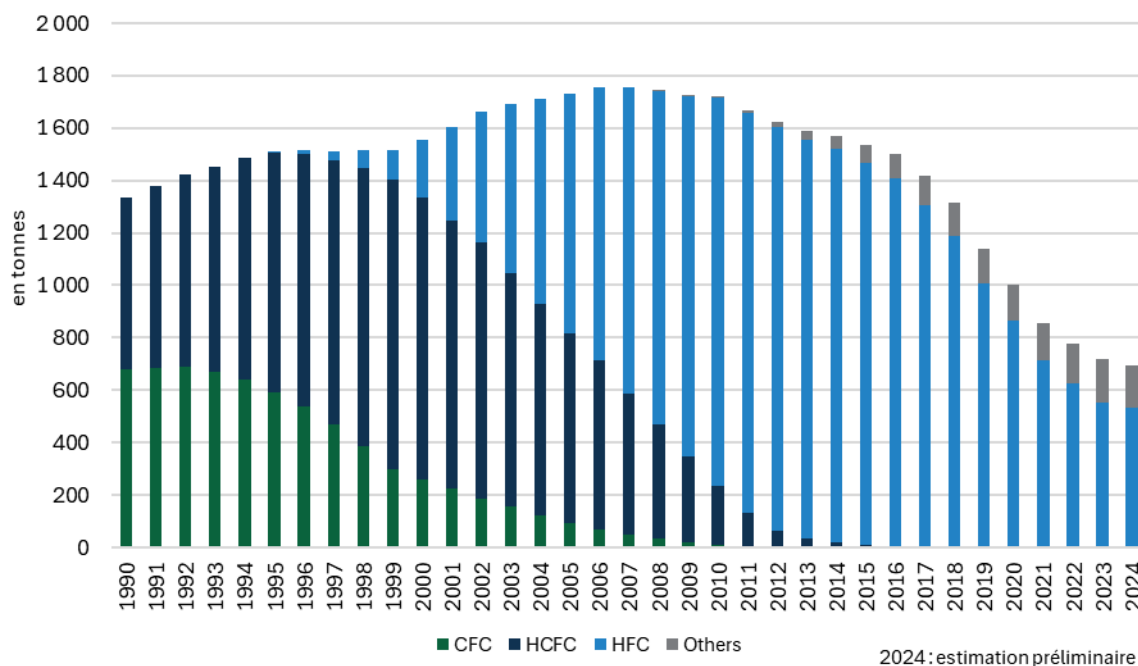


Figure 53 Besoin en fluides frigorigènes pour la maintenance du parc d'installations dans le secteur du froid commercial

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 2023, ce besoin est estimé à 140 tonnes, essentiellement de R-448A et R-449A (Tableau 56 en annexe).

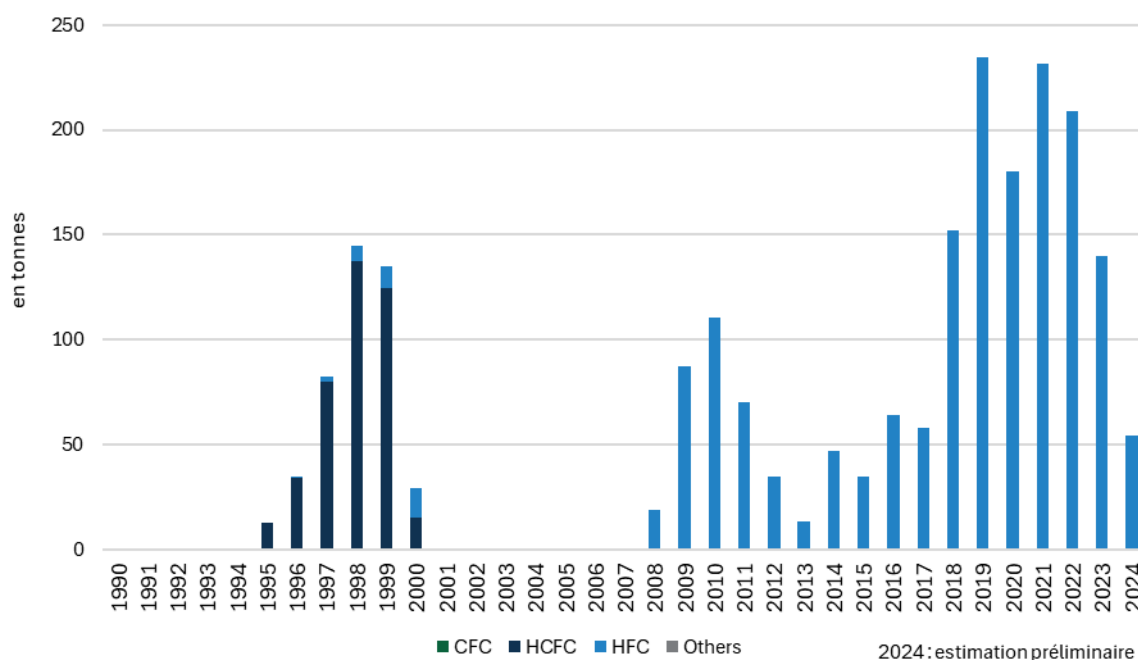


Figure 54 Besoin en fluides frigorigènes pour le retrofit d'installations dans le secteur du froid commercial

3.3.3. Emissions

Emissions totales en tonnes

En 2023, les émissions totales de l'ensemble du secteur du froid commercial sont estimées à environ 1 030 tonnes de fluides frigorigènes (Tableau 57 en annexe). La répartition par fluide frigorigène des émissions du froid commercial sera revue lors de la prochaine édition d'inventaire au vu des informations récentes. Les émissions de R-404A s'en trouveront significativement augmentées.

On constate une diminution des émissions du secteur depuis les années 2010 (Figure 55) notamment du fait de la tendance à la réduction des charges dans les supermarchés et les hypermarchés et de l'amélioration des pratiques et des facteurs d'émissions (Figure 47, Figure 48), notamment sur ces dernières années.

Les supermarchés et hypermarchés constituent plus de la moitié des émissions en 2023. Ce sont des installations aux fortes charges même si leur taux d'émission s'est réduit de façon significative depuis quelques années. Les groupes de condensation équipant les petits commerces suivent ces derniers avec une part de 44% des émissions. Celles des groupes hermétiques sont estimées à 1% du total du froid commercial pour tenir compte des fuites accidentelles.

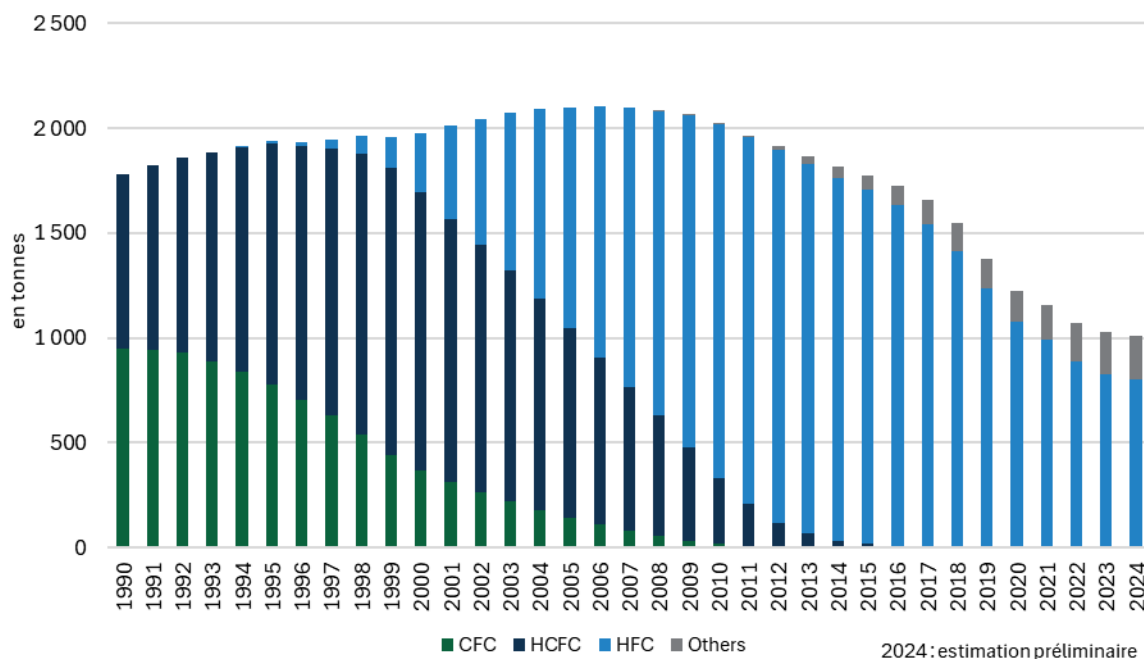


Figure 55 Emissions totales du froid commercial

Emissions totales en CO₂ équivalent

Les émissions CO₂ équivalentes du froid commercial baissent de façon drastique depuis 2012 avec une accélération ces dernières années de l'ordre d'environ 20 % par an depuis 4 ans (Figure 56). Ce résultat est à prendre avec précaution car il résulte, en partie, des hypothèses de retrofit d'installation prises en compte dans les hypothèses de calcul, qui semblent être trop optimistes et ont conduit à une trop forte baisse de la banque de R-404A. **Les émissions du froid commercial sont estimées à seulement 1,4 millions de tonnes de CO₂ en 2023 (Tableau 58 en annexe) mais seront revues nettement à la hausse dans la prochaine édition d'inventaire.**

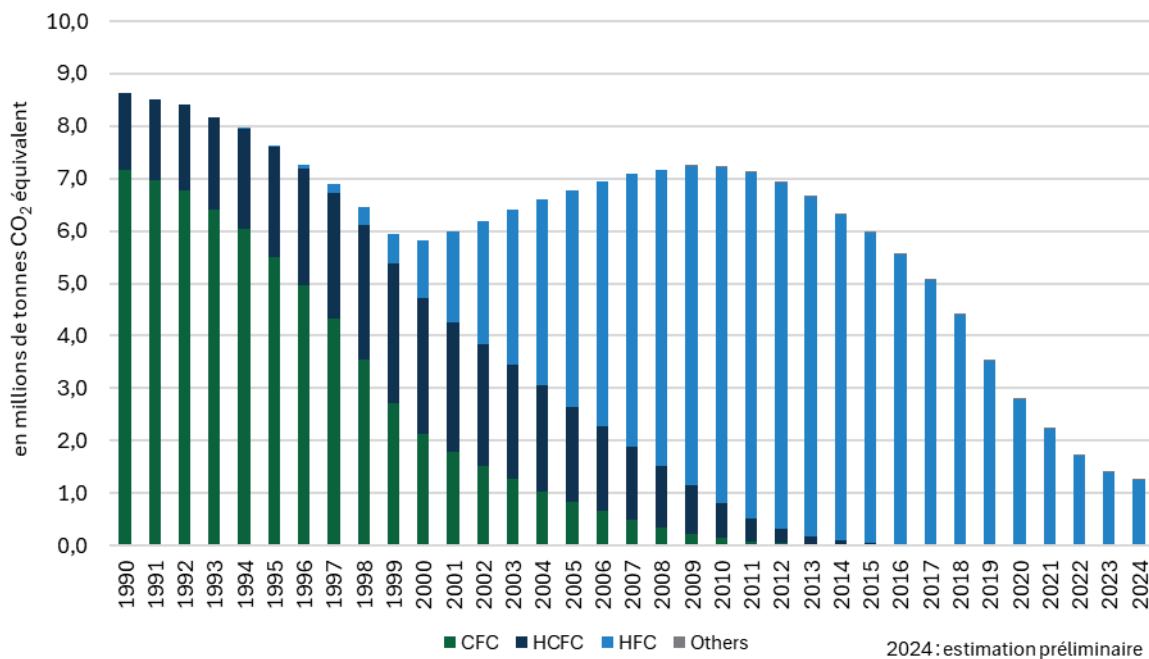


Figure 56 Emissions CO₂ équivalentes du froid commercial (millions de tonnes)

4

Transports frigorifiques

4.1. Introduction

Applications prises en compte

SECTEUR	SOUS-SECTEUR
Transport frigorifique	Semi-remorques (véhicules équipés de groupes frigorifiques autonomes de type « moteur thermique »)
	Utilitaires (véhicules équipés de groupes de type « poulie-courroie » accouplés au moteur)
	Conteneurs frigorifiques autonomes
	Navires réfrigérés

Remarques :

- 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 autonomes 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 19 – prise en compte de la maintenance dans la méthode de calcul pour le transport frigorifique

SOUS-SECTEUR	RYTHME DE MAINTENANCE	SEUIL	DECHARGE COMPLETE LORS DE LA MAINTENANCE
Véhicules utilitaires réfrigérés	Selon le seuil	70%	non
Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	Selon le seuil	70%	non
Cales réfrigérées	Selon le seuil	70%	non
Conteneurs frigorifiques	Selon le 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 15 ans pour les conteneurs frigorifiques et de 30 ans pour les navires équipés de cales réfrigérées [Ref 7]. Des courbes de durée de vie y sont associées, comme pour les autres secteurs.

4.2. Données et hypothèses

4.2.1. Données d'activités

4.2.1.1. 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 7], [Ref 26]) 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 20 – Marchés des groupes frigorifiques pour le transport routier

TYPE	1990	2000	2010	2020	2023
Véhicules utilitaires réfrigérés légers	2 724	3 273	4 299	7 219	5 772
Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	3 857	4 857	3 835	5 489	5 561

- **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 7], 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 7] et du Container Handbook [Ref 27].
- Le **transport frigorifique par voie ferroviaire** est peu développé en France [Ref 7]. Compte tenu de la similarité des technologies utilisées, le transport ferroviaire réfrigéré est supposé être comptabilisé dans le parc total de conteneurs frigorifiques.

PRODUCTIONS

- Les données de production des **véhicules du transport routier frigorifique** sont issues de communications du Cemafruid pour les rapports d'inventaires antérieurs [Ref 7] et extrapolées sur 2017-2022.

Tableau 21 – Productions estimées des groupes frigorifiques pour le transport routier

TYPE	1990	2000	2010	2020	2023
Véhicules utilitaires réfrigérés légers	1 526	2 690	5 570	5 353	5 502
Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	6 511	10 800	16 150	22 284	22 577

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

4.2.1.2. 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 7] et de communications du Petit Forestier [Ref 28]. Les charges des équipements du transport routier sont en baisse depuis 2007.

Tableau 22 – Evolution des niveaux de charge nominale des équipements frigorifiques du transport routier (en kg)

SOUS-SECTEUR	AVANT 2006	2010	2015	2020	2023
Véhicules utilitaires réfrigérés légers	2,50	2,20	2,19	2,02	2,00
Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	7,20	6,72	6,74	6,60	6,53

- Pour le **transport maritime**, les charges sont issues des anciens rapports d'inventaires [Ref 7]. 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 toute la série temporelle.

Tableau 23 – charges nominales des équipements frigorifiques du transport maritime (kg)

SOUS-SECTEUR	AVANT 2000	2023
Reefers	4000	1000
Conteneurs réfrigérés	4,60	4,60

4.2.1.3. 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 7], incluant des communications de Carrier et du Cemafruid,
- d'échanges avec Petit Forestier [Ref 28],
- d'échanges avec l'European Partnership for Energy and the Environment (EPEE) [Ref 22].

Entre 1970 et 1990 on considère que l'ensemble du parc de véhicules utilitaires réfrigérés légers fonctionnaient

au R-12. Au début des années 1990, l'hypothèse faite est qu'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.

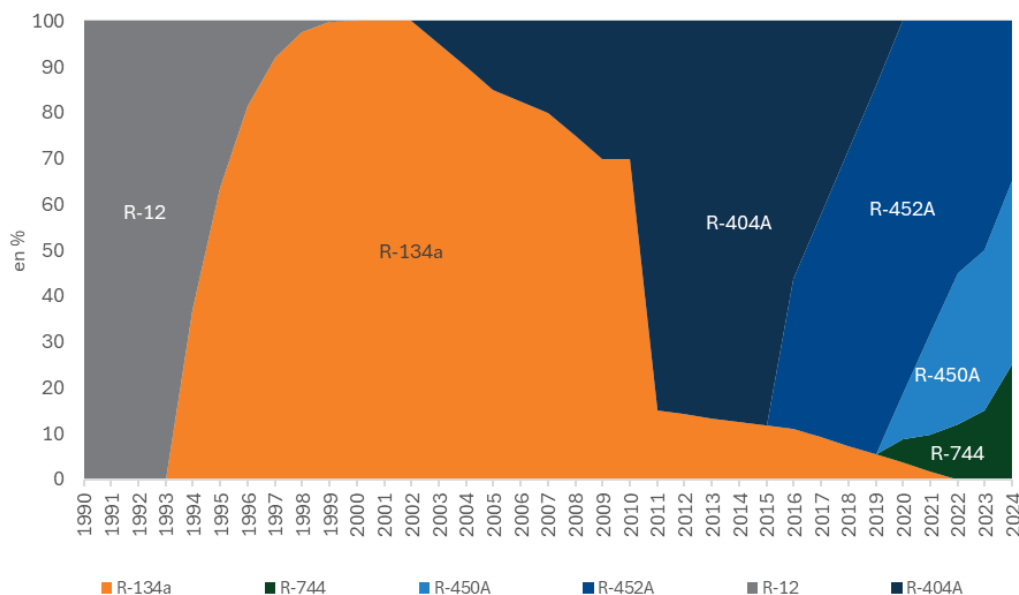


Figure 57 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les systèmes poulie courroie

- **Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques**

Jusqu'au milieu des années 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 23] ; [Ref 7]). 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, cependant, il est vite remplacé par des fluides frigorigènes à plus bas PRG. Les hypothèses d'évolution des fluides frigorigènes utilisés sont basées sur les tendances fournies par le Cemafrroid. Le R-452A apparaît sur le marché en 2016 et est majoritairement utilisé depuis 2018. 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.

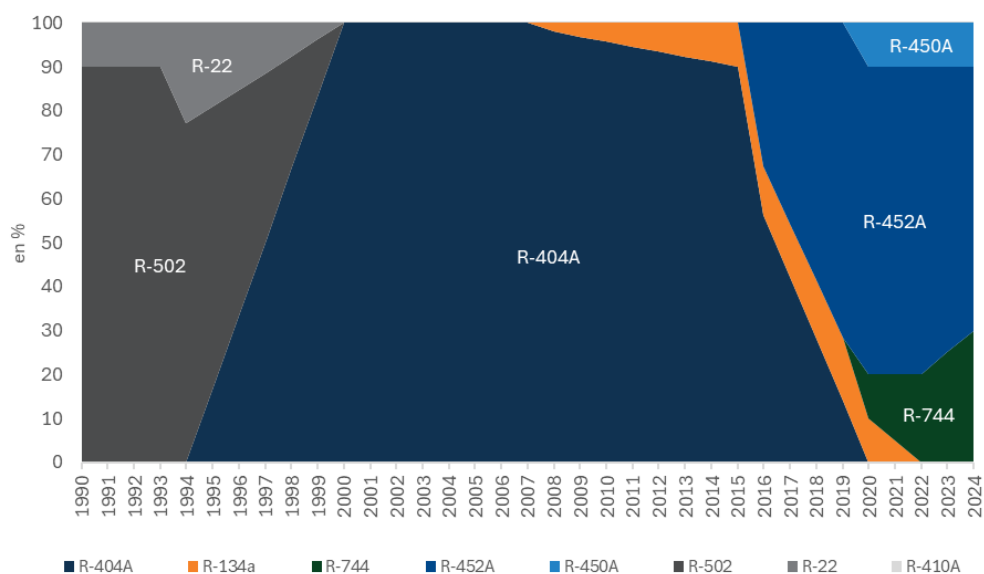


Figure 58 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les systèmes semi-remorques

- **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 29]. 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 59. Jusqu'en 1993, on estime que l'ensemble des conteneurs frigorifiques sont chargés au R-12 [Ref 23]. 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, 452A et le R-744. Ces hypothèses se basent principalement sur les rapports RTOC.

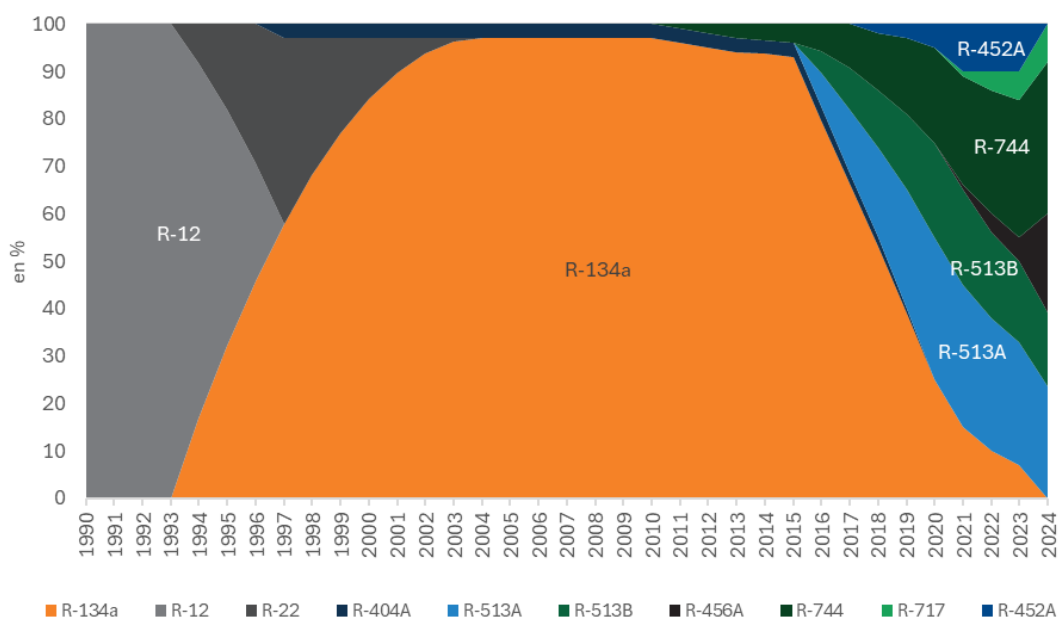


Figure 59 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les conteneurs frigorifiques (transport maritime)

4.2.1.4. Durée de vie

Les courbes de durées de vie du secteur du transport frigorifique sont construites sur la base de durée de vies des équipements : 30 ans pour les reefers, 15 ans pour les conteneurs réfrigérés (Figure 128) et 10 ans pour les véhicules routiers réfrigérés.

4.2.2. Facteurs d'émissions

A la charge

Les hypothèses concernant les facteurs d'émission à la charge sont issues des Lignes directrices du GIEC ([Ref 24], [Ref 12]).

Tableau 24 – Facteurs d'émissions à la charge pour le transport frigorifique

SOUS-SECTEUR	1990	2023
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%

Fugitif

Les facteurs d'émissions à l'usage pour l'ensemble des sous-secteurs du transport frigorifique sont donnés Tableau 25. Leur évolution a été reconstituée à partir de différentes références ([Ref 7], [Ref 23]). Depuis 2014 ces facteurs d'émission du transport routier sont calculés sur la base de données communiquées par Petit Forestier [Ref 28] et sont en baisse.

Tableau 25 – Facteurs d'émissions fugitives pour les applications du transport frigorifique

SOUS-SECTEUR	TAUX D'EMISSION A LA CHARGE EN 1990	TAUX D'EMISSION A LA CHARGE EN 2023
Reefers	35%	15%
Conteneurs frigorifiques	35%	20%
Véhicules utilitaires réfrigérés légers	35%	17%
Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	15%	12%

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.

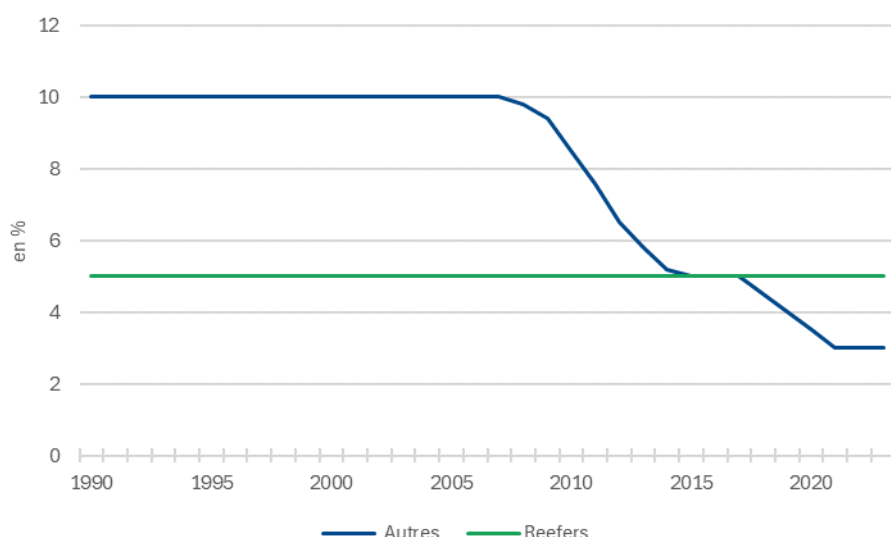


Figure 60 - Taux d'émissions à la maintenance – transports frigorifiques

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 2023. Ce niveau reste 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 environ 40 % en 2023 pour les reefers et 50 % pour les conteneurs.

Tableau 26 – Facteurs d'émission en fin de vie des équipements du transport frigorifique

SOUS-SECTEUR	1990	2023
Reefers	100%	61,4%
Conteneurs frigorifiques	100%	52,7%
Véhicules utilitaires réfrigérés légers	100%	29,7%
Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	100%	29,7%

4.3. Résultats

4.3.1. Banque

La banque du transport frigorifique, évaluée à environ 2 100 tonnes en 2023 (Tableau 51 en annexe) et amorce une petite baisse (-4%). Elle est constituée à 72 % par la banque des conteneurs réfrigérés et à 16 % par les systèmes autonomes équipant les camions frigorifiques.

La banque est en croissance régulière jusqu'en 2022, 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. Un léger recul est observé en 2023 par

rapport à 2022.

En 2023, le R-134a, très utilisé historiquement dans les conteneurs frigorifiques, représente un peu moins de la moitié de la banque. Le R-404A, historiquement très utilisé en transport frigorifique routier, ne compte plus que pour moins de 3 % de la banque du transport frigorifique.

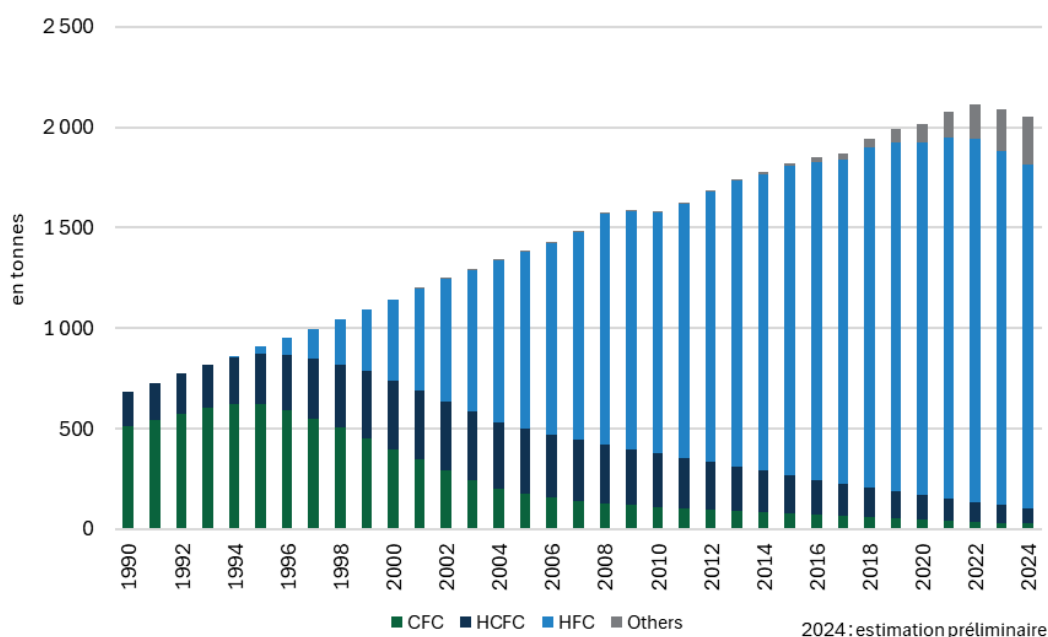


Figure 61 - Banque de fluide dans le secteur du transport frigorifique

4.3.2. Demande

Besoin pour les équipements neufs

Le besoin en fluides frigorigènes pour les équipements neufs est évalué aux alentours de 400 tonnes en 2023. Environ un quart de cette demande est liée à la production d'équipements (Tableau 53 en annexe), 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'impacte que les émissions à la charge, dont le niveau est faible, le facteur d'émissions étant bas. Cette demande est principalement constituée de HFC (80 % en 2023). Trois fluides se démarquent comme le R-513A/B (21%), le 452A (21%) et le R-134a (34%). La part des fluides non fluorés (R-744 principalement) est en croissance et représente environ 14% de la demande pour les équipements neufs en 2023.

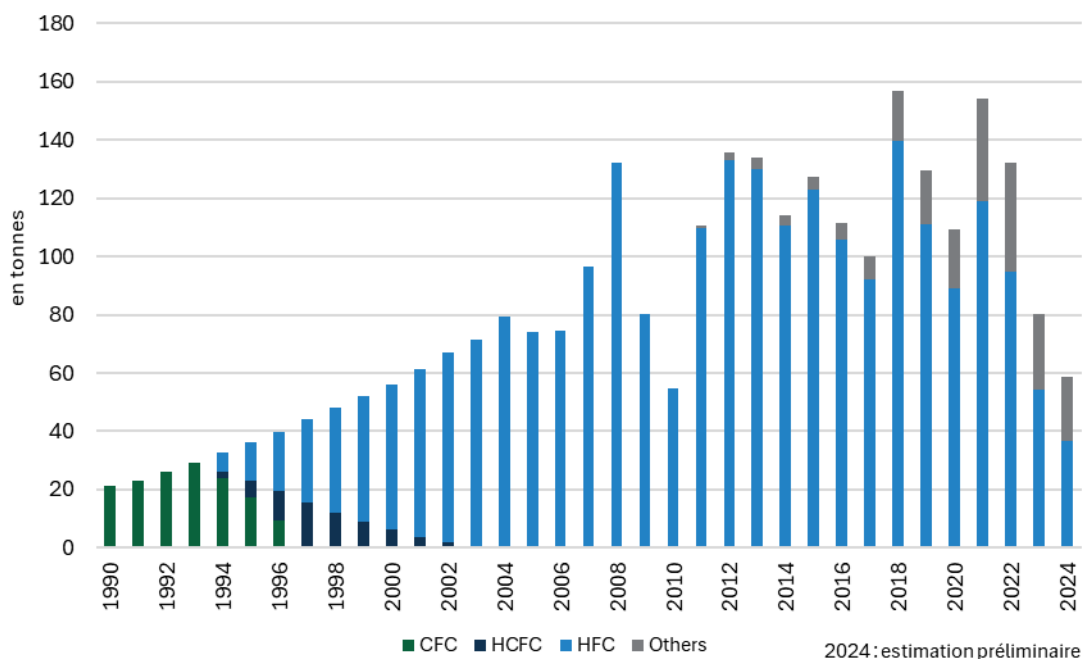


Figure 62 - Quantités nécessaires à la production dans le secteur du transport frigorifique

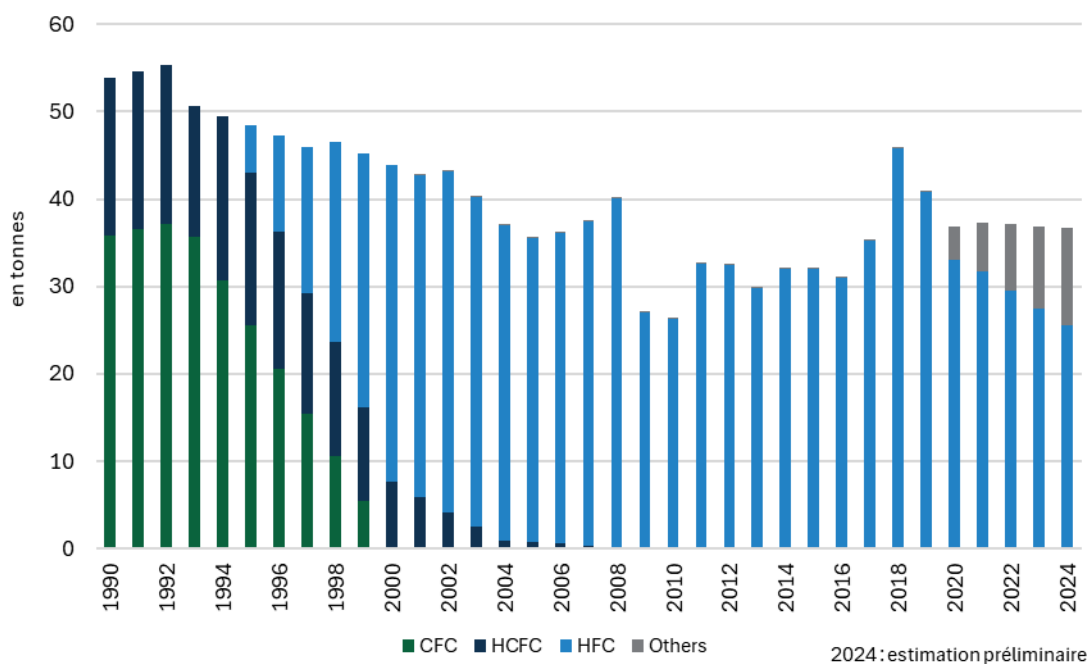


Figure 63 - Quantités nécessaires à la charge des équipements sur site pour le secteur du transport frigorifique

Besoin pour la maintenance

La tendance à la baisse des facteurs d'émissions permet d'observer des quantités nécessaires à la maintenance relativement stables, autour de 200 tonnes par an (Tableau 55 en annexe), pour l'ensemble du secteur du transport frigorifique malgré une croissance de la banque, les taux d'émissions des conteneurs étant particulièrement bas.

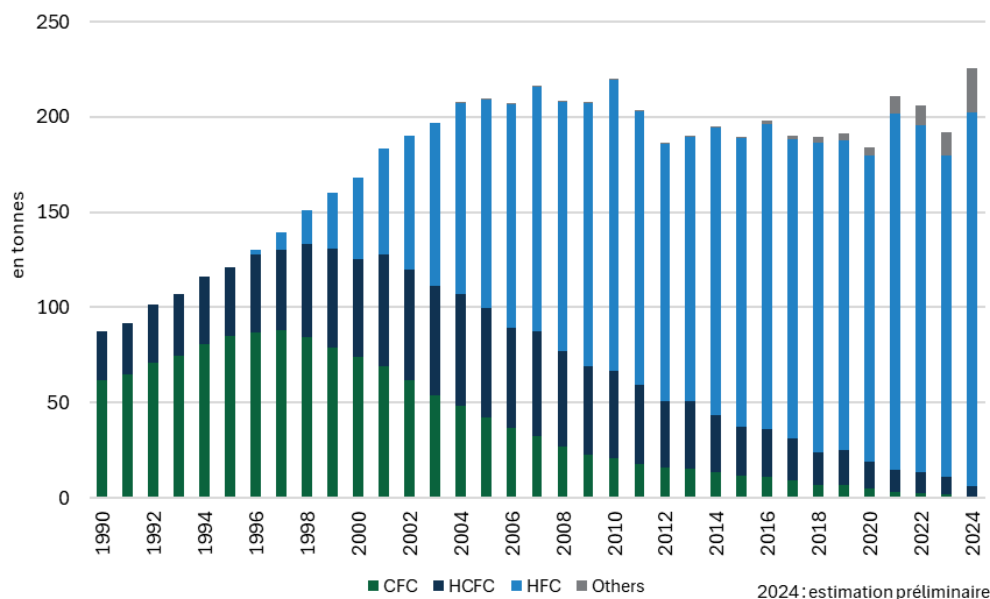


Figure 64 - Besoin pour la maintenance dans le secteur du transport frigorifique

4.3.3. Emissions

Emissions totales en tonnes

Le niveau 2023 des émissions totales dues à l'ensemble du secteur du transport frigorifique est estimé à environ 460 tonnes de fluides frigorigènes (Tableau 57 en annexe) dont plus de 80 % proviennent du transport maritime et plus de 80% des HFC.

Contrairement à la banque qui est en augmentation régulière, on constate une stabilité des émissions du secteur (Figure 65), en lien avec la baisse des taux d'émission fugitifs des équipements, les émissions fugitives représentant plus de 90% des émissions totales du secteur.

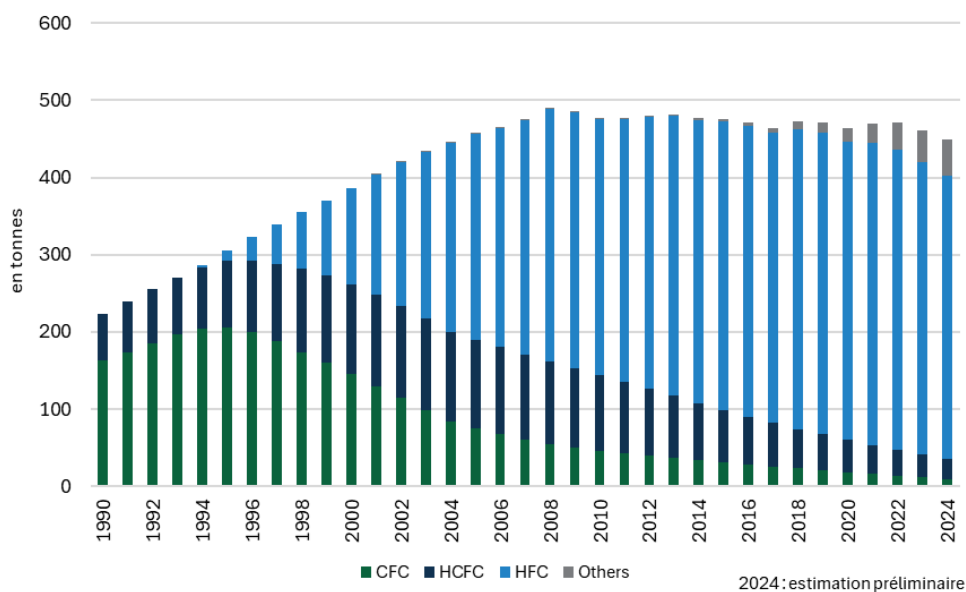


Figure 65 - Emissions totales du transport frigorifique

Emissions totales en CO₂ équivalent

Alors qu'elles culminaient à près de 2 millions de tonnes de CO₂ dans les années 1995, les émissions du transport frigorifique représentent environ 700 milliers de tonnes de CO₂ en 2023 (Tableau 58 en annexe) grâce à l'introduction des nouveaux réfrigérants et à la baisse des taux d'émissions fugitives (Figure 66). Ce secteur, étant traité au niveau international et les navires du transport maritime ayant des durées de vie élevées, comporte encore une banque de CFC, 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 (AR5).

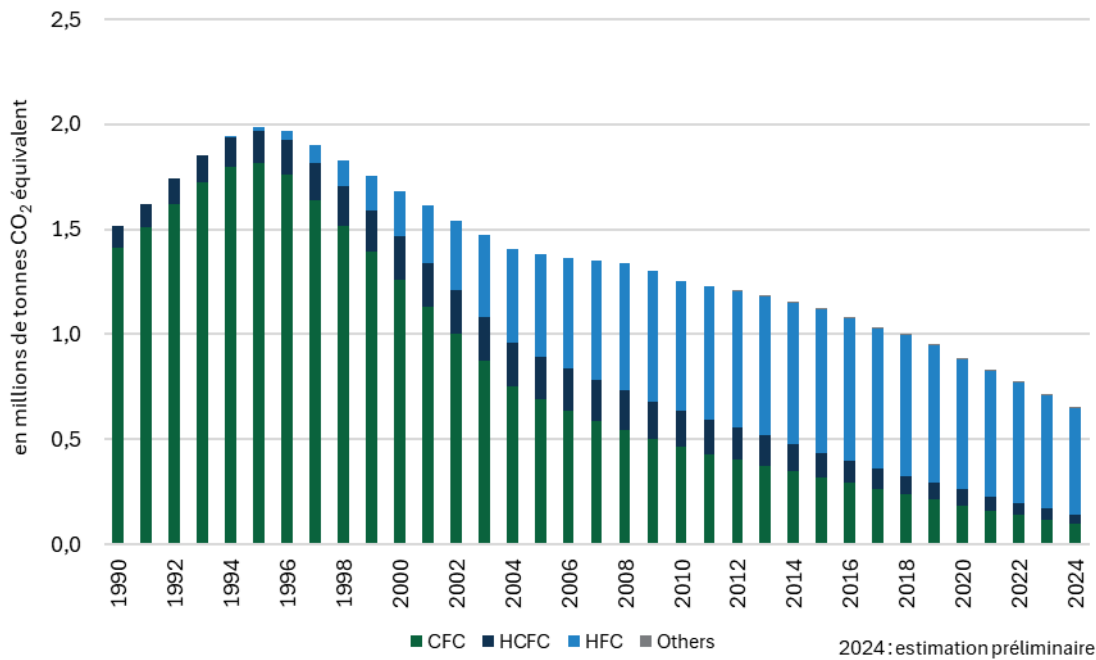


Figure 66 - Emissions CO₂ équivalentes du transport frigorifique (millions de tonnes)

5

Froid industriel

5.1. Introduction

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 et ainsi vérifier l'exhaustivité des procédés à prendre en compte, en particulier sur les applications des procédés industriels (chimie, pharmacie).

Applications prises en compte

SECTEUR	SOUS-SECTEUR
Froid industriel	Agroalimentaire : • viande • lait • brasserie et industrie du vin • autres industries agroalimentaires (regroupées pour cet inventaire mais qui pourront être décomposées ultérieurement) • entrepôts réfrigérés Procédés chimiques Procédés pharmaceutiques Production caoutchouc Patinoires Tanks à lait

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 que, dans les hypothèses du modèle, lorsqu'une opération annuelle de maintenance a lieu, 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 entre 20 et 30 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.

5.2. Données et hypothèses

5.2.1. 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 7] :

- 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.

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 31]. 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 ainsi que les autres productions agroalimentaires (surgelés, poisson, chocolat, brasseries, etc.). Dans l'attente de données complémentaires plus détaillées, les productions agroalimentaires autres que celles de la viande et du lait ont été rassemblées en un seul sous-secteur « autres productions ».

- **Tanks à lait**

Le marché des tanks à lait (ou refroidisseurs à lait) a été reconstitué à partir des données anciennes d'inventaire [Ref 7] et, depuis 2020, des données fournies par le groupe Serap [Ref 51].

- **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 27 – Répartition des surfaces d'entrepôts frigorifiques en France – Insee 2012

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

Source : SOeS, enquête entrepôts 2010

* Température mixte : à la fois positive et négative.

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

Il est considéré que la part des entrepôts ayant du froid négatif est d'environ 44 % (d'après le Tableau 27).

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 20 ans.

• Procédés industriels

Cette catégorie inclut les sous-secteurs des procédés de l’industrie chimique, pharmaceutique et du caoutchouc. Les productions de l’industrie chimique et pharmaceutique sont marquées d’une forte incertitude et en attente de données complémentaires.

Charge nominale

Dans le cas du froid industriel, la charge installée est estimée à partir de plusieurs ratios de charge [Ref 7].

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 systèmes indirects en croissance.

Tableau 28 – Ratios frigorifiques caractéristiques par application

APPLICATION	VIANDE	LAIT	AUTRES	ENTREPOTS
Besoin frigorifique pour la production (kW/t ou kW/m ³)	0,44	0,013	0,023	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.

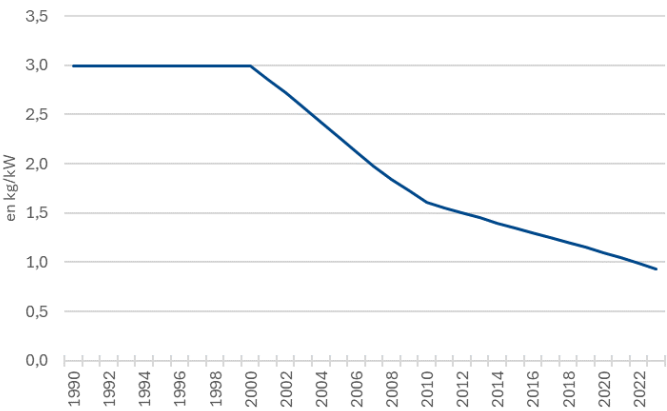


Figure 67 Ratio de charge équivalent – Exemple de l’industrie laitière

Les niveaux de charge des systèmes frigorifiques utilisés dans les patinoires sont issus des enquêtes d’inventaires antérieures [Ref 7] et dépendent du fluide utilisé. En 2023, 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 11 kg 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 51].

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 prise 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.

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 68), 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.

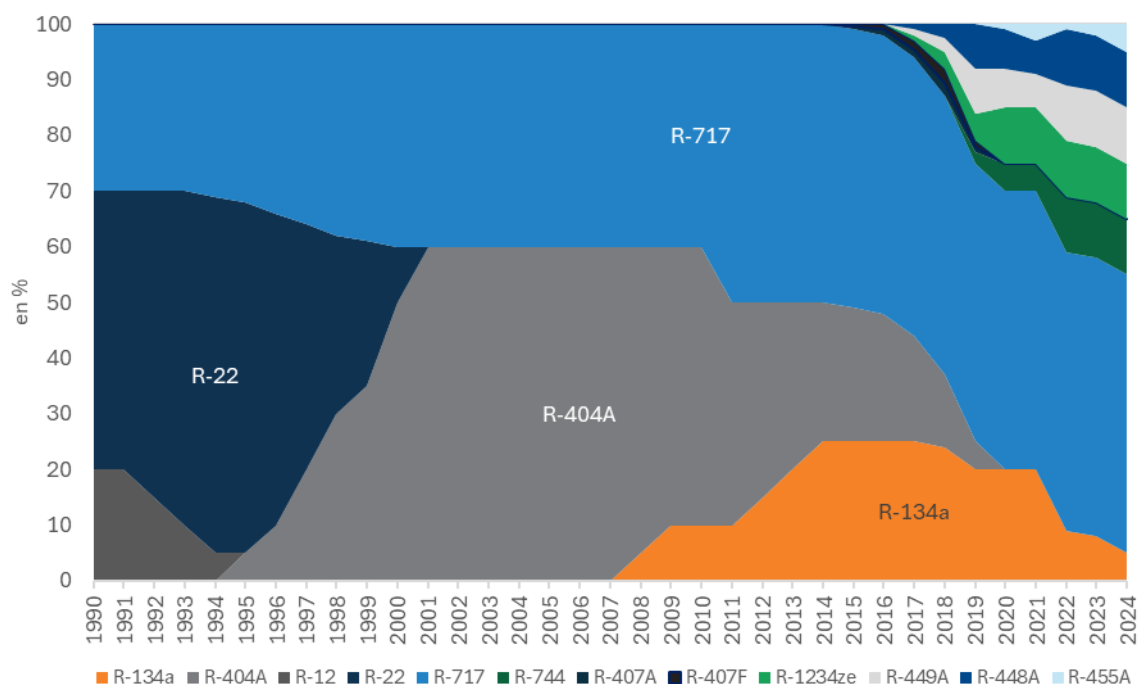


Figure 68 Evolution des réfrigérants utilisés dans les installations neuves de l’industrie de la viande

Quant au 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 51]. Depuis 2022, le R-455A commence à être utilisé.

Pour le sous-secteur des patinoires, le R-134a a longtemps été utilisé, notamment pour les patinoires mobiles. En 2023, il est considéré que 30% des patinoires utilisent le R-134a, 20% le R-744 et que le reste des nouvelles installations utilise le R-448A, R-449A, le R-513A ou l’ammoniac.

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 128).

5.2.2. Facteurs d'émissions

A la charge

Les hypothèses de facteurs d'émissions à la charge des installations sont issues des Lignes directrices du GIEC ([Ref 24], [Ref 12]).

Tableau 29 – Facteur d'émission à la charge des installations de froid industriel

SOUS-SECTEUR	1990	2023
Patinoires	5,0%	3,0%
Tanks à lait	5,0%	3,0%
Industrie pharmaceutique	5,0%	1,0%
Industrie du caoutchouc	5,0%	2,5%
Autres (dont agroalimentaire et entrepôts)	5,0%	1,0%

Fugitif

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

Tableau 30 – Facteurs d'émissions fugitives par application du froid industriel

SOUS-SECTEUR	TAUX D'EMISSION A LA CHARGE EN 1990	TAUX D'EMISSION A LA CHARGE EN 2023
Industrie de la viande	15%	6,5%
Industrie du lait	15%	6,4%
Brasserie et industrie du vin	15%	9,5%
Autres industries agroalimentaires	15%	9,5%
Entrepôts	15%	10%
Industrie chimique	15%	10%
Industrie pharmaceutique	15%	10%
Industrie du caoutchouc	100%	14%
Patinoires	15%	7,5%
Tanks à lait	15%	7,4%

- **Industries agroalimentaires et entrepôts** : sur la base des hypothèses des anciennes études d'inventaires [Ref 7], 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 10% à 14% en 2023, faute de communication plus

précise, et en légère décroissance depuis 2009.

A la maintenance

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

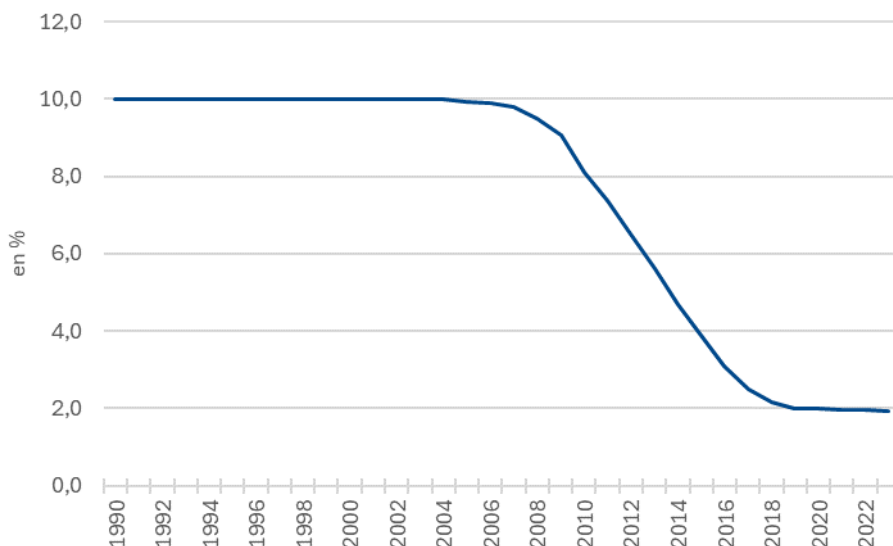


Figure 69 - Taux d'émission à la maintenance - Froid industriel

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 (Tableau 31). 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.

- **Industries agroalimentaires** : sur la base des hypothèses des anciennes études d'inventaires [Ref 7], 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, 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 7], le début de la récupération en fin de vie est pris en compte à partir de 1993, pour atteindre 74% en 2005 et 83 % en 2013 pour atteindre plus de 90 % en 2023.
- **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.

Tableau 31 – Facteurs d'émissions en fin de vie des équipements du froid industriel

SOUS-SECTEUR	1990	2023
Industrie de la viande	100%	5,0%
Industrie du lait	100%	5,0%
Brasserie et industrie du vin	100%	5,0%
Autres industries agroalimentaires	100%	5,0%
Entrepôts	100%	8,0%
Industrie chimique	100%	5,0%
Industrie pharmaceutique	100%	5,0%
Industrie du caoutchouc	100%	5,0%
Patinoires	100%	18,5%
Tanks à lait	100%	39,8%

5.3. Résultats

Cette partie présente les [résultats du froid industriel hors chillers](#). Ces derniers sont présentés de façon indépendante, dans le chapitre suivant. L'hypothèse étant que deux tiers des chillers peuvent être attribués au froid industriel. Une enquête a démarré auprès des adhérents d'Uniclimate mais la participation n'est pas suffisamment significative pour pouvoir vérifier si cette clé de répartition sectorielle des chillers est toujours correcte. L'enquête sera poursuivie l'an prochain auprès des professionnels.

5.3.1. Banque

La banque du froid industriel est estimée à près de 9 200 tonnes en 2023 (Tableau 51 en annexe), constituée à 61% 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'interdiction d'utilisation du R-404A dans les installations neuves à partir de 2020, l'ammoniac est largement utilisé dans les nouvelles installations. Des fluides plus bas en PRG font leur apparition en 2017 comme le R-448A/R-449A et le 513A. La banque d'ammoniac représente 37% de la banque totale du froid industriel en 2023, suivie par le R-134A (23%) et le R-448A/R449A (13%).

D'un point de vue sectoriel, l'industrie chimique et les industries agro-alimentaires représentent la moitié de la banque du froid industriel en 2023 (27% et 24% respectivement sans compter les brasseries et industries du vin (23%)), puis viennent les entrepôts avec 16%.

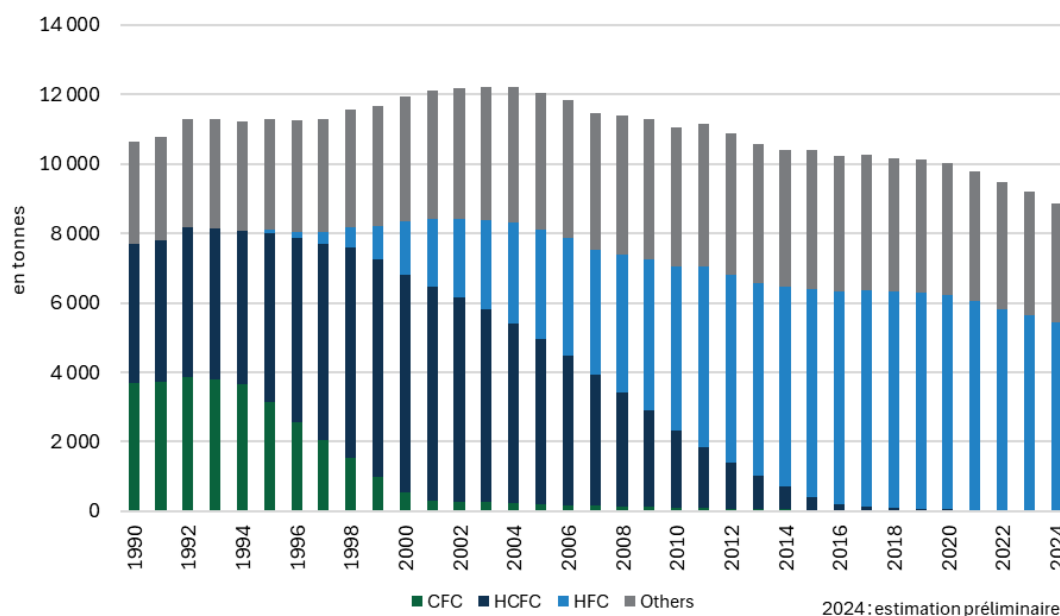


Figure 70 - Banque de fluide dans le secteur du froid industriel

5.3.2. Demande

Besoin pour les équipements neufs

La demande pour les nouvelles installations du secteur du froid industriel (Tableau 52 en annexe) est dominée en 2023 par l'ammoniac (39 %), principalement utilisé en industrie agroalimentaire et entrepôts. L'utilisation de R-134a diminue de 11% entre 2022 et 2023 passant ainsi à 18% de la demande du froid industriel remplacé progressivement par des fluides frigorigènes plus pas en PRG comme le 513A (17% du besoin en 2023), principalement utilisés dans les procédés industriels.

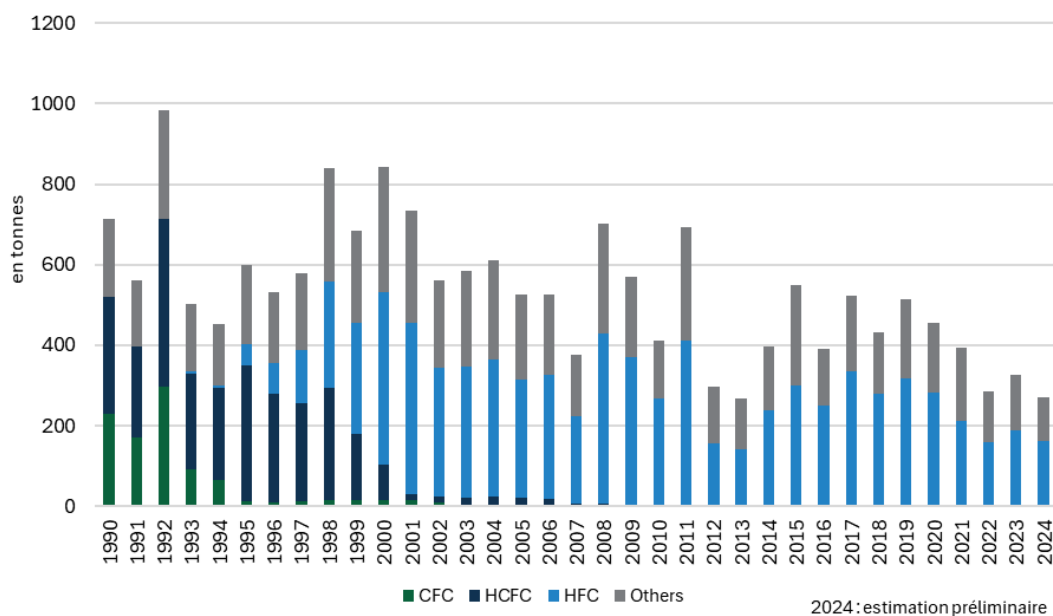


Figure 71 - Besoin en fluides frigorigènes pour les installations neuves du froid industriel

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 72). Par ailleurs, l’usage de l’ammoniac tend à réduire les taux d’émissions puisque l’ammoniac permet leur détection plus rapidement. En 2023 (Tableau 55 en annexe), on estime que 63% des quantités demandées pour la maintenance sont des HFC, soit environ 530 tonnes, le reste est principalement de l’ammoniac (environ 300 tonnes).

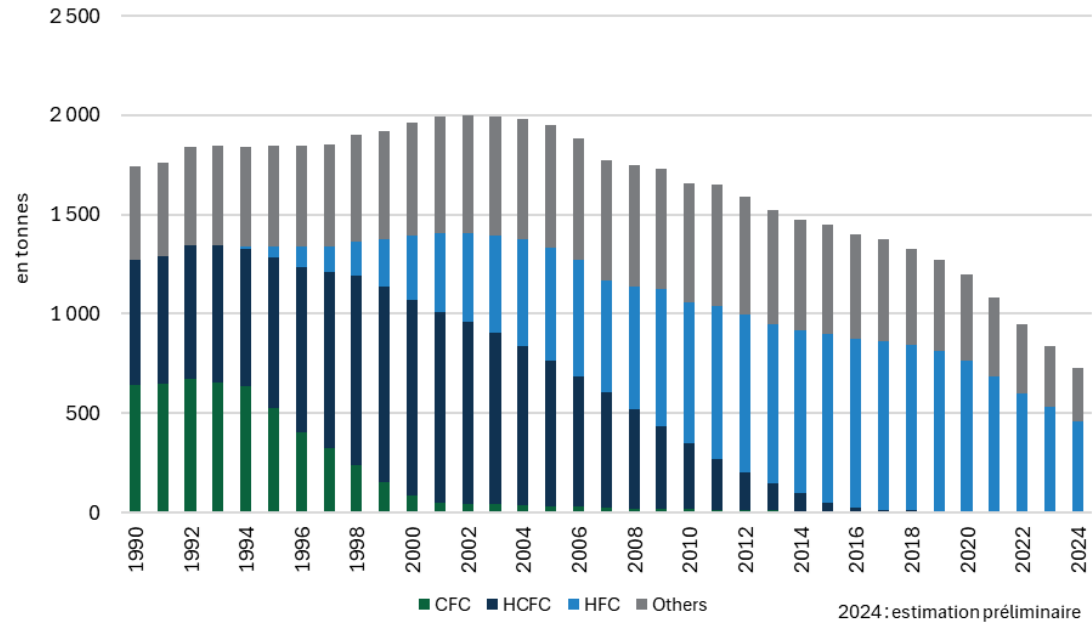


Figure 72 - Quantités nécessaires à la maintenance dans le secteur du froid industriel

Besoin pour le retrofit

Depuis 2018, du fait des approches d’interdiction d’usage des fluides frigorigènes de PRG supérieur à 2 500, pour la maintenance puis pour les installations neuves, de nombreux retrofits sont mis en œuvre. La demande pour le retrofit est élevée, évaluée à 230 tonnes de HFC en 2023 (Tableau 56 en annexe).

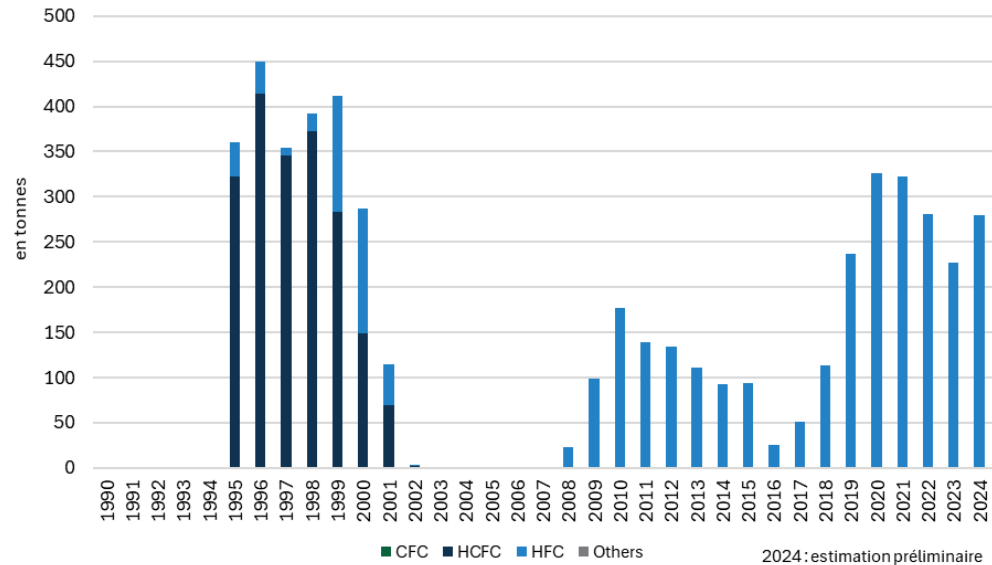


Figure 73 - Besoin pour le retrofit dans le secteur du froid industriel

5.3.3. Emissions

Emissions totales en tonnes

Les émissions totales du secteur du froid industriel sont estimées à 900 tonnes en 2023 (Tableau 57 en annexe), 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 baissent et la récupération en fin de vie est très élevée, une large part des installations étant classées pour l'environnement (ICPE).

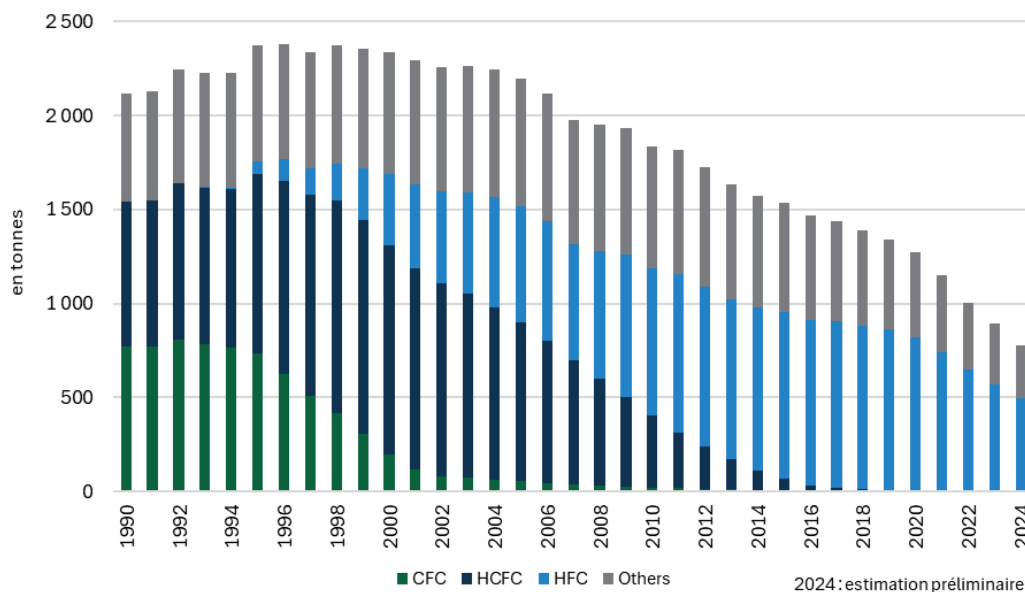


Figure 74 - Emissions totales du froid industriel

Emissions totales en CO₂ équivalent

Alors qu'elles culminaient aux environs de 10 millions de tonnes de CO₂ dans les années 1990, les émissions de fluides frigorigènes du froid industriel ne représentent plus que 1 million de tonnes de CO₂ en 2023 (Tableau 58 en annexe). La tendance décroissante de la banque, sa forte proportion d'ammoniac et la baisse des taux d'émission expliquent cette tendance. Celle-ci est plus significative depuis 2018 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 75).

D'un point de vue sectoriel, l'agroalimentaire 41% des émissions CO₂ équivalentes du froid industriel dont 12% pour l'industrie de la viande et 5% pour l'industrie du lait, suivi de l'industrie chimique avec 37%, les entrepôts avec 12%.

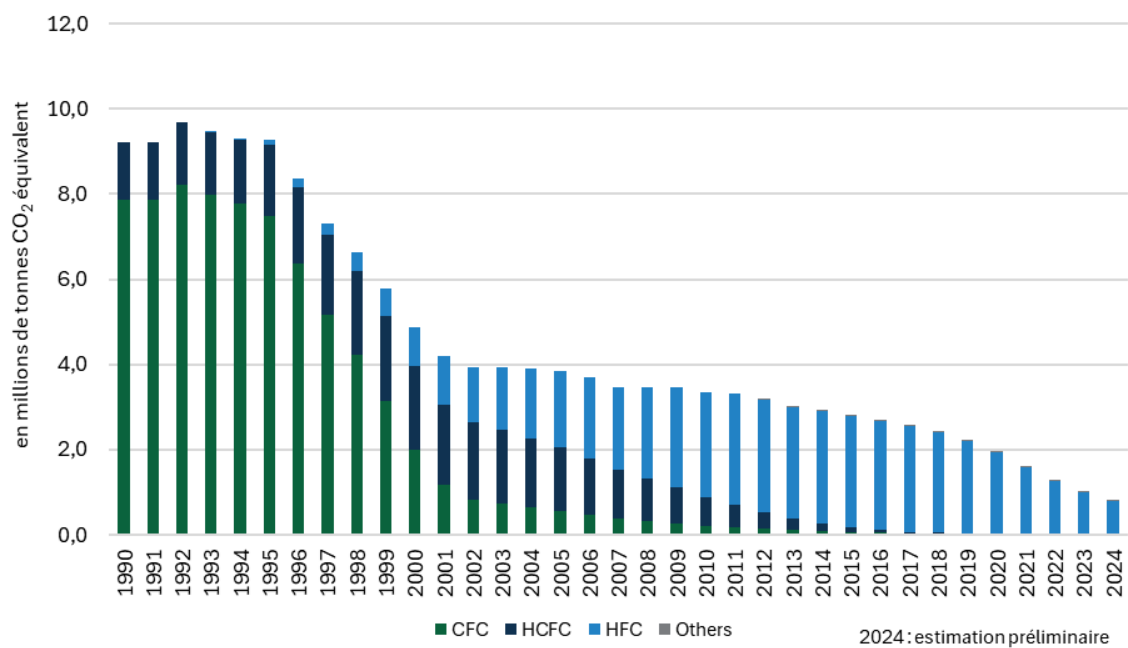


Figure 75 - Emissions CO₂ équivalentes du froid industriel (millions de tonnes)

6

Groupes refroidisseurs à eau (GRE)

6.1. 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.

Applications prises en compte

SECTEUR	SOUS-SECTEUR
Groupes refroidisseurs à eau	À compresseur centrifuge De forte puissance (> 350 kW) De moyenne puissance (50 à 350 kW) De faible puissance (< 50 kW)

Modes de charge

Les groupes refroidisseurs à eau, chargés d'usines, font partie des équipements dits préchargés.

Modes de maintenance

Il est supposé que ces équipements 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 32], par équipement sont listées ci-dessous.

Tableau 32 - Rythme de maintenance des Chillers

SOUS-SECTEUR	RYTHME DE MAINTENANCE	SEUIL
Chillers P < 50 kW	Selon seuil	90%
Chillers 50 < P < 350 kW	Selon seuil	90%
Chillers P > 350 kW	Selon seuil	90%
Chillers à compresseur centrifuge	Selon seuil	95%

Durée de vie moyenne

La durée de vie moyenne des équipements provient des rapports d'inventaire d'émissions de fluides frigorigènes [Ref 7]. Des échanges récents avec la profession pourraient conduire à faire évoluer ces valeurs, notamment pour les chillers de moyenne puissance dont la durée de vie pourrait se rapprocher de 20 ans. Le tableau suivant récapitule les valeurs prises en compte pour l'inventaire.

Tableau 33 - durée de vie moyenne des chillers

SOUS-SECTEUR	DUREE DE VIE
Chillers P < 50 kW	15 ans
Chillers 50 < P < 350 kW	15 ans
Chillers P > 350 kW	20 ans
Chillers à compresseur centrifuge	25 ans

6.2. Données et hypothèses

6.2.1. Données d'activités

6.2.1.1. 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 33] au Citepa, ce qui permet d'avoir une vision très précise du marché. 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. Cette année, une restructuration a été faite par Uniclimate, ce qui a pour conséquence une revue des marchés des chillers depuis 2022 et un impact sur les résultats finaux des chillers et des PAC géothermiques (cf. chapitre Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie).

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.

En 2023, les plages de collecte ont été modifiées par Uniclimate, ce qui rend les résultats 2023 moins comparables à ceux des années précédentes, du point de vue de la décomposition en sous-secteurs.

Les marchés des compresseurs centrifuges proviennent des rapports d'inventaires de fluides frigorigènes [Ref 7]. 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 7] ;
- 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 7].

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.

6.2.1.2. 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.

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

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

Tableau 34 – Ratios de charge par gamme de chillers en 2023

SOUS-SECTEUR	RATIO KG/KW
Chillers P < 50 kW	0,28
Chillers 50 < P < 350 kW	0,19
Chillers P > 350 kW	0,20
Chillers à compresseur centrifuge	0,30

6.2.1.3. Fluides frigorigènes utilisés

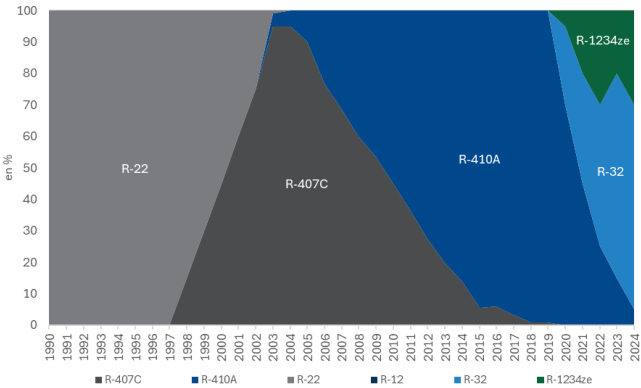
Pour répondre aux contraintes du « phasedown » imposé par la réglementation (UE) N°517/2014, le R-1234ze et le R-32 ont été progressivement introduits sur les différentes gammes de chillers en remplacement du R-134a et du R-410A, respectivement. Depuis 2022, les parts des fluides frigorigènes à bas PRG 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 76) utilisés dans les équipements a été reconstituée à partir des données sur les réfrigérants communiquées par Uniclimate pour les années depuis 2002 [Ref 33] et des rapports du RTOC [Ref 44].

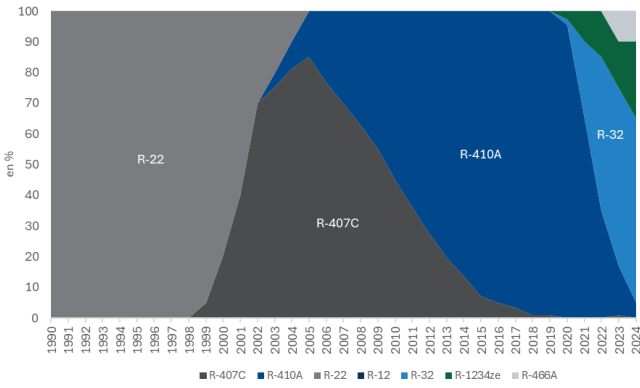
Pour les chillers de forte puissance, il a été pris en compte un arrêt de la production des équipements avec du R-22 à partir de 2000, et, pour les chillers de faible et moyenne puissance, à partir de 2003. Les réfrigérants de remplacement dans la gamme des petites et moyennes puissances ont été le R-407C 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 35 – Fluides frigorigènes utilisés sur le marché des chillers en 2023

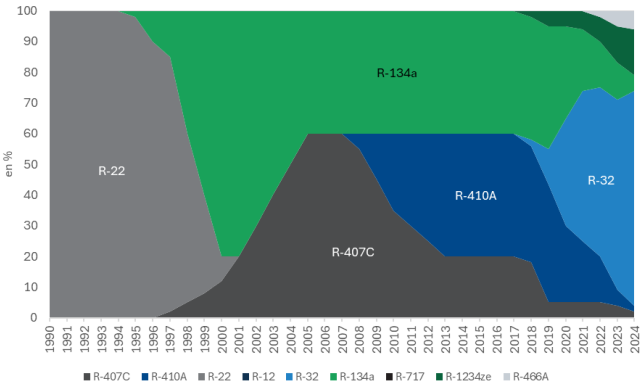
SOUS-SECTEUR	FLUIDES FRIGORIGENES
Chillers P < 50 kW	30% R-410A 65% R-32 5% R-1234ze
Chillers 50 < P < 350 kW	35% R-410A 50% R-32 15% R-1234ze
Chillers P > 350 kW	80% R-32 20% R-124a
Chillers à compresseur centrifuge	5% R-134a 40% R-1234ze 55% R-1233zd



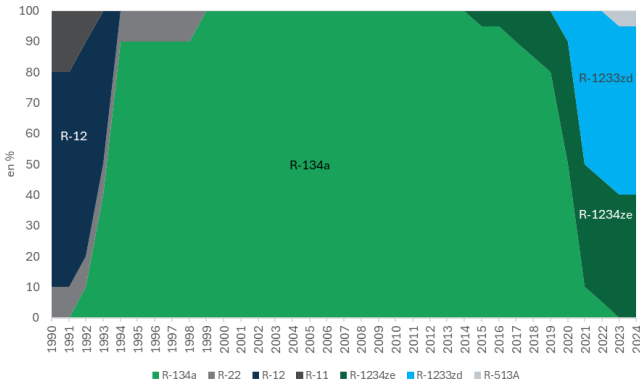
P < 50 kW



50 < P < 350 kW



P > 350 kW



Centrifuges

Figure 76 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés par gamme de chillers

6.2.1.4. 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 128).

6.2.2. Facteurs d'émissions

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 GEREP car actuellement ils font apparaître des valeurs supérieures à l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC (entre 0,2 et 1 %).

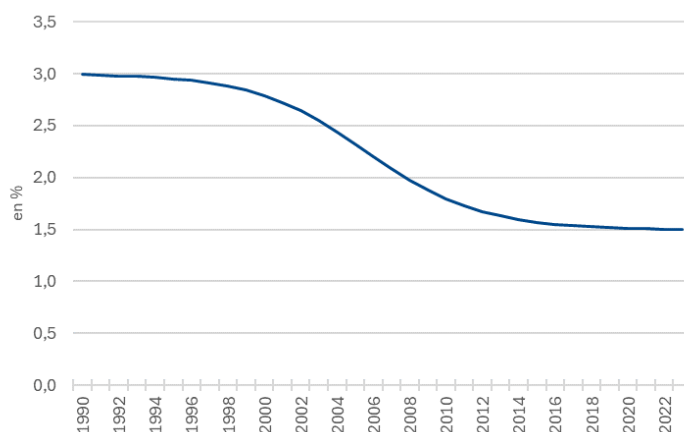


Figure 77 - Facteur d'émission à la charge des chillers (en %)

Fugitif

Pour tous les équipements, le facteur d'émission utilisé jusqu'en 1990 provient de la tranche haute des Lignes directrices du GIEC (15%). Les courbes en S ont été construites pour atteindre les niveaux 2016 donnés par les enquêtes réalisées au cours des précédentes études d'inventaire. On suppose que les taux d'émission pour les chillers à compresseur volumétrique de faible (< 50 kW) et moyenne puissance (50 < P < 350 kW) sont identiques.

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

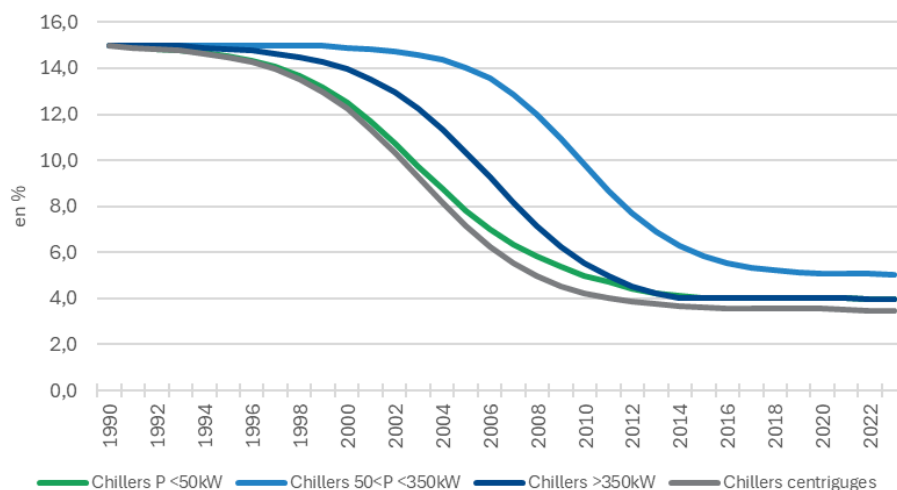


Figure 78 Facteur d'émission pendant la durée de vie – chillers (en %)

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 (maintenance et fin de vie) et traduisent l'amélioration des pratiques. Ces taux d'émissions sont appliqués au complément de charge réalisé lors de la maintenance du chiller.

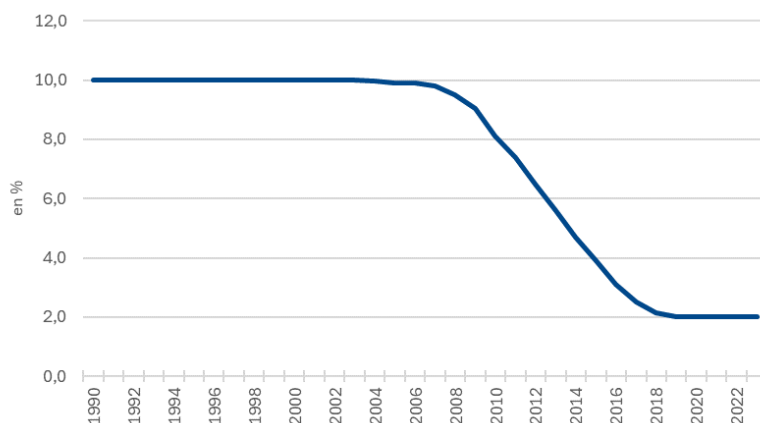


Figure 79 Taux d'émission à la maintenance – Chillers

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.

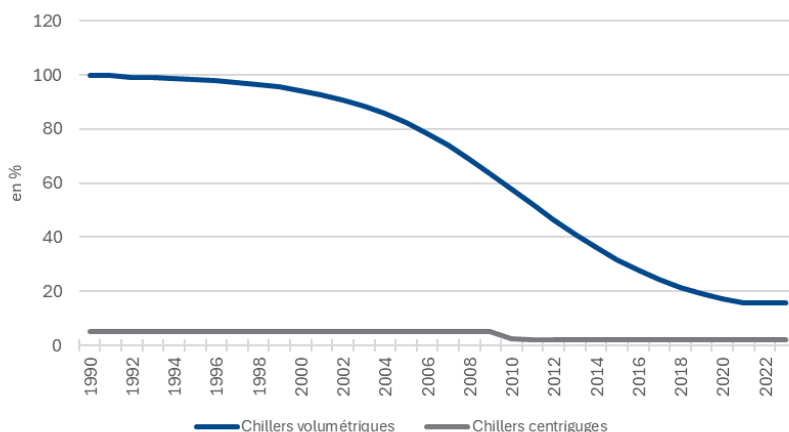


Figure 80 Facteurs d'émission en fin de vie des chillers (en %)

6.3. Résultats

6.3.1. Banque

La banque du secteur des GRE est estimée à un peu plus de 8 830 tonnes en 2023 (Tableau 51 en annexe). La tendance était à la décroissance des marchés de chillers jusqu'en 2021 ainsi que celle des ratios de charge (kg/kW) qui ont conduit à une baisse continue de la banque durant 15 ans. Les résultats depuis 2022 reflètent la restructuration transmise par Uniclimate cette année. 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 (24%), de R-407C (15%) et de R-410A (23%) en 2023, du fait des durées de vie élevées des installations. La banque de R-32 dépasse désormais celle du R-134a en représentant 26% de la banque totale des GRE (voir Tableau 51 en annexe). Les HFO sont encore loin derrière avec 7% du total en 2023.

Avec leur charge moyenne élevée et leur parc, les chillers volumétriques de puissance supérieure à 350 kW constituent la plus grande part de la banque (74%) des GRE.

Figure 81 - Banque de fluide dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau

6.3.2. Demande

Besoin pour les équipements neufs

Le besoin en fluides frigorigènes pour la production des groupes refroidisseurs à eau est entièrement constitué de HFC, notamment de R-32 (51%) et de HFO (25%) en 2023 (Tableau 53 en annexe). On estime le besoin total à près de 900 tonnes cette même année (voir Tableau 53 en annexe).

Concernant les quantités brutes mises sur le marché, on observe une diminution depuis le début des années 2000 jusqu'en 2019, 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). En 2020-2021, on assiste à une légère augmentation de la production. La restructuration donnée cette année par Uniclimate explique la forte croissance en 2022 pour redescendre à un niveau plus raisonnable en 2023.

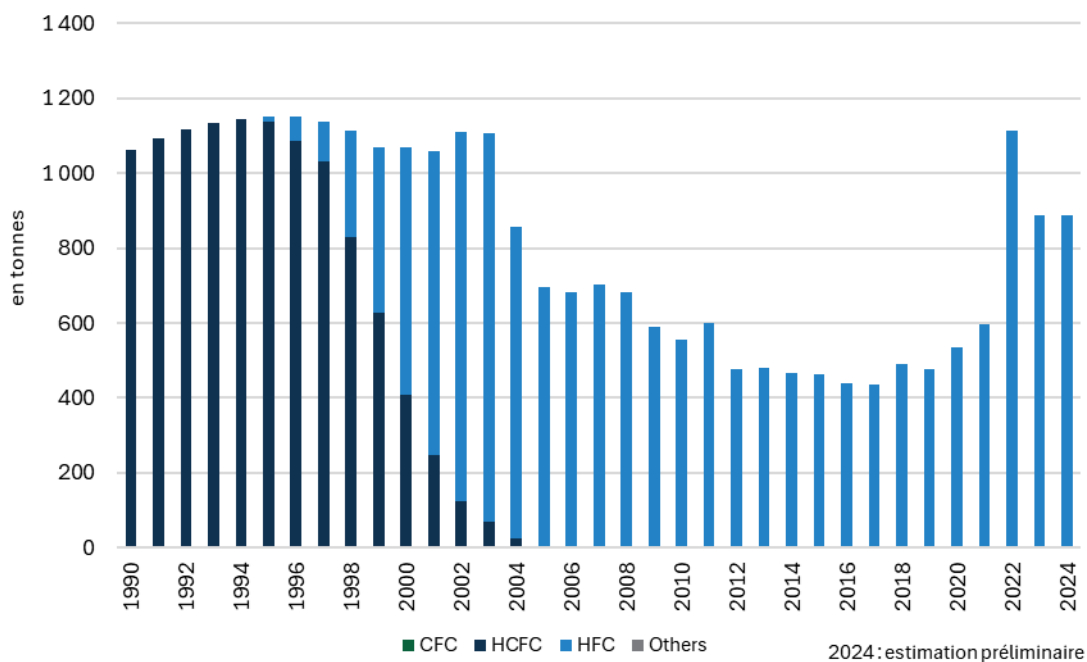


Figure 82 Quantités nécessaires à la production des groupes refroidisseurs à eau (GRE) en France métropole.

Besoin pour la maintenance

Les quantités nécessaires à la maintenance des chillers sont en décroissance, de façon plus significative ces dernières années, avec la baisse des taux d'émissions (Tableau 55 en annexe). En 2023, les fluides les plus utilisés à la maintenance sont le R-134a (34%), le R-407C (27%) et le R-410A (34%).

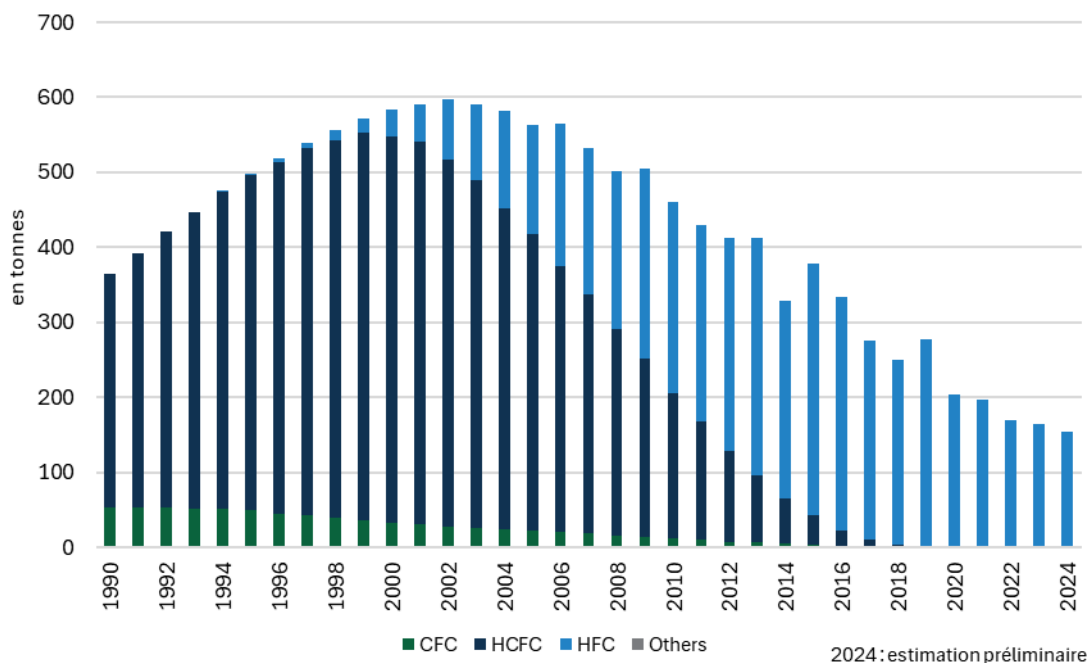


Figure 83 Besoin pour la maintenance dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)

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 ou un HFC à faible PRG (R-513A et R-450A), le rythme

est considéré faible et reste à confirmer. Le besoin pour le retrofit en 2023 est estimé à 69 tonnes (Tableau 56 en annexe).

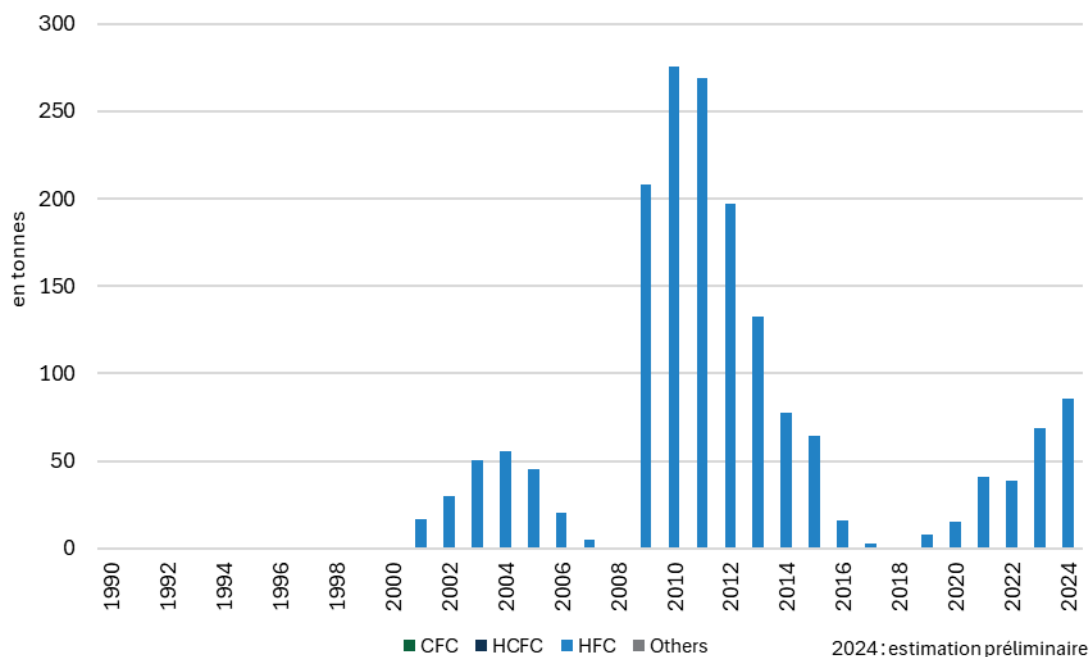


Figure 84 Besoin pour le retrofit dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)

6.3.3. Emissions

Emissions totales en tonnes

Les émissions du secteur des chillers sont en diminution continue depuis 2000 jusqu'en 2021 car les taux d'émissions des installations neuves ont fortement diminué, les filières de fin de vie se sont améliorées et le parc s'est progressivement renouvelé vers des installations à plus faible charge. Une légère croissance est observée à partir de 2022. Les émissions totales sont estimées à un peu plus de 530 tonnes en 2023 (Tableau 57 en annexe), composées à 86% d'émissions fugitives. Le secteur des chillers de forte puissance, à l'image de la banque, domine les émissions à 68%.

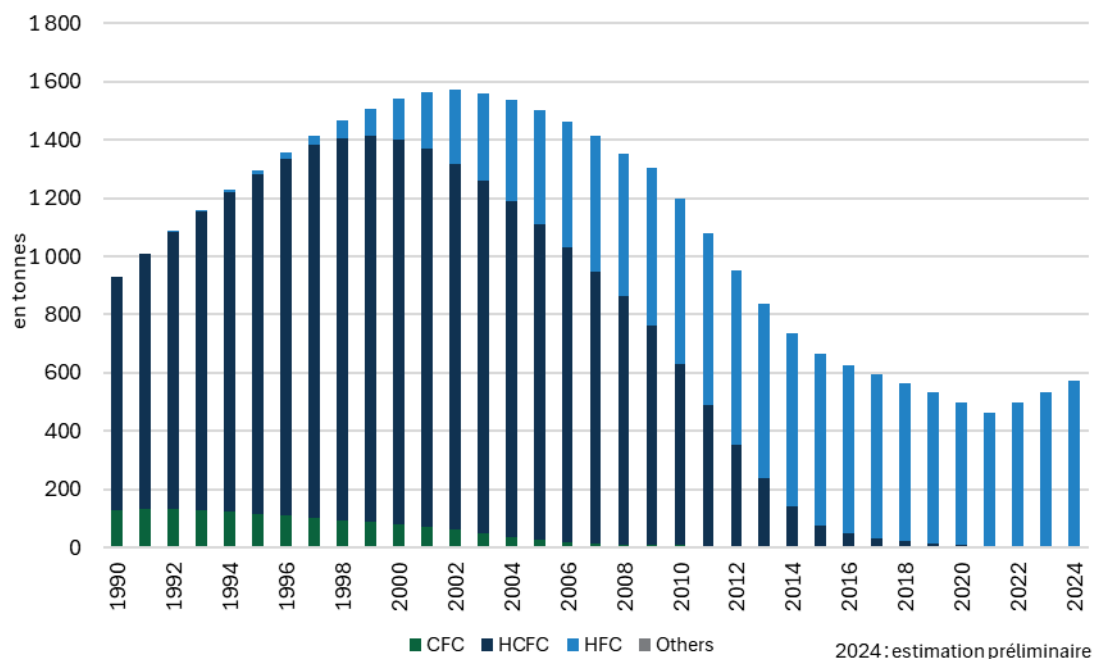


Figure 85 Emissions totales du secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE)

Emissions totales en CO₂ équivalent

Les émissions du secteur des GRE s'élèvent à 714 000 tonnes d'équivalent CO₂ en 2023 (Tableau 58 en annexe). Elles sont stables ces deux dernières années (-2% entre 2022 et 2023). 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 62%.

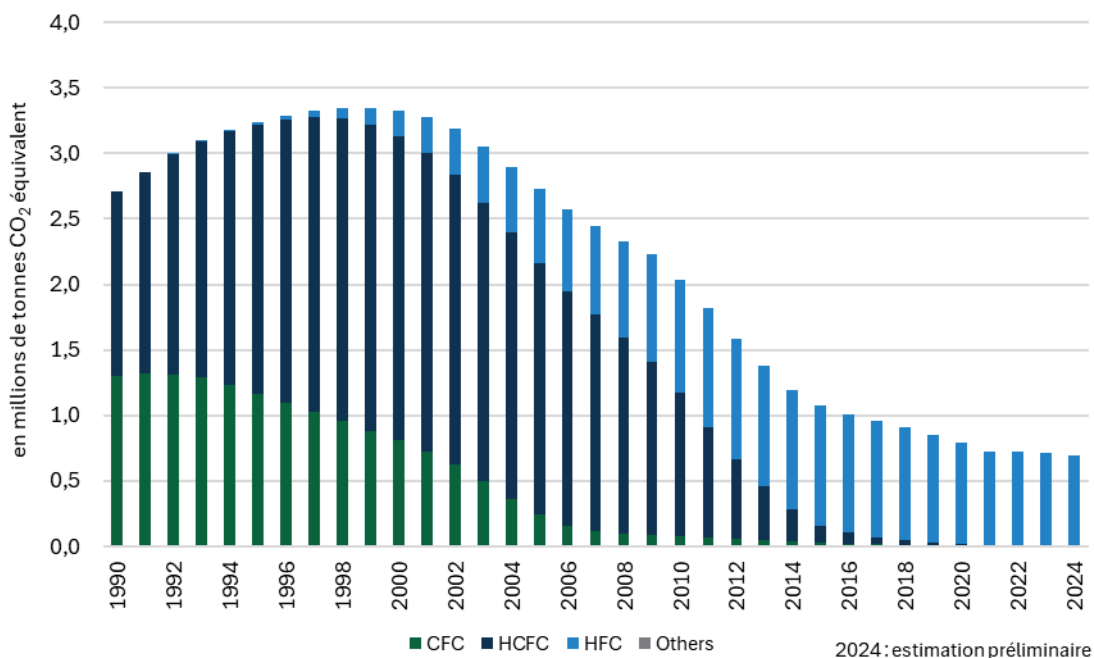


Figure 86 Emissions CO₂ équivalentes des groupes refroidisseurs à eau (GRE) (millions de tonnes)



Climatisation / Chauffage - Air/Air

7.1. Introduction

Les équipements de climatisation 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 centralisée (> 17,5 kW).

Applications prises en compte

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

SECTEUR	SOUS-SECTEUR
Climatisation / Chauffage - Air/Air	Climatiseur mobile ; Climatiseur fenêtre (ou window) PAC air/air Mono-split PAC air/air Multi-split Systèmes splits centralisés PAC air/air DRV (Débit réfrigérant variable) ou VRV (Volume de réfrigérant variable) Roof top Armoires verticales (ou consoles) ; Armoire spéciale (ou cabinet)

Modes de charge

Les équipements de climatisation air/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 suivant présente les hypothèses prises en compte pour les différents sous- secteurs.

Tableau 36 - modes de charge des équipements de climatisation air/air

SOUS-SECTEUR	CHARGE D'USINE (DIT PRE-CHARGE)	CHARGE SUR SITE	COMPLEMENT DE CHARGE
PAC air/air Mono splits	Oui	Non	Non
PAC air/air Multi-splits	Oui	Non	50%
Systèmes splits centralisés	Oui	Non	30%
Roof-top	Oui	Non	Non
PAC air/air DRV	Oui	Non	80%
Mobiles	Oui	Non	Non
Windows	Oui	Non	Non
Consoles	Non	Oui	Non
Armoires spéciales	Non	Oui	Non

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 32], sont listées au Tableau 37.

Tableau 37 - Modes de maintenance des équipements de climatisation air/air

SOUS-SECTEUR	CHARGE D'USINE	CHARGE SUR SITE
PAC air/air Mono splits	selon seuil	90 %
PAC air/air Multi-splits	selon seuil	90 %
Systèmes splits 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 15 ans, selon les équipements. Comme pour les autres secteurs, une courbe de durée de vie est appliquée, à partir de ces valeurs moyennes (Figure 128).

Tableau 38 - Durées de vie moyenne des équipements de climatisation air/air

SOUS-SECTEUR	DUREE DE VIE MOYENNE
PAC air/air Mono splits	15 ans
PAC air/air Multi-splits	15 ans
Systèmes splits centralisés	15 ans
Roof-top	15 ans
PAC air/air DRV	15 ans
Mobiles	10 ans
Windows	10 ans
Consoles	15 ans
Armoires spéciales	15 ans

7.2. Données et hypothèses

7.2.1. Données d'activités

7.2.1.1. Marchés et productions

MARCHES

Les statistiques de marchés d'équipements sont communiquées pour la grande majorité par Uniclimate [Ref 33]. La représentativité des adhérents d'Uniclimate est estimée à 92% à l'exception du sous-secteur des rooftops pour lequel le marché national est estimé avec des données transmises par Lennox à partir de 2015 (Ref 52).

Les marchés des climatiseurs mobiles ne sont pas suivis par Uniclimate. Jusqu'à présent, ils étaient estimés à partir d'une donnée ancienne. Une nouvelle source a été obtenue en 2023, par communication confidentielle du Gifam [Ref 54], ce qui a conduit à une réestimation du marché sur la période 2011-2023, lequel était fortement sous-estimé.

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

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

Cela 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 air/air ont été reconstitués à partir des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 7], 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 (cf. Tableau 37 - Modes de maintenance des équipements de climatisation air/air). Les productions annuelles en France par type d'équipement ne sont pas collectées par une fédération. Pour ce faire, 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 7]. 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 50% 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 considération, selon les communications de certains fabricants d'équipements que :
 - les DRV n'ont pas été fabriqués en France mais importés,
 - les climatisations mobiles et fenêtres ne sont plus produites en France, depuis 2010 et 2017 respectivement.

7.2.1.2. Charge nominale

La charge nominale diffère selon les équipements, leur mode de charge, le raffinement des données disponibles et l'évolution au cours du temps. Deux types de charge sont considérées : les charges constantes et les charges variant au cours du temps.

Charge constante

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

Tableau 39 – hypothèses de charge nominale constante par équipement de climatisation air/air

SOUS-SECTEUR	CHARGE MOYENNE (KG)
Climatiseurs mobiles	0,5
Climatisation de fenêtre	0,6
Armoires verticales	2,8
Armoires spéciales	18

Charge variant au cours du temps

- Charge variant selon une courbe en S

Le calcul de cette charge est imputé aux systèmes splits centralisés.

Pour ces équipements, les études d'inventaire considéraient jusqu'en 2016 une charge constante de 7,5 kg. Afin de prendre en compte les valeurs historiques des 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).

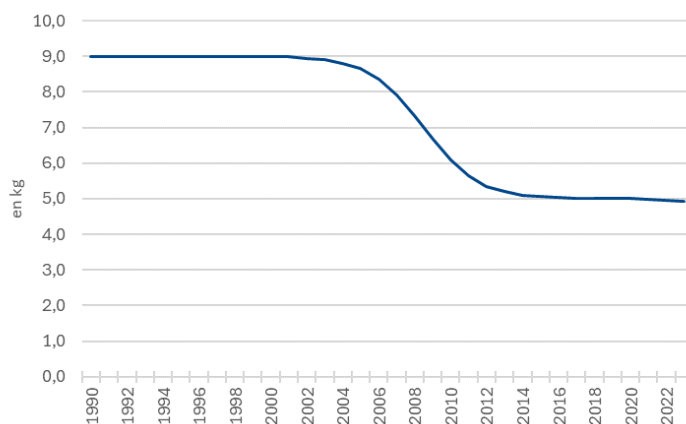


Figure 87 Evolution de la charge des systèmes splits centralisés

Ces valeurs sont basées sur des communications de fabricants mentionnées dans les anciens rapports d'inventaire [Ref 7].

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

Ce ratio est utilisé pour les applications suivantes : mono-splits, multi-splits, DRV et rooftops.

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 (cf. équation).

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

- 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 40 – charges nominales des équipements de climatisation air/air

SOUS-SECTEUR	CHARGE MOYENNE EN 2023 (KG)
PAC air/air Mono-splits	1,3 (R-410A) 1,2 (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) 21 (R-450A)

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 et est supposé constant pour toutes les années. Concernant les multi-splits, un complément de charge de 50% est pris en compte dans les calculs et 30% pour les systèmes split centralisés.

7.2.1.3. 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 a été 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 33] 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 les anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 7].

Les hypothèses pour l'année 2023 sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 41 – Fluides frigorigènes utilisés sur les marchés neufs des équipements de climatisation air/air

SOUS-SECTEUR	FLUIDES FRIGORIGENES EN 2023
Mobiles	100% R-290
Windows	20% R-32 80% R-290A
PAC air/air Mono split	3% R-410A 97% R-32
PAC air/air Multi split	2% R-410A 98% R-32
Armoires verticales	31% R-410A 69% R-32
PAC air/air DRV	95% R-410A 5% R-32
Systèmes split centralisé	34% R-410A 56% R-32 10% mélange R-1234yf/R-125/R-32
Roof top	21,5% R-410A 68% R-32 10,5% R-450A
Armoires spéciales	20% R-410A 80% 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 ;
- le R-407C a été utilisé à partir de 2000 comme substitut du R-22, puis le R-410A a été introduit progressivement. A partir de 2020, le R-32 a fait son apparition peu à peu en remplacement.

7.2.1.4. Durée de vie

Dans le secteur de la climatisation air/air, deux courbes de durée de vie sont utilisées (Figure 128, Figure 129), 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.

7.2.2. Facteurs d'émissions

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 88). 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 (entre 0,2 et 1%). Il serait utile d'intégrer les déclarations d'autres producteurs d'équipements pour moyenner les déclarations du premier fabricant.

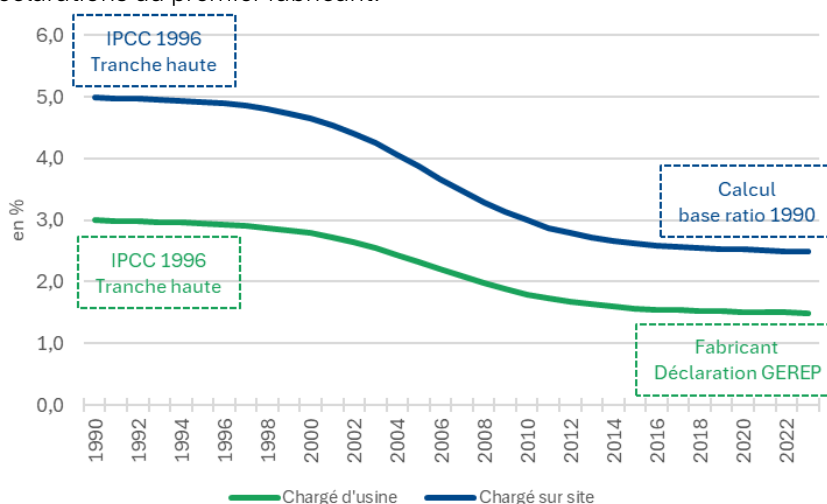


Figure 88 - Facteur d'émission à la charge (en %) des équipements de climatisation à air

Fugitif

Les taux d'émission pendant le fonctionnement de l'équipement sont également supposés évoluer selon une courbe en S (Figure 89). Pour la majorité des équipements de PAC et de climatisation, le facteur d'émission utilisé jusqu'en 1990 provient de la tranche haute des Lignes directrices du GIEC (10%). Les courbes en S ont été construites à partir des valeurs utilisées pour l'enquête de l'inventaire 2016.

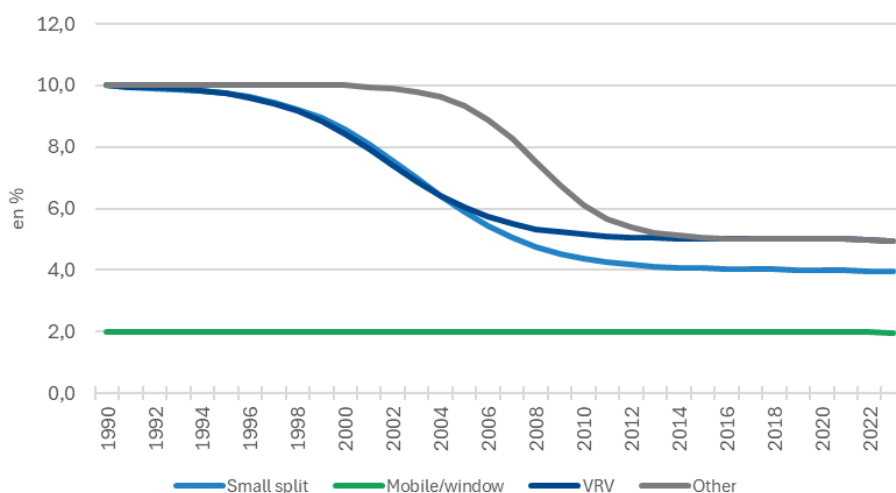


Figure 89 - Facteur d'émission pendant la durée de vie – PAC air/air et climatisation fixe (en %)

Pour les climatisations mobiles et les climatisations « fenêtres », un taux d'émission constant et égal à 2% est utilisé 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 (entre 1 et 10%).

A la maintenance

L'évolution du taux d'émission à la maintenance pour le secteur de la climatisation air/air est donnée sur la figure ci-dessous. Elle suppose un taux d'émission évoluant de 10% à 2% entre 1990 et 2023.

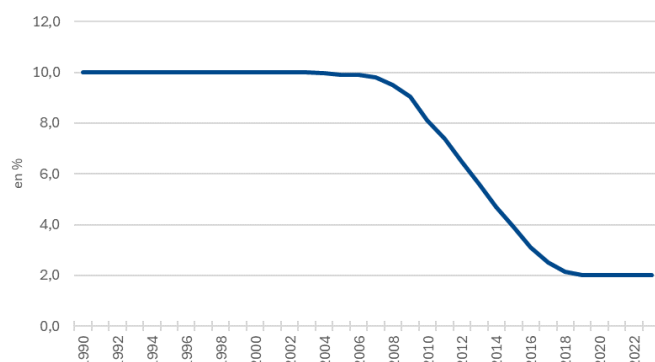


Figure 90 - Taux d'émissions à la maintenance des équipements de climatisation à air de type split

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. Les facteurs d'émission diffèrent en fonction du type d'équipement étudié.

Modèle 1 : équipements de type mobiles et « fenêtres »

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.

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 : console, cabinet, mono-split et multi-split

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.

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 : PAC air/air DRV, rooftop et système split centralisé

Ce modèle est représentatif des climatisations et PAC utilisées dans le tertiaire et pour lesquelles les interventions sont faites par des opérateurs spécialisés.

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 %.

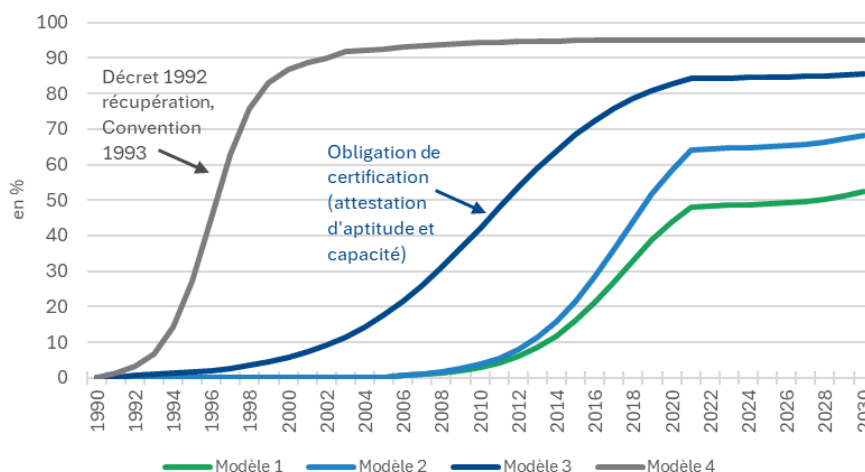


Figure 91 - Efficacité de récupération en fin de vie (en %) des équipements de la climatisation et PAC à air

7.3. Résultats

7.3.1. Banque

La banque des équipements de climatisation air/air et des PAC air/air est en croissance continue, de 5% par an en moyenne sur les cinq dernières années. Elle s'élève à plus de 17 200 tonnes (Tableau 51 en annexe) et est constituée en majorité de R-410A (59%) et R-32 (32%). La banque d'hydrocarbures reste faible (7%) et concerne 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.

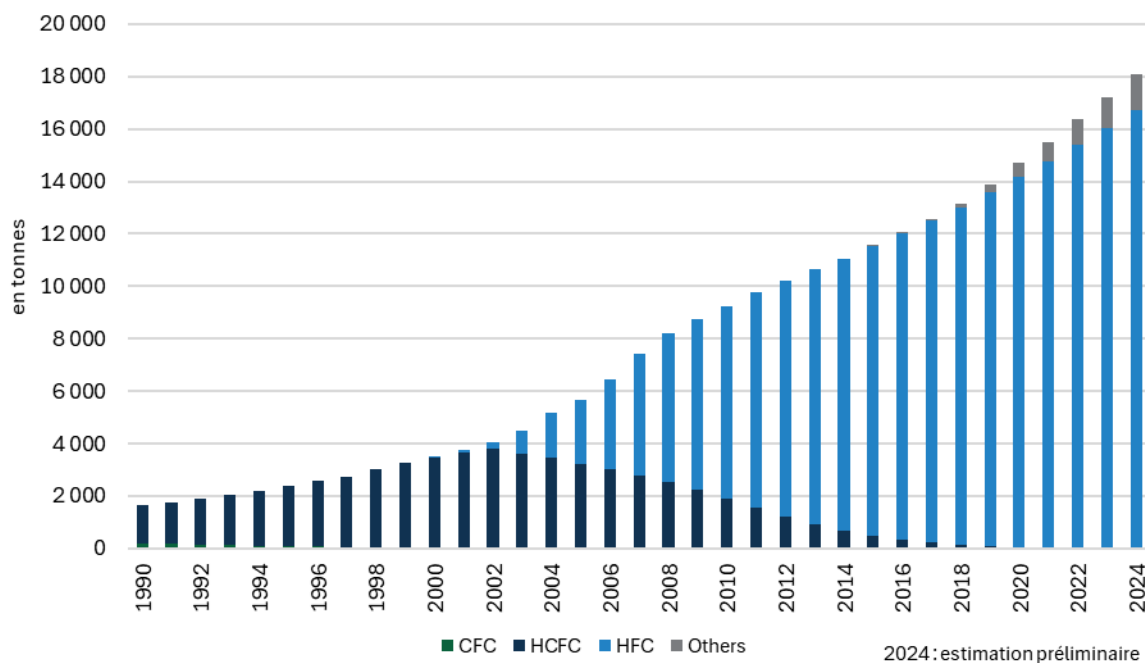


Figure 92 - Banque de fluide du secteur de la climatisation air/air

2023

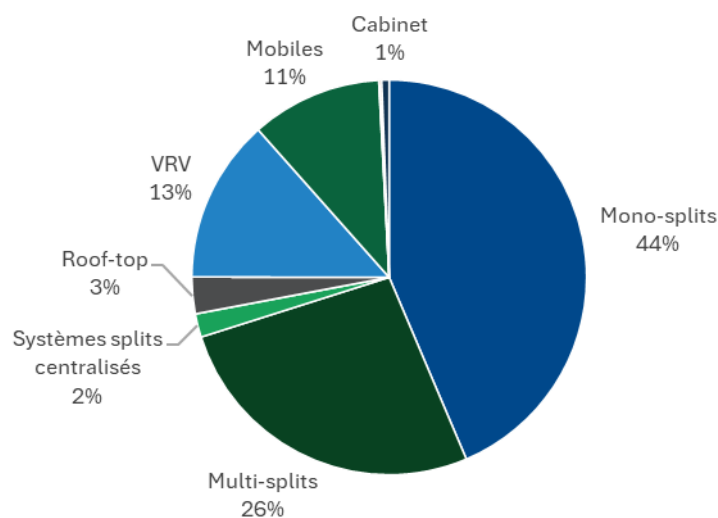


Figure 93 - Répartition sectorielle de la banque de la climatisation air/air

D'un point de vue sous-sectoriel, la banque est dominée par des équipements de type mono-splits (44%) et multi-splits (26%).

7.3.2. Demande

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 (R-32 et R-410A). En 2023, on estime cette quantité à 481 tonnes (Tableau 52 en annexe).

Le besoin pour la production des équipements de climatisation et PAC air/air en France est, elle, dominée par le R-32 (86%). 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. La quantité en production est estimée à 181 tonnes pour 2023 (Tableau 53 en annexe).

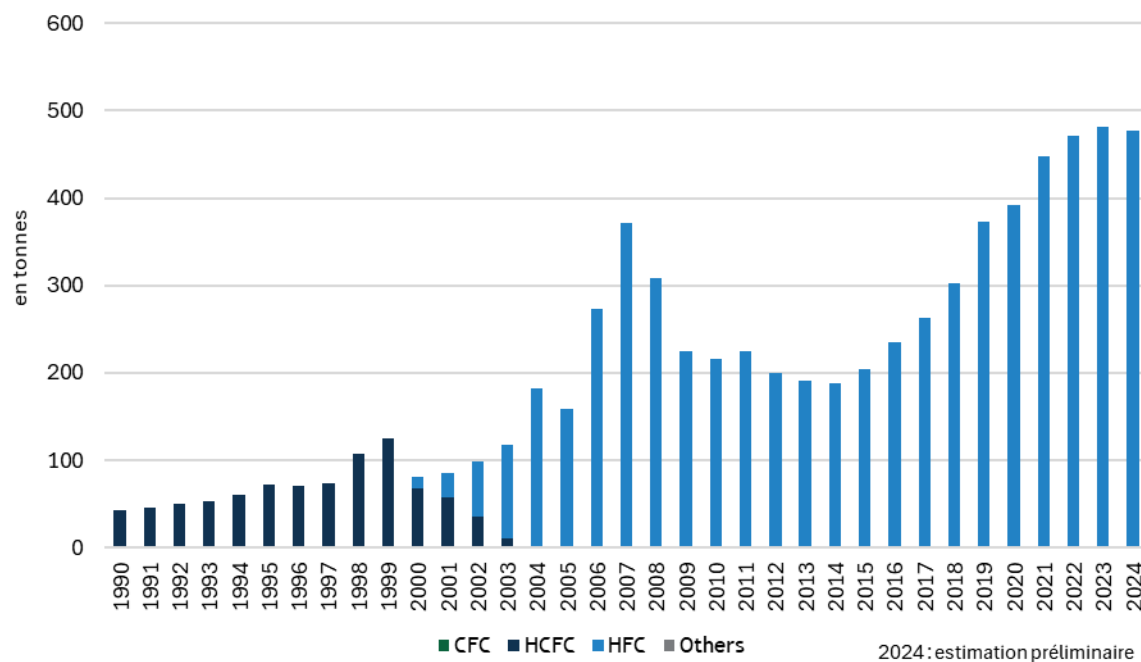


Figure 94 - Quantités nécessaires à la charge des équipements de la climatisation air/air

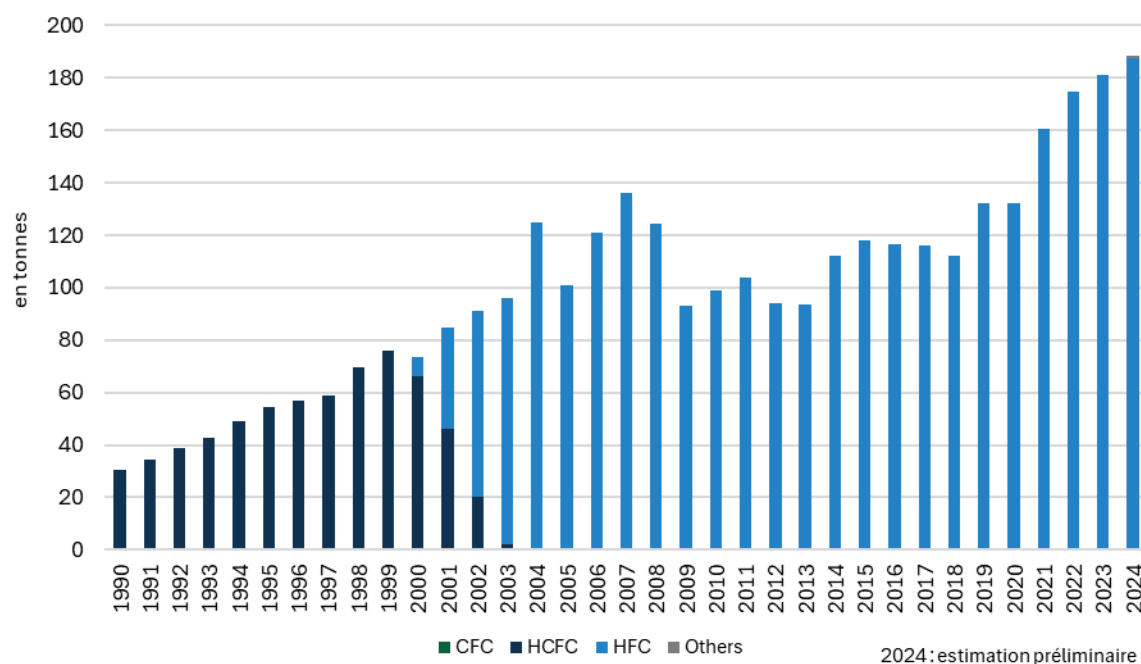


Figure 95 - Quantités nécessaires à la production dans le secteur de la climatisation air/air

Besoin pour la maintenance

En 2023, le besoin pour la maintenance (Tableau 55 en annexe) des installations présentes sur le parc de France métropole est évalué à environ 340 tonnes dont la majeure partie est du R-410A (77%). Le R-32 est progressivement utilisé et représente 23% des fluides utilisés pour la maintenance en 2023.

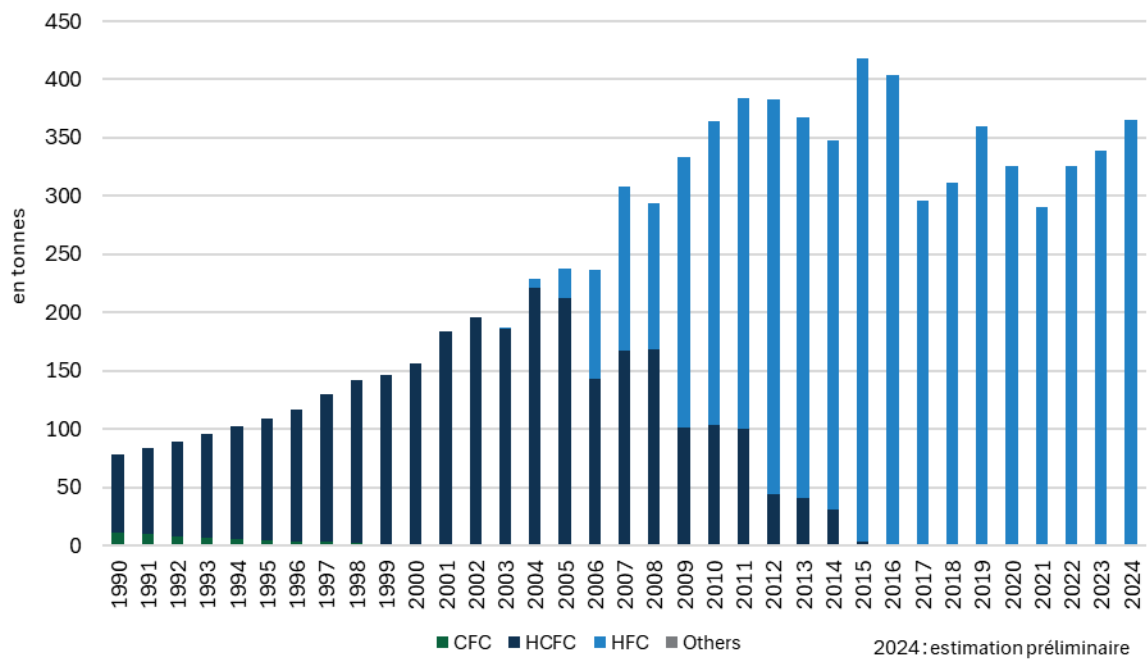


Figure 96 - Quantités nécessaires à la maintenance dans le secteur de la climatisation air/air

Besoin pour le retrofit

Les quantités présentées Figure 97 concernent les retrofits des installations au R-22 vers des mélanges de remplacement dans les années 2010.

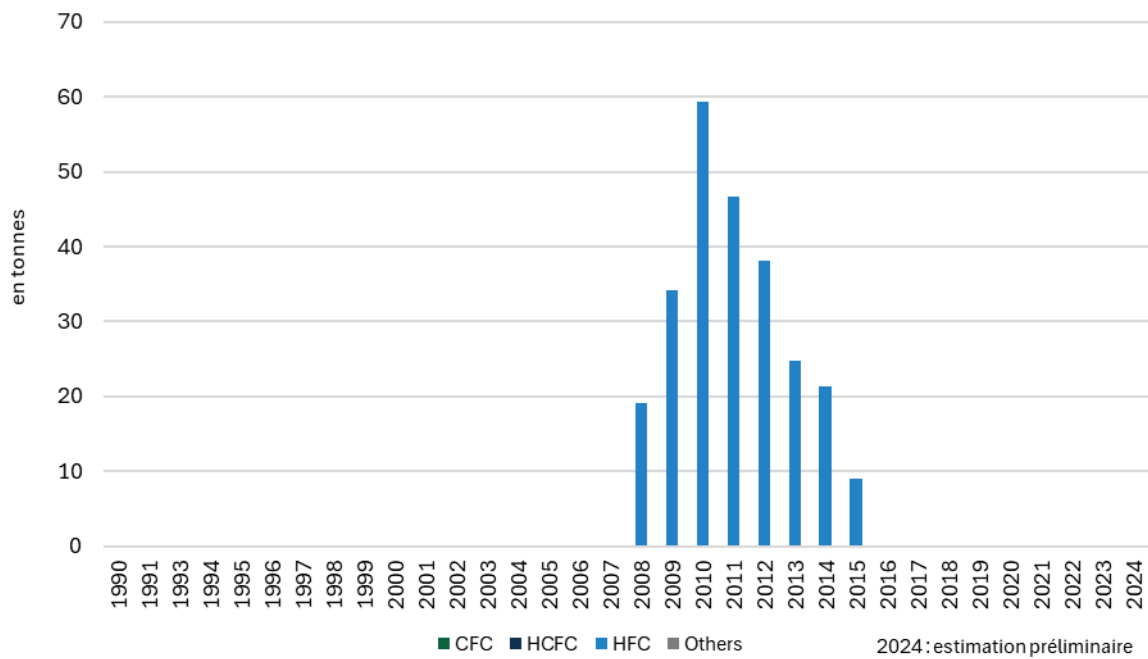


Figure 97 - Quantités nécessaires à le retrofit dans le secteur de la climatisation air/air

7.3.3. Emissions

Emissions totales en tonnes

Les émissions totales du secteur de la climatisation et PAC air/air sont estimées à environ 1 050 tonnes pour 2023 (Tableau 57 en annexe), dominées par le R-410A avec 68% des émissions, le R-32 représentant 24%. Stables sur la période 2016-2021, les émissions sont en légère croissance sur 2021-2023 (+6%), du fait de l'augmentation du nombre d'équipements arrivant en fin de vie.

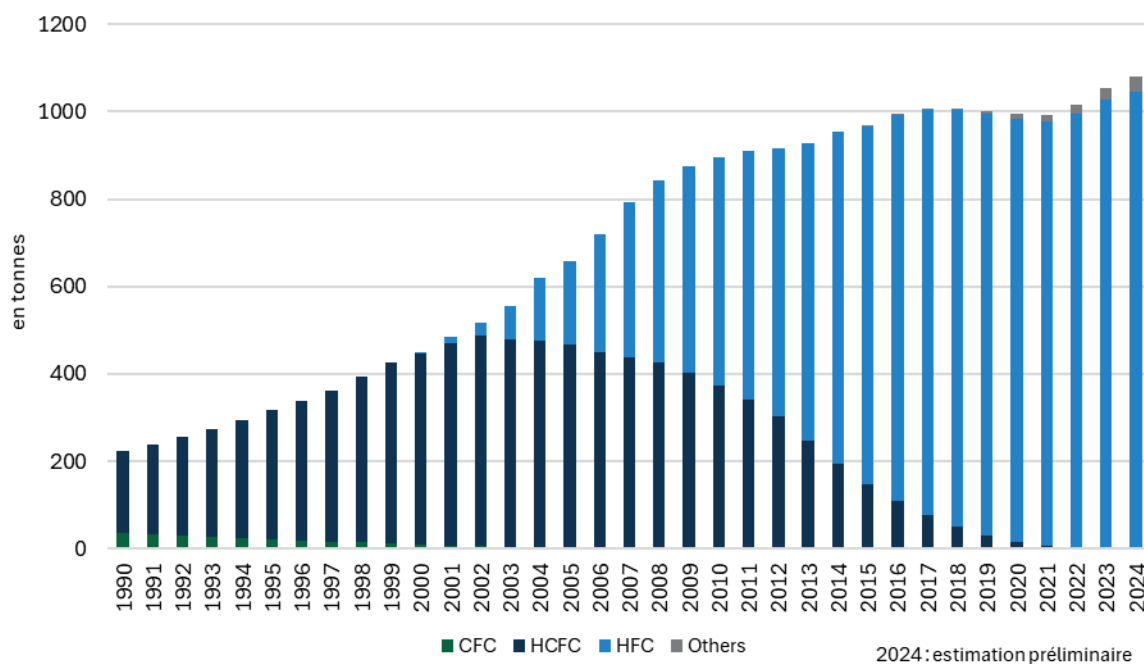


Figure 98 - Emissions totales du secteur de la climatisation air/air

Les émissions fugitives de la climatisation et PAC air/air fixe constituent environ 75% des émissions du secteur. Les émissions de fin de vie des équipements de la climatisation et PAC air/air fixe représentent un quart des émissions totales en 2023, du fait, notamment des équipements de climatisation et chauffage domestique dont la filière de récupération est encore peu efficace.

Emissions totales en CO₂ équivalent

En équivalent CO₂, les émissions du secteur de la climatisation et PAC air/air s'élèvent à 1,6 millions de tonnes en 2023 (Tableau 58). Depuis le pic de 2017, les émissions CO₂ équivalentes sont en décroissance (Figure 98) grâce à l'introduction progressive du R-32 et des hydrocarbures. Les émissions équivalentes CO₂ sont dominées par le R-410A (PRG = 1924 selon le 5^{ème} rapport du GIEC) à hauteur de 84%.

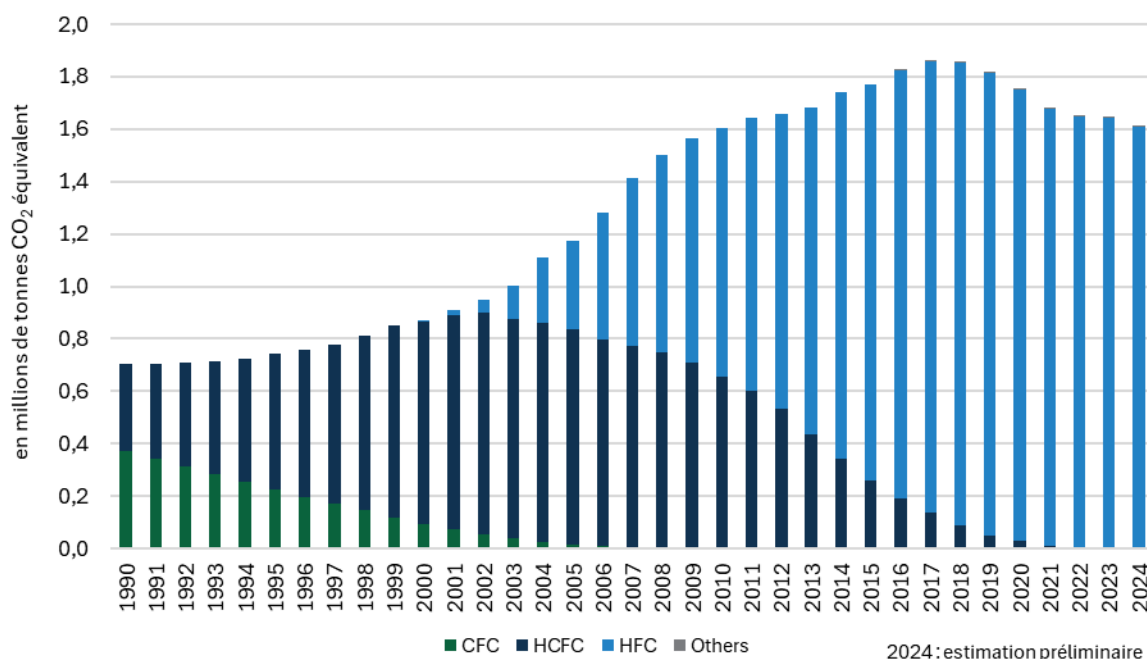


Figure 99 - Emissions CO₂ équivalentes de la climatisation air/air (millions de tonnes)

2023

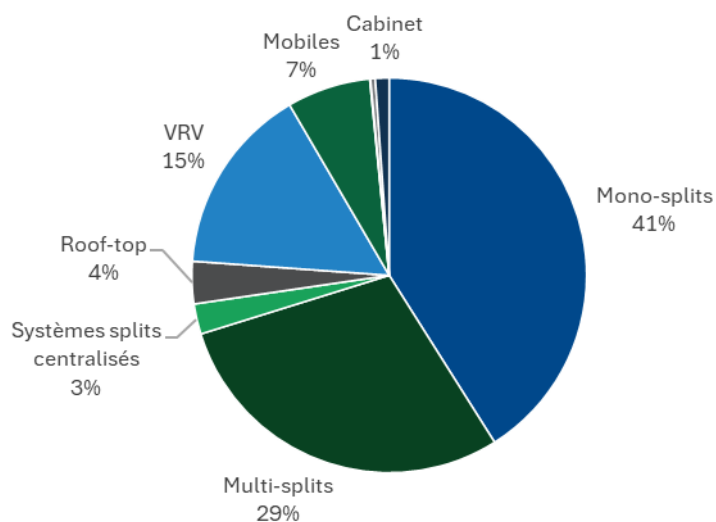
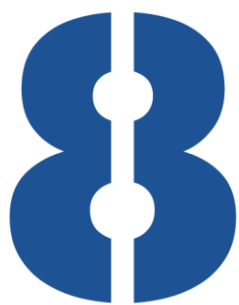


Figure 100 - Répartition sectorielle des émissions CO₂ équivalentes de la climatisation air/air

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



Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie

8.1. Introduction

Applications prises en compte

SECTEUR	SOUS-SECTEUR
Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie	PAC Air/eau PAC Eau/eau PAC géothermiques (Sol/sol ou Sol/eau) Chauffe-eaux thermodynamiques (CET)

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

Modes de charge

Les pompes à chaleurs considérées dans ce chapitre 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 7]. Comme pour l'ensemble des équipements, une courbe de durée de vie est prise en compte (Figure 128).

8.2. Données et hypothèses

8.2.1. Données d'activités

8.2.1.1. Marchés et productions

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'Uniclima [Ref 33] pour différentes gammes de puissance, elles sont supposées être représentatives du marché français.

Les marchés par type de PAC géothermiques ont été reconstitués en utilisant les rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [Ref 7] jusqu'en 2007 puis les données Uniclima à partir de 2008.

Les données de marchés des chauffe-eaux thermodynamiques sont également issues de l'AFPAC [Ref 34] et d'Uniclima [Ref 33]. 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 7] 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 par manque de données. Cependant, les émissions durant la fabrication des équipements sont très faibles par rapport aux émissions totales du secteur.

8.2.1.2. 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 7] et plus récemment, d'Uniclima. 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, des valeurs constantes sont prises comme hypothèse. Les valeurs des charges moyennes pour l'année 2023 sont présentées dans le Tableau 42.

Tableau 42 – charges nominales des PAC en 2023

SOUS-SECTEUR	CHARGE MOYENNE (KG)
PAC Air/Eau	2,6 pour le R-410A 2,3 pour le R-32 2,6 pour le R-290
PAC Eau/Eau	2,5
PAC géothermique	15
CET	0,5

8.2.1.3. Fluides frigorigènes utilisés

Depuis 2006, les hypothèses concernant les réfrigérants utilisés sont basées sur les données d'Uniclima [Ref 33].

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 7]. La réglementation n°2037/2000 interdisant la production d'équipement au R-22 à partir du 1^{er} 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 2023 sont présentées au tableau suivant :

Tableau 43 – Fluides frigorigènes utilisés sur le marché neuf des PAC en 2023

SOUS-SECTEUR	FLUIDES FRIGORIGENES
PAC Air/Eau	62% R-32 / 32% R-410A / 2% R-290
PAC Eau/Eau	55% R-410A / 38% R-407C / 5% R-32 / 1% R-290 / 1% R-1234ze
PAC géothermique	55% R-410A / 38% R-407C / 5% R-32 / 1% R-290 / 1% R-1234ze
CET	50% R-134a / 25% R-32 / 12% R-290 / 6% R-1234ze / 2% R-513A

8.2.1.4. Durée de vie

Pour tous les sous-secteurs des PAC de ce chapitre, il est pris en compte la courbe de durée basée sur une durée de vie moyenne de 15 ans (Figure 127).

8.2.2. Facteurs d'émissions

A la charge

Les mêmes hypothèses de facteurs d'émission que pour les équipements de climatisation air/air chargés d'usine sont prises en compte (Figure 88).

Fugitif

Les taux d'émission fugitifs sont supposés évoluer selon une courbe en S à l'exception des CET pour lesquels est appliqué le facteur d'émission des équipements de réfrigération domestique (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 le rapport 2016 d'inventaire des fluides frigorigènes [Ref 7].

Remarque : les facteurs d'émission estimés pour les années récentes sont inclus dans l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2019 (entre 1 et 10%)

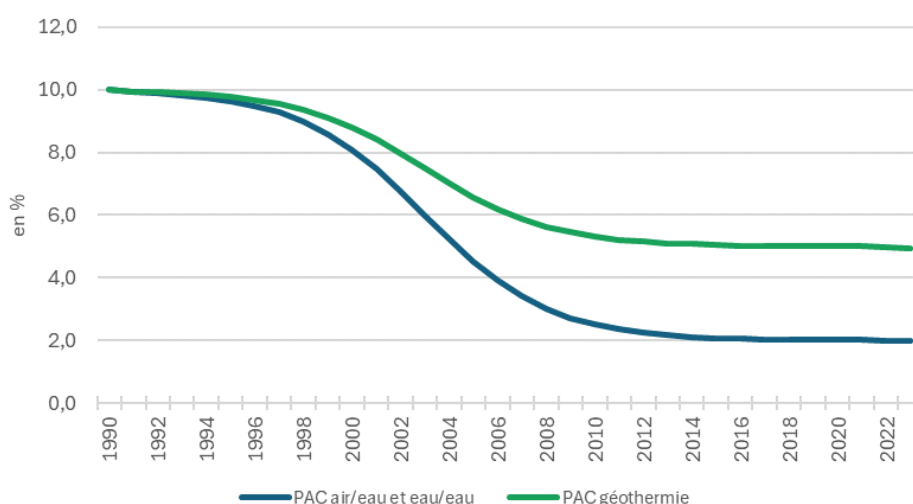


Figure 101 - Facteur d'émission fugitif – pompes à chaleurs réversibles (en %)

A la maintenance

L'évolution du taux d'émission à la maintenance pour le secteur des pompes à chaleurs de ce chapitre est la même que pour les équipements de climatisation air/air, de 10% à 2% entre 1990 et 2023 (Figure 90).

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 91). L'efficacité de récupération de la filière est évaluée à 65 % en 2023.

8.3. Résultats

8.3.1. Banque

La banque des pompes à chaleur résidentielles est en croissance continue, de plus de 10 % par an depuis 2020. Elle est estimée à 6 000 tonnes en 2023 (Tableau 51 en annexe), soit 9% de la banque totale de fluides frigorigènes en France en 2023. Elle est dominée par le R-410A à 62% et le R-32 est de plus en plus utilisé (21% de la banque). La progression des PAC utilisant le propane est relativement lente du fait des barrières réglementaires, la banque d'hydrocarbures représente environ 3% de la banque des PAC en 2023.

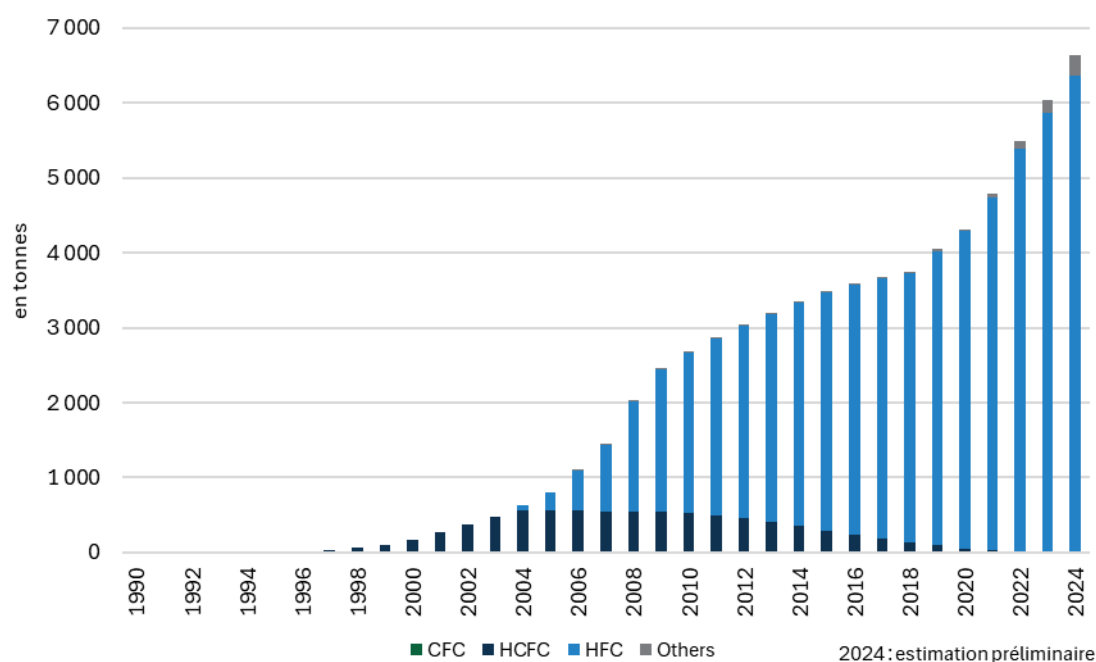


Figure 102 - Banque de fluide dans le secteur de la climatisation air/eau, eau/eau

8.3.2. Demande

Besoin pour les équipements neufs

Le besoin pour les équipements neufs concerne la production en France, les PAC étant chargées d'usine. La demande est très majoritairement constituée de HFC (plus de 90% en 2023), avec le R-410A (33%) et le R-32 (58%) principalement. La production a baissé d'environ 11% entre 2022 et 2023 et est estimée à 240 tonnes (Tableau 53 en annexe).

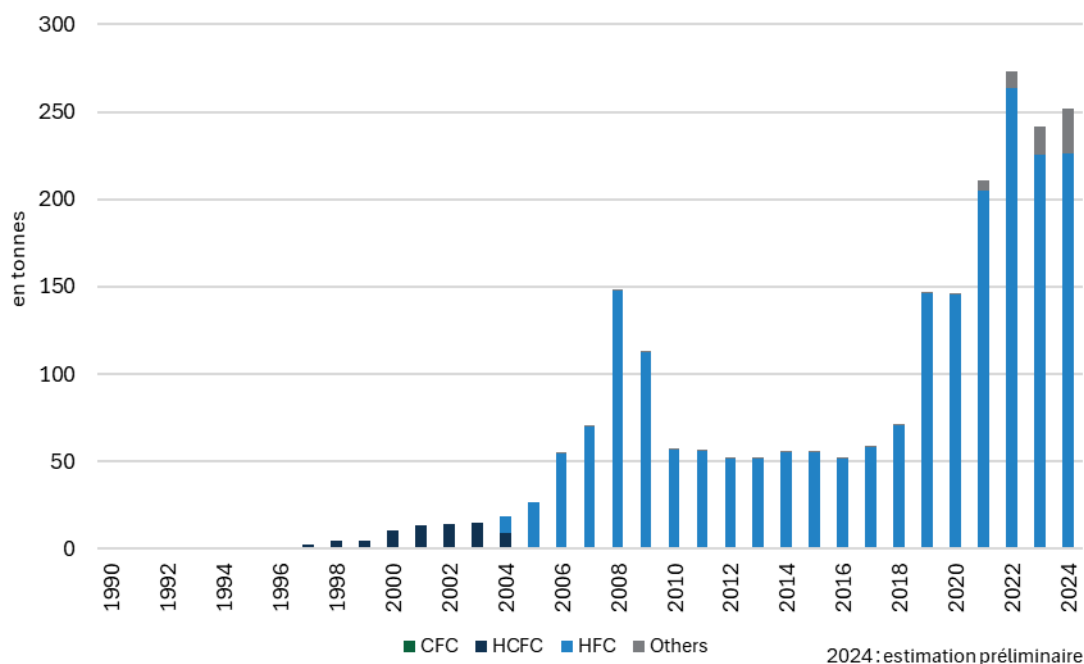


Figure 103 Quantités requises à la production dans le secteur de la climatisation air/eau, eau/eau

Besoin pour la maintenance

Dans ce secteur, la maintenance des équipements n'étant pas annuelle, la demande en fluides frigorigènes 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 38 tonnes en 2023 (Tableau 55 en annexe).

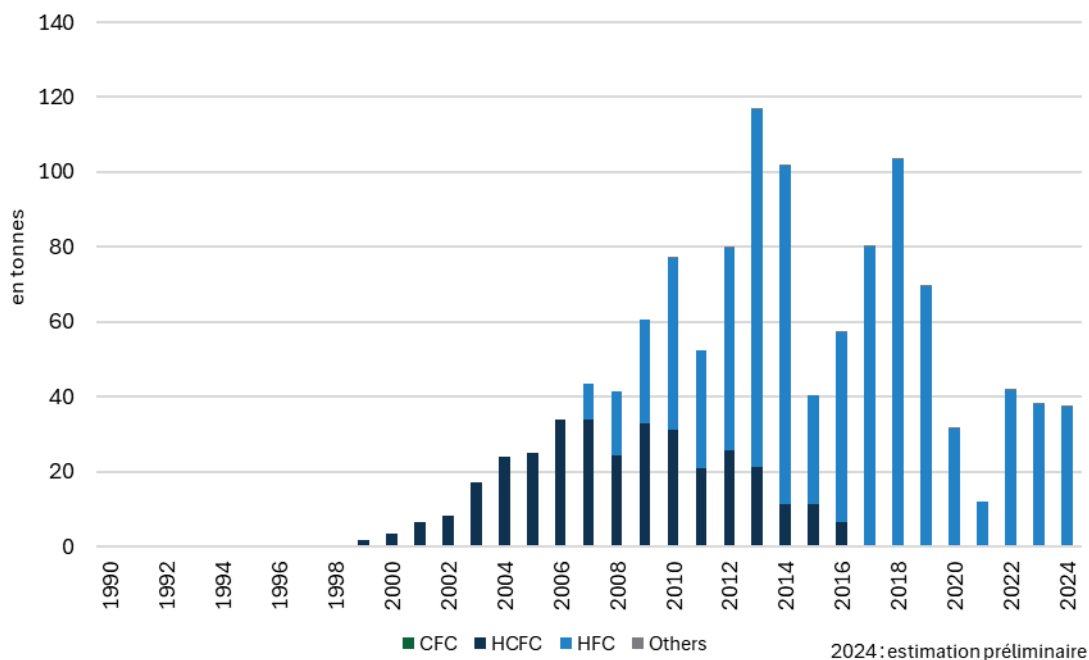


Figure 104 Quantités nécessaires à la maintenance dans le secteur climatisation air/eau, eau/eau

Besoin pour le retrofit

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

8.3.3. Emissions

Emissions totales en tonnes

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 vie commence à être significatif. Les émissions présentées Figure 105 sont dominées par les émissions durant la durée de vie (57%), la fin de vie participant à 41% des émissions en 2023 dont les émissions totales sont estimées à 224 tonnes (Tableau 57 en annexe). Les émissions totales, à l'image de la banque sont composées essentiellement de R-410A (68%).

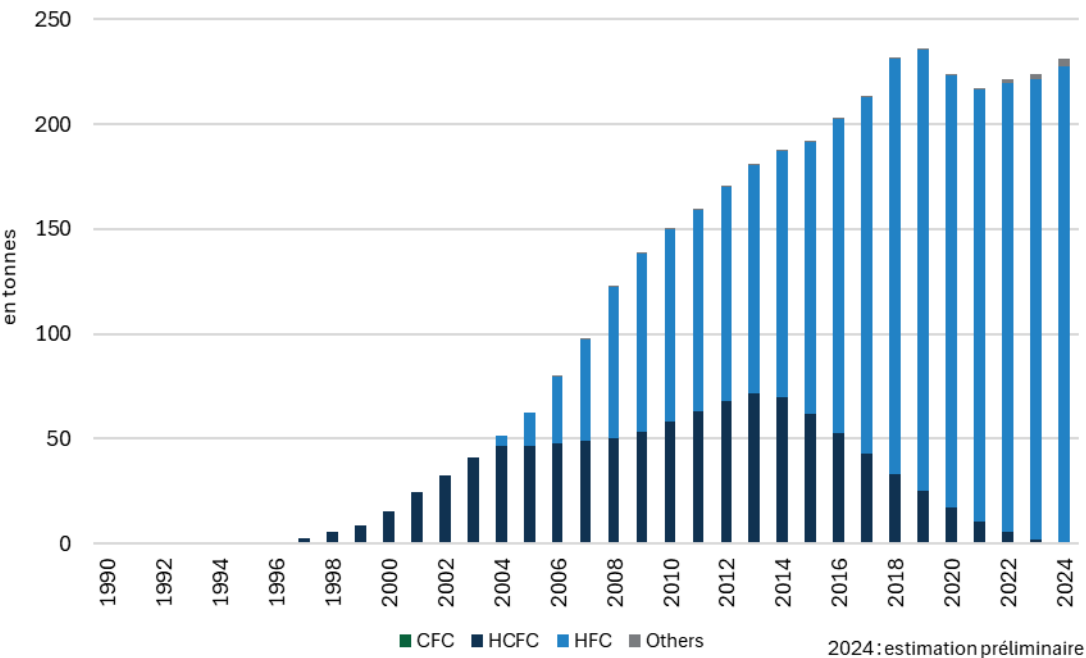


Figure 105 Emissions totales du secteur de la climatisation air/eau, eau/eau

Emissions totales en CO₂ équivalent

L'impact du secteur des PAC sur les émissions CO₂ équivalentes est faible, de seulement 380 000 tonnes en 2023 (Tableau 58 en annexe), les parcs d'équipements arrivant en fin de vie étant encore peu nombreux et les charges nominales étant faibles.

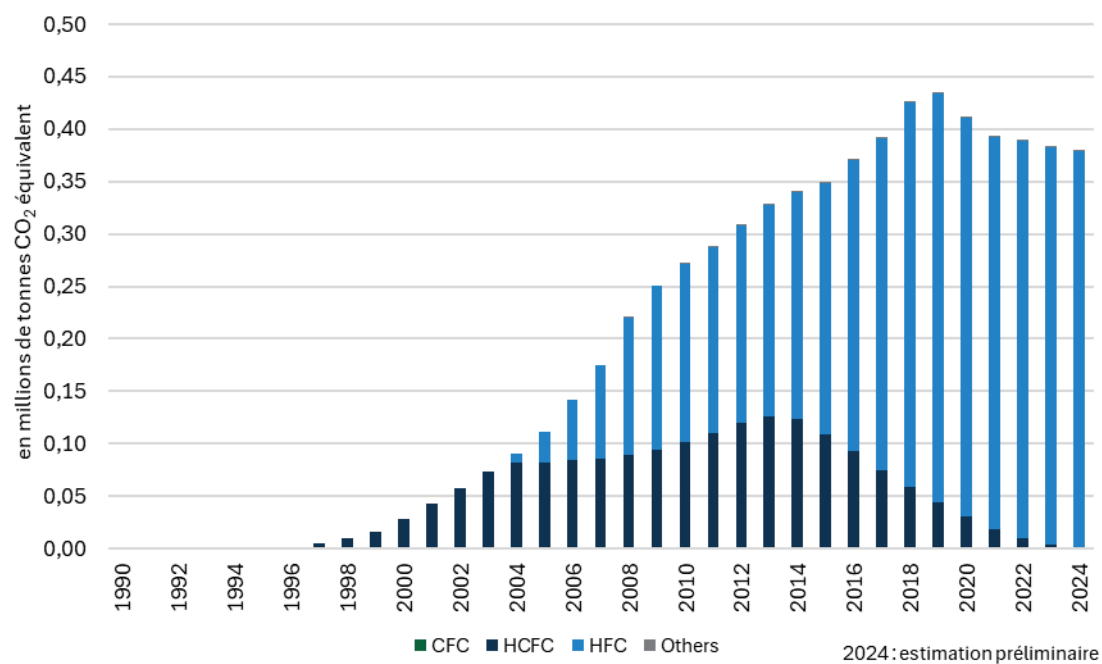


Figure 106 Emissions CO₂ équivalentes du secteur de la climatisation air/eau, eau/eau (millions de tonnes)

9

Climatisation embarquée / climatisation automobile

9.1. Introduction

Applications prises en compte

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

SECTEUR	SOUS-SECTEUR
Climatisation automobile	Climatisation automobile (circuits de climatisation des véhicules particuliers et utilitaires légers (VUL), jusqu'à 5 t)
	Véhicules industriels (camions de plus de 5 t)
	Cars et bus
	Transport ferroviaire (trains/TGV, tramways, RER et métros)

Le secteur des véhicules industriels est proche de celui de la climatisation automobile car seule la cabine du conducteur est climatisée et par des systèmes de technologie identique. Celui des cars et bus présente des systèmes de climatisation différents, plus puissants, où tout le véhicule est rafraîchi. Enfin, celui du transport ferroviaire est constitué de technologies spécifiques, avec des climatisations dans les cabines de conduites et d'autres 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 44.

Tableau 44 – hypothèses concernant les conditions de maintenance des systèmes de climatisation automobile

SOUS-SECTEUR	RYTHME DE MAINTENANCE	SEUIL	DECHARGE COMPLETE LORS DE LA MAINTENANCE
Climatisation automobile	Selon le seuil	60%	Oui
Véhicules industriels	Selon le seuil	60%	Oui
Car et bus	Selon le seuil	60%	Oui
Transport ferroviaire	Selon le seuil	50%	Non

Durée de vie moyenne

Les durées de vie moyenne des équipements de climatisation mobile diffèrent selon le mode de transport et sont présentées au Tableau 45. Elles sont cohérentes avec les hypothèses des précédentes études d'inventaires [Ref 7].

Tableau 45 – Durées de vie moyennes par sous-secteur de la climatisation automobile

SOUS-SECTEUR	DUREE DE VIE
Climatisation automobile	12 ans
Véhicules industriels	12 ans
Car et bus	15 ans
Transport ferroviaire	15 ans

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 128).

9.2. Données et hypothèses

9.2.1. Données d'activités

9.2.1.1. Marchés et productions

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 35] 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 36] et [Ref 37].

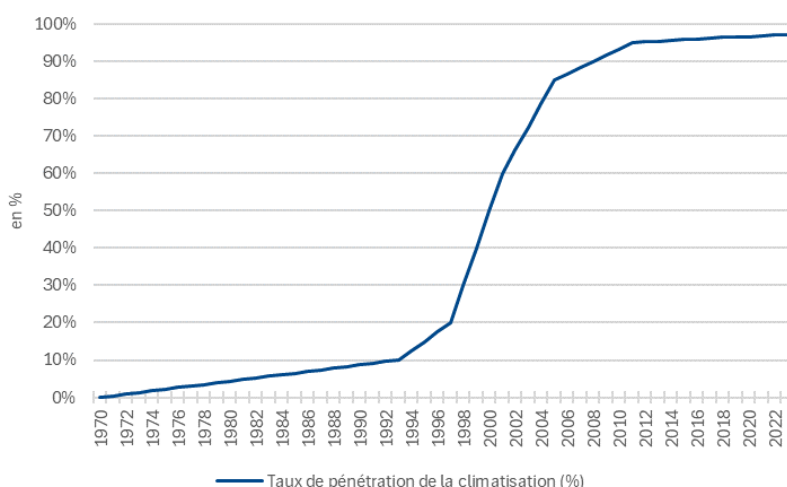


Figure 107 Evolution du taux de climatisation automobile en France métropole (en %)

- **Véhicules industriels**

Le marché de véhicules industriels supérieurs à 5t en France est connu par les données du CCFA [Ref 35] pour toute la période à partir de 1990.

Le taux de climatisation est supposé être identique à celui de la climatisation automobile (Figure 107) à la différence qu'il continue de progresser à partir de 2010 pour atteindre 99% en 2018 selon un fabricant [Ref 38].

- **Car et bus**

Le marché de cars et bus en France est connu à l'aide des données du CCFA [Ref 35] 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 7] et de données fabricants [Ref 39]. La courbe ainsi générée conduit à un niveau de 84% de véhicules climatisés mis sur le marché en 2023.

- **Transport ferroviaire**

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

- les parcs de moteurs et de remorques (ou rames) de trains et TGV publiés par le ministère chargé de l'écologie [Ref 40].
- 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 7]) ;
 - pour les trains/TGV, un ratio du nombre de climatisation par cabine et remorque pour chaque type de train 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 transports parisiens [Ref 41], 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.

9.2.1.2. Charge nominale

Pour l'année 2023, les niveaux moyens de charge nominale par application sont donnés dans le Tableau 94.

Tableau 46 – charges nominales des PAC en 2023

SOUS-SECTEUR	CHARGE MOYENNE (KG)
Climatisation automobile	0,46
Véhicules industriels	0,90
Car et bus	9,8
Transport ferroviaire	14,7

- **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 42], [Ref 43]) et des meilleures ventes de véhicules [Ref 35].

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 2019 [Ref 12] 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 et 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 898 g en 2023. Ces valeurs sont comprises dans l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2019 (de 500 à 2000 g de réfrigérant par véhicule) [Ref 12].

- **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 (climatisation de la cabine du chauffeur uniquement ou le bus entier). La courbe d'évolution de la charge moyenne de ces équipements a été reconstituée à partir d'informations tirées du rapport RTOC [Ref 44] et de données fabricant [Ref 39] et se situe aux alentours de 10 kg en 2023.

- **Transport ferroviaire**

Pour les trains, un ratio du nombre de climatisations par cabine et remorque pour chaque type de train 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 41] 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.

9.2.1.3. 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 1^{er} janvier 2017. Cette directive européenne concerne les véhicules particuliers mais pas 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 succédés dans les climatisations des véhicules : le

R-12 (CFC), le R-134a (HFC) rapidement à partir de 1995 [Ref 45] 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 climatisation 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 46].

- **Véhicules industriels**

Trois fluides frigorigènes ont été utilisés dans cette sous-application : le R-12, le R-134a et récemment le R-1234yf. Il est supposé que la transition entre les deux premiers 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 2023, il est considéré que 64% 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 2022]. Le R-1234yf est introduit à partir de 2021, il est supposé être utilisé par 60% du marché en 2023.

- **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 41]. Depuis 2020, le R-32, le R-450A et le R-1234yf sont introduits sur le marché. En 2023, la moitié des équipements sont considérés utiliser du R-1234yf, 40% du R-450A et 10% du R-32.

9.2.1.4. Durée de vie

Les courbes de durée de vie (Figure 128, Figure 129) 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.

9.2.2. Facteurs d'émissions

A la charge

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

Tableau 47 – Facteurs d'émissions à la charge des systèmes de climatisations automobiles

SOUS-SECTEUR	2023
Climatisation automobile	0,23%
Véhicules industriels	0,23%
Car et bus	0,13%
Transport ferroviaire	1%

- **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

bien compris dans l'intervalle des facteurs d'émission indiqués dans les Lignes directrices du GIEC 2019 (entre 0,2 et 0,5 %) [Ref 12].

- **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 2019 [Ref 12] 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 % pour les années récentes).

Fugitif

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

Tableau 48 – Facteurs d'émissions fugitifs des systèmes de climatisations automobiles

SOUS-SECTEUR	2023
Climatisation automobile	8%
Véhicules industriels	8%
Car et bus	10%
Transport ferroviaire	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 12] :

Tableau 49 – Données GIEC sur les taux d'émission fugitifs en climatisation automobile

GENERATION	INTERVALLE		
	Haut	Bas	Moyenne
1 ^{ère} génération	20%	10%	15%
2 ^e génération	10,6%	5,3%	8%

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%.

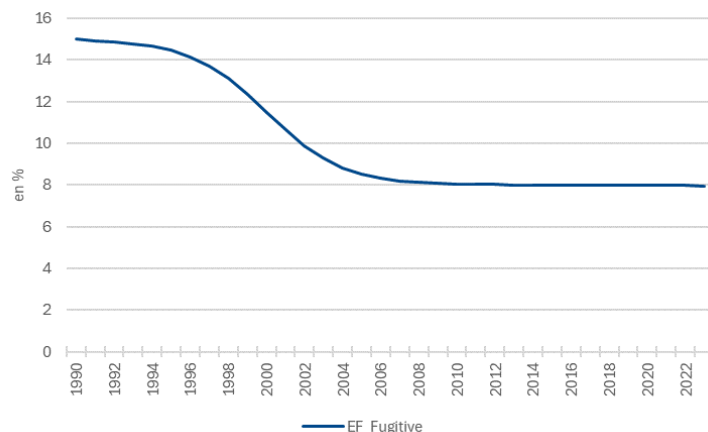


Figure 108 Facteur d'émission fugitif des véhicules (en %) en moyenne sur la flotte de véhicules

- **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 47] : 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 7].

A la maintenance

L'évolution du taux d'émission à la maintenance pour le secteur de la climatisation mobile est donnée par les courbes ci-dessous. Elle prend en compte l'amélioration des pratiques.

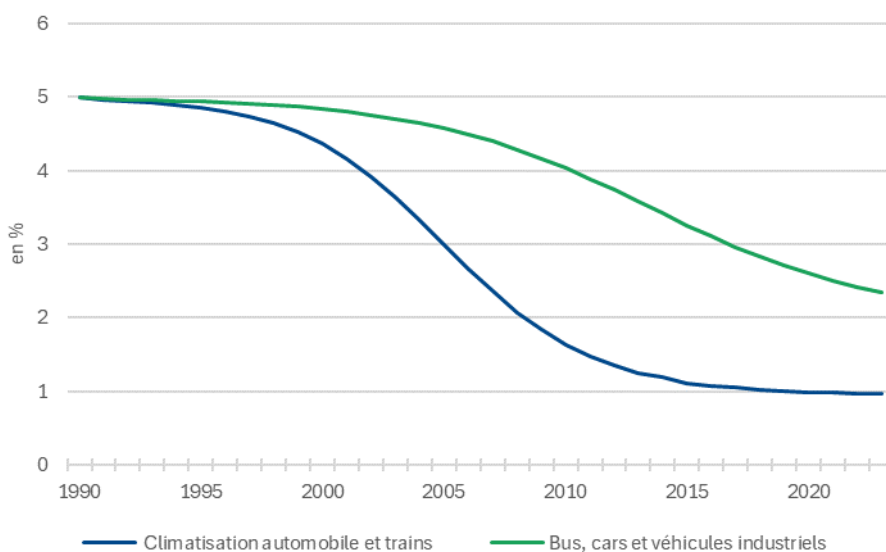


Figure 109 Facteurs d'émission à la maintenance des véhicules (en %)

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 50 – taux d'émission en fin de vie des véhicules automobiles

SOUS-SECTEUR	2023
Climatisation automobile	44%
Véhicules industriels	90%
Car et bus	41%
Transport ferroviaire	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 (cf. équation ci- après) 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.

Equation utilisée pour le calcul du taux de récupération :

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

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 7]].

Le nombre de VHU traités chaque année est communiqué dans les rapports VHU de l'ADEME [Ref 48] de même que les exportations. Le nombre de véhicules mis sur le marché à l'année N-12 (durée de vie moyenne des véhicules) est connu précisément dans les rapports du CCFA [Ref 35]. 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 11% en 2013 et 24% en 2017. Des enquêtes terrains auprès des casses pourraient valider l'ordre de grandeur de ces hypothèses. Les niveaux 2019-2023 ont été estimés tendanciellement, pour atteindre 56 % d'efficacité de récupération, tenant compte des exportations, en 2023.

- **Véhicules industriels**

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 7] sont maintenus.

- **Car et bus**

Il est considéré que la filière de récupération en fin de vie des systèmes de climatisation des cars et bus a démarré dans les années 2015, pour atteindre 59% d'efficacité de récupération en 2023.

- **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 environ 90 % dans les années 2020.

9.3. Résultats

9.3.1. Banque

La banque de la climatisation embarquée est en légère décroissance depuis 2019, la croissance du parc étant compensée par la réduction des charges moyennes des véhicules. Elle est estimée à 13 750 tonnes en 2023, constituée exclusivement de HFC, la banque de CFC étant éliminée depuis 2006. La banque de R-1234yf, remplaçant progressivement celle du R-134a, constitue désormais environ 58% de la banque de climatisation embarquée et le R-134a 41% (Tableau 51 en annexe).

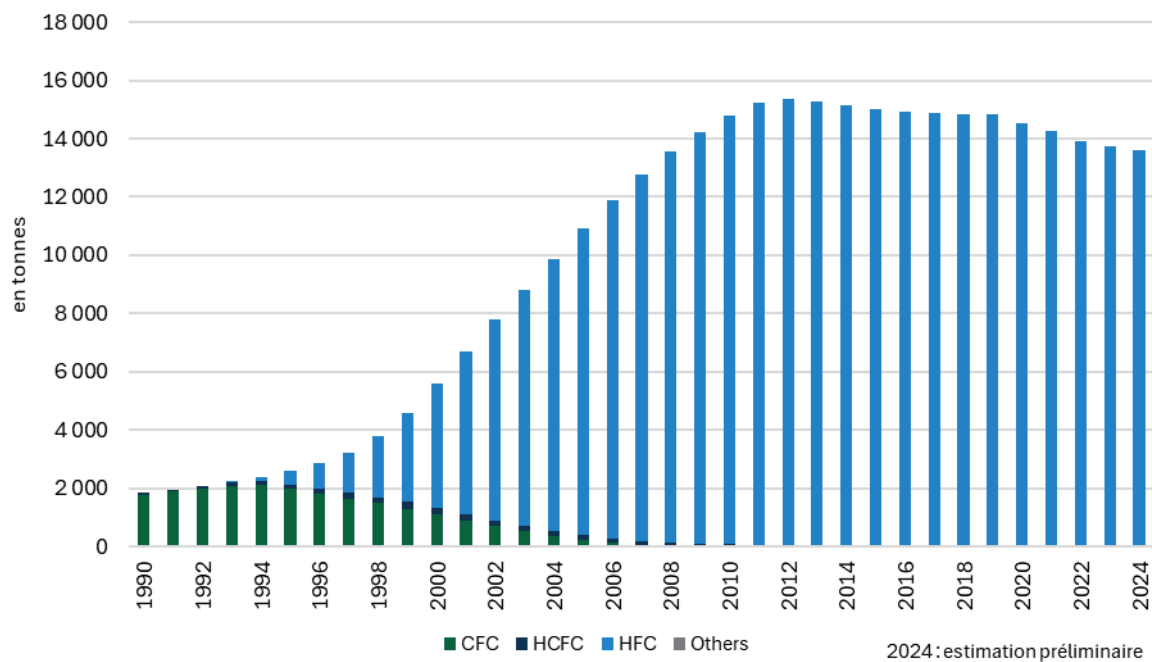


Figure 110 - Banque de fluide dans le secteur de la climatisation automobile

9.3.2. Demande

Besoin pour les équipements neufs

En 2023, le besoin pour la production est estimé à 786 tonnes ; composé à 84% de R-1234yf remplaçant progressivement le R-134a (Tableau 53 en annexe).

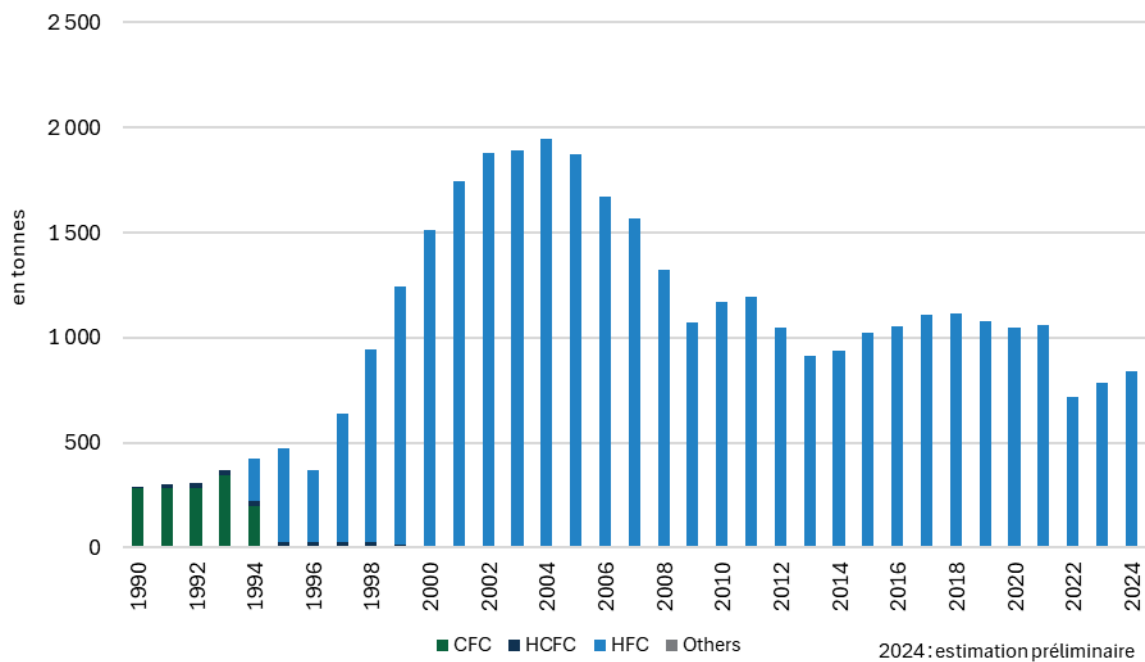


Figure 111 - Quantités nécessaires à la production dans le secteur de la climatisation mobile

Besoin pour la maintenance

Le besoin évalué pour la maintenance dans le secteur de la climatisation automobile est estimé à environ 510 tonnes en 2023 (Tableau 55 en annexe). Comme pour la climatisation air/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 % par an, la charge réelle des premiers millésimes mis sur le marché n’atteint pas encore le niveau seuil de charge à partir duquel il est supposé qu’une maintenance avec recharge est réalisée (hypothèse : seuil à 60 % de la charge nominale). Ce qui explique que le calcul ne fasse pas apparaître de R-1234yf en maintenance. C’est une amélioration à envisager dans le calcul.

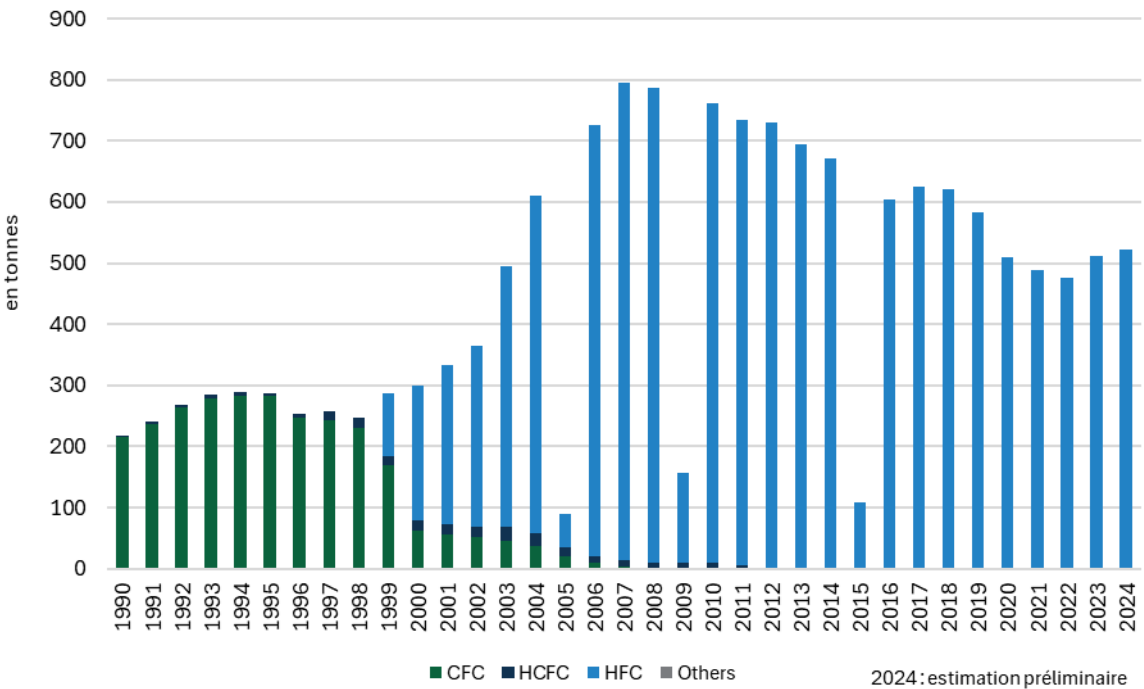


Figure 112 - Quantités nécessaires à la maintenance dans le secteur de la climatisation automobile

Besoin pour le retrofit

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

9.3.3. Emissions

Emissions totales en tonnes

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 1 570 tonnes en 2023 (Tableau 57 en annexe). Désormais, 40% des émissions du secteur sont des émissions de R-1234yf et encore 58% de R-134a.

Les émissions sont constituées en grande partie des émissions fugitives de la climatisation automobile (73%) et dans une moindre mesure des émissions en fin de vie (26%) depuis que la part des véhicules exportés est prise en compte dans le calcul.

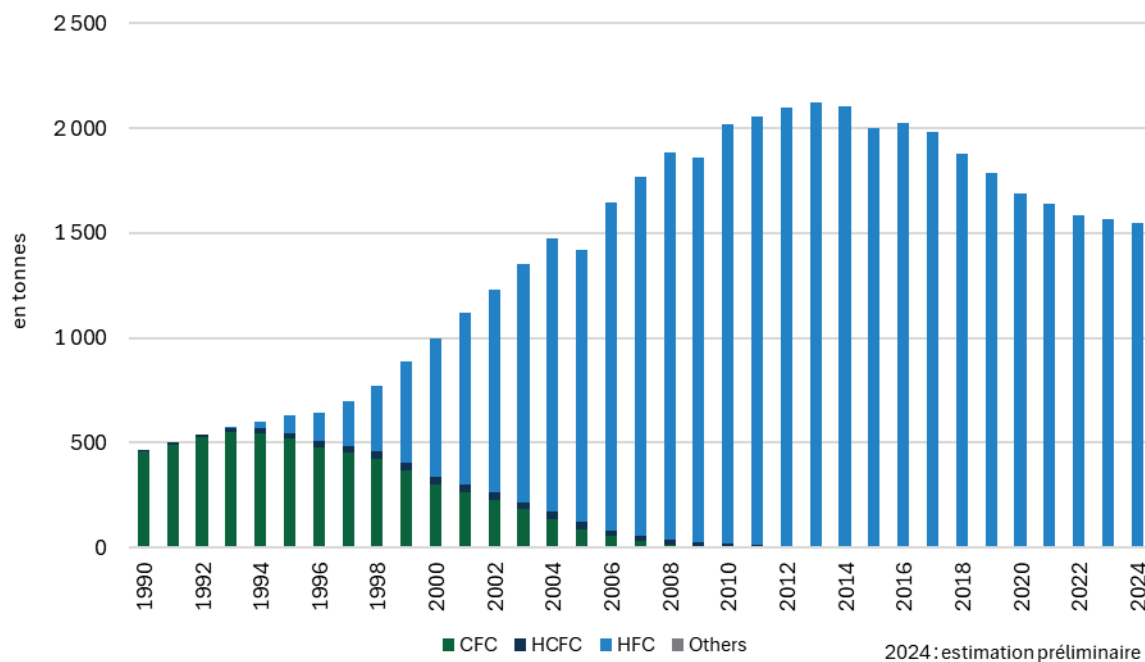


Figure 113 - Emissions totales du secteur de la climatisation mobile

Emissions totales en CO₂ équivalent

La progression du R-1234yf sur le parc automobile impacte très significativement les émissions CO₂ équivalentes du secteur, en baisse de plus de 10% par an depuis 2018. Les émissions de R-134a représentent la quasi-totalité des émissions en 2023.

La transition du R-134a au R-1234yf a permis de réduire de moitié par rapport à 2016 le niveau annuel des émissions en CO₂ équivalent du secteur. Celui-ci est estimé à environ 1,2 millions de tonnes en 2023 (Tableau 58 en annexe).

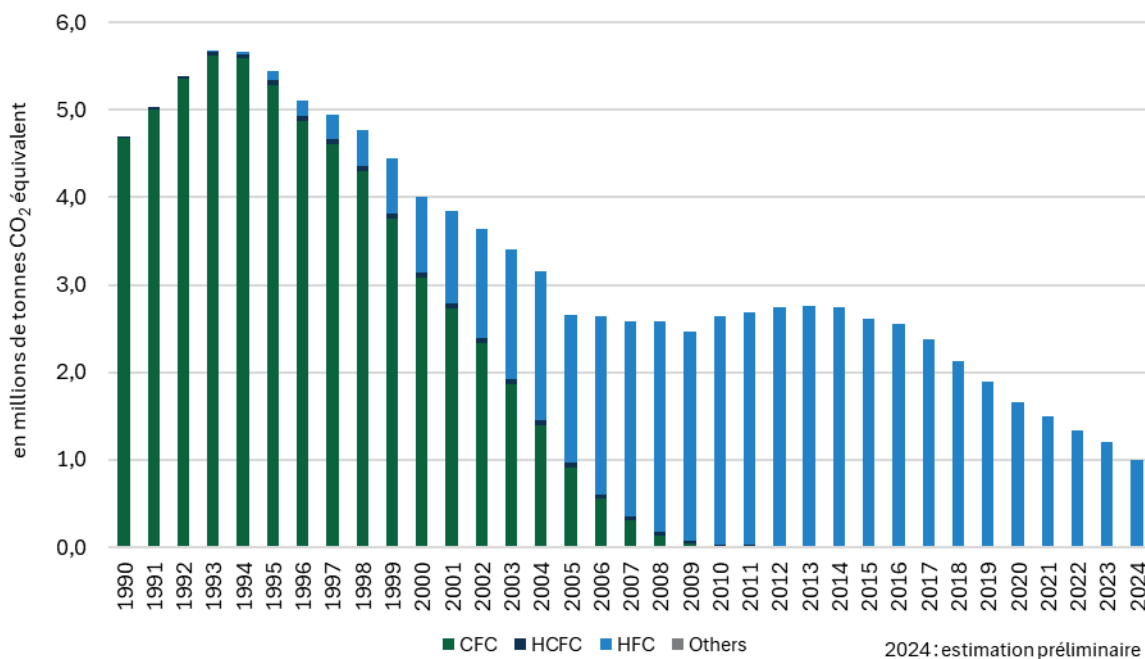


Figure 114 Emissions CO₂ équivalentes de la climatisation automobile (millions de tonnes)

10

Synthèse des résultats

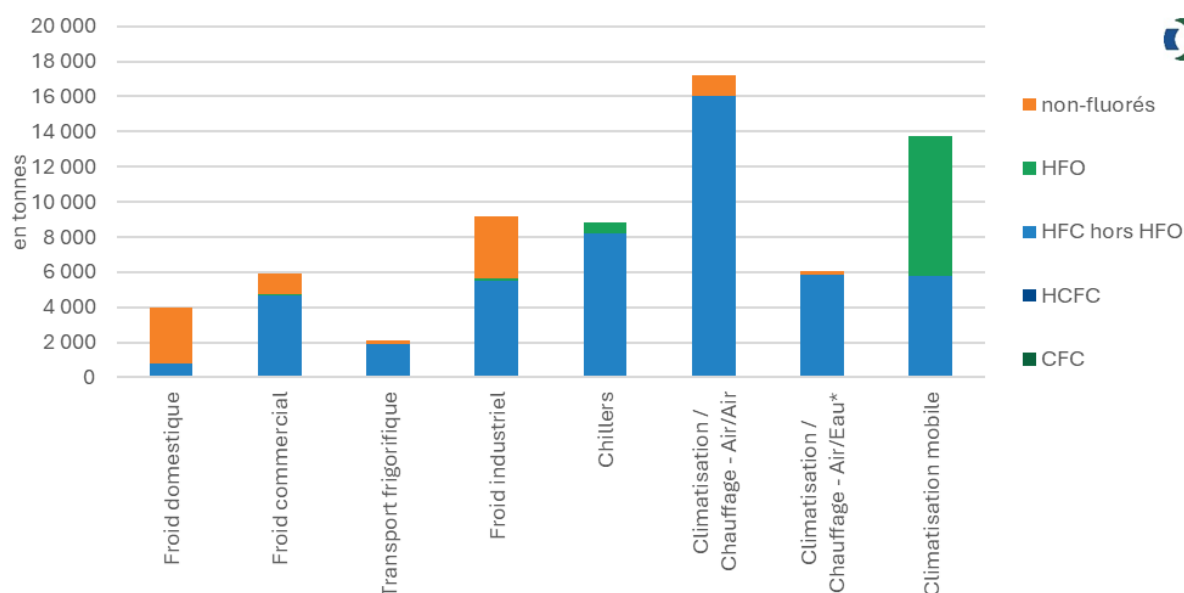
10.1. Résultats 2023

Tableau 51 – Quantités de fluides frigorigènes - BANQUE par secteur

Banque en 2023 (tonnes)	Froid domestique	Froid commercial	Transport frigorifique	Froid industriel	Chillers	Climatisation / Chauffage - Air/Air	Climatisation / Chauffage - Air/Eau*	Climatisation mobile	Total
R-11	-	-	-	5,78	0,37	-	-	-	6,1
R-12	-	-	31	-	-	0,0009	-	-	31
Total CFC	-	-	31	5,78	0,37	0,0009	-	-	38
R-22	-	-	88	6,32	-	0,0009	-	-	94
Total HCFC	-	-	88	6,32	-	0,0009	-	-	94
R-134a	617	1 309	952	2 071	2 093	11	471	5 591	13 115
R-32	-	-	-	-	2 338	5 483	1 284	21	9 125
Fluides de PRG~3950 ^a	-	578	77	1 159	-	-	21	-	1 835
R-407A	-	378	-	74	-	-	-	-	452
R-407C	-	2,57	-	-	1 346	336	338	150	2 172
R-407F	-	265	-	110	1,02	-	-	-	377
R-410A	-	8,03	3,31	-	2 000	10 177	3 730	-	15 918
Fluides de 2000<PRG<3000 ^b	-	15	-	154	159	18	-	-	347
Fluides de PRG~1300 ^c	-	1 774	-	1 233	-	-	-	-	3 007
R-452A	-	-	369	-	-	-	-	-	369
R-454C - R-455A (PRG~150)	-	298	-	20	-	-	-	-	319
R-466A	-	-	-	-	149	-	-	-	149
Fluides de PRG~600 ^d	152	31	362	654	134	5,87	6,73	50	1 396
Total HFC hors HFO	769	4 660	1 764	5 476	8 220	16 030	5 850	5 811	48 580
HFO ^e	-	56	-	139	615	-	20	7 948	8 777
Total HFC (HFO inclus)	769	4 716	1 764	5 615	8 835	16 030	5 870	13 759	57 358
R-290	375	104	-	-	-	1 172	148	-	1 799
R-600a	2 834	39	-	-	-	-	-	-	2 873
R-717	-	6,35	11	3 441	-	-	-	-	3 459
R-744	-	1 059	196	116	-	-	15	-	1 386
Total non-fluorés	3 209	1 208	208	3 558	-	1 172	162	-	9 517
Total général	3 978	5 924	2 091	9 185	8 835	17 202	6 032	13 759	67 006

a : R-404A, R507 ; b : R-417A, R-422A, R-422D, R427A (remplacés progressivement par du R-22) ; c : R-448A, R-449A ; d : R-513A, R-513B, R-450A, R-456A ; e : R-1234yf, R-1234ze, R-1233zd

* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie



* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie

AFCE - 2025

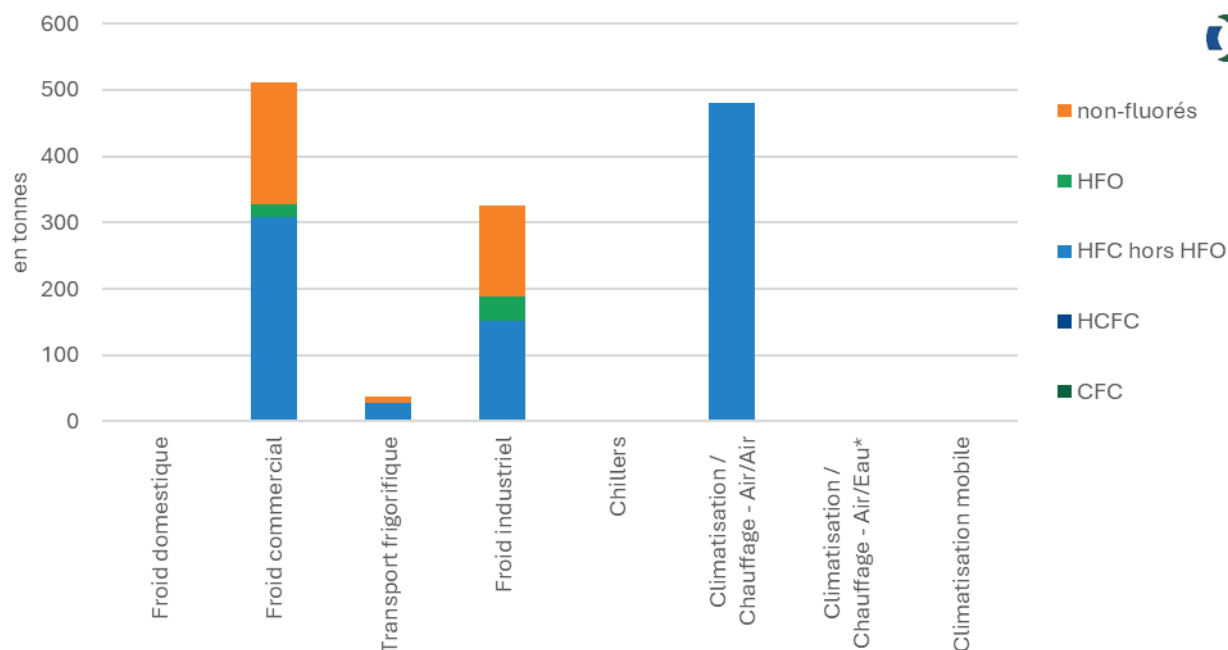
Figure 115 – Quantités par type de fluide frigorigène - BANQUE par secteur

Tableau 52 – Quantités de fluides frigorigènes - CHARGE SUR SITE par secteur

Quantités à la charge en 2023 (tonnes)	Froid domestique	Froid commercial	Transport frigorifique	Froid industriel	Chillers	Climatisation / Chauffage - Air/Air	Climatisation / Chauffage - Air/Eau*	Climatisation mobile	Total
R-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total CFC	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total HCFC	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-134a	-	-	-	58	-	-	-	-	58
R-32	-	-	-	-	-	292	-	-	292
Fluides de PRG~3950a	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-407A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-407C	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-407F	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-410A	-	-	-	-	-	189	-	-	189
Fluides de 2000<PRG<3000b	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fluides de PRG~1300c	-	221	-	31	-	-	-	-	251
R-452A	-	-	24	-	-	-	-	-	24
R-454C - R-455A (PRG~150)	-	83	-	6,57	-	-	-	-	90
R-466A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fluides de PRG~600d	-	4,53	3,67	56	-	-	-	-	64
Total HFC hors HFO	-	308	28	151	-	481	-	-	968
HFOe	-	19	-	38	-	-	-	-	57
Total HFC (HFO inclus)	-	328	28	189	-	481	-	-	1 025
R-290	-	5,61	-	-	-	-	-	-	5,61
R-600a	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-717	-	-	0,20	126	-	-	-	-	126
R-744	-	177	9,17	10	-	-	-	-	197
Total non-fluorés	-	183	9,38	136	-	-	-	-	329
Total général	-	511	37	325	-	481	-	-	1 354

a : R-404A, R507 ; b : R-417A, R-422A, R-422D, R427A (remplacés progressivement par du R-22) ; c : R-448A, R-449A ; d : R-513A, R-513B, R-450A, R-456A ; e : R-1234yf, R-1234ze, R-1233zd

* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie



* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie

AFCE - 2025

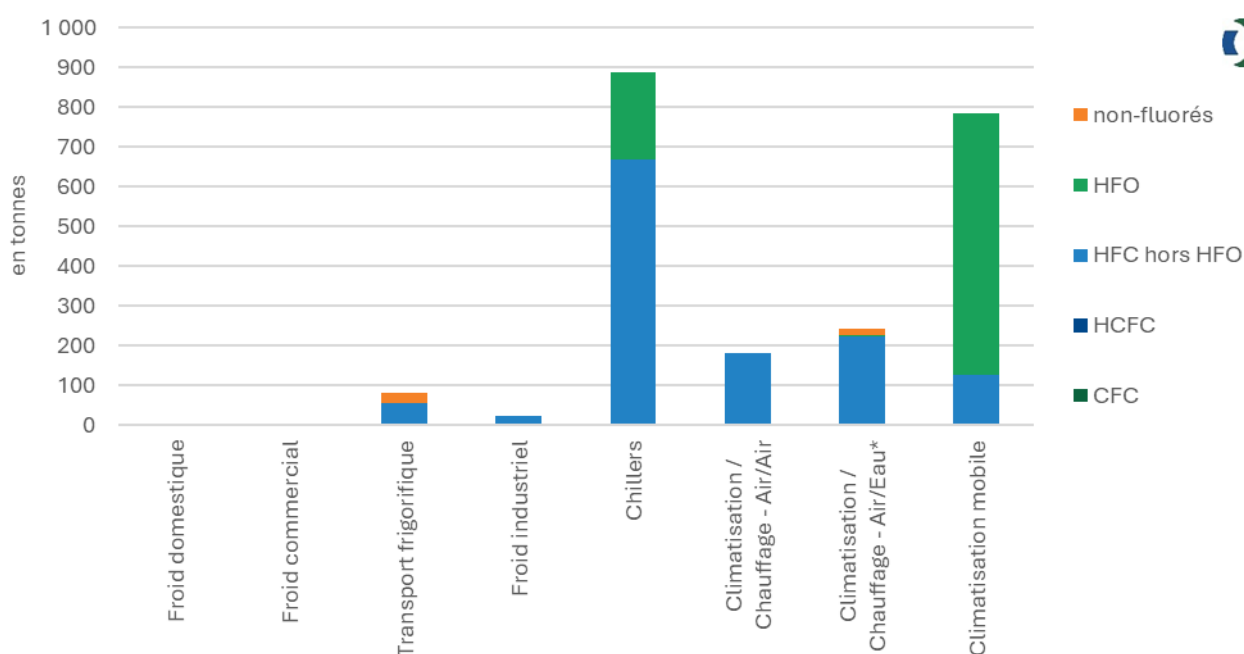
Figure 116 – Quantités par type de fluide frigorigène - CHARGE SUR SITE par secteur

Tableau 53 – Quantités de fluides frigorigènes - PRODUCTION par secteur

Quantités à la production en 2023 (tonnes)	Froid domestique	Froid commercial	Transport frigorifique	Froid industriel	Chillers	Climatisation / Chauffage - Air/Air	Climatisation / Chauffage - Air/Eau*	Climatisation mobile	Total
R-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total CFC	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total HCFC	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-134a	-	-	4,85	-	89	-	3,26	105	202
R-32	-	-	-	-	452	155	141	4,51	753
Fluides de PRG~3950a	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-407A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-407C	-	-	-	-	30	-	0,40	-	31
R-407F	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-410A	-	-	-	-	48	18	80	-	146
Fluides de 2000<PRG<3000b	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fluides de PRG~1300c	-	-	-	22	-	-	-	-	22
R-452A	-	-	12	-	-	-	-	-	12
R-454C - R-455A (PRG~150)	-	0,13	-	2,43	-	-	-	-	2,56
R-466A	-	-	-	-	43	-	-	-	43
Fluides de PRG~600d	-	-	37	-	6,31	8,69	0,24	18	70
Total HFC hors HFO	-	0,13	54	24	669	181	224	127	1 281
HFOe	-	0,66	-	-	220	-	0,66	659	880
Total HFC (HFO inclus)	-	0,79	54	24	889	181	225	786	2 161
R-290	-	1,53	-	-	-	-	16	-	18
R-600a	1,68	0,88	-	-	-	-	-	-	2,56
R-717	-	-	4,16	-	-	-	-	-	4,16
R-744	-	1,18	22	-	-	-	0,57	-	24
Total non-fluorés	1,68	3,60	26	-	-	-	17	-	48
Total général	1,68	4,38	80	24	889	181	242	786	2 209

a : R-404A, R507 ; b : R-417A, R-422A, R-422D, R427A (remplacés progressivement par du R-22) ; c : R-448A, R-449A ; d : R-513A, R-513B, R-450A, R-456A ; e : R-1234yf, R-1234ze, R-1233zd

* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie



* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie

AFCE - 2025

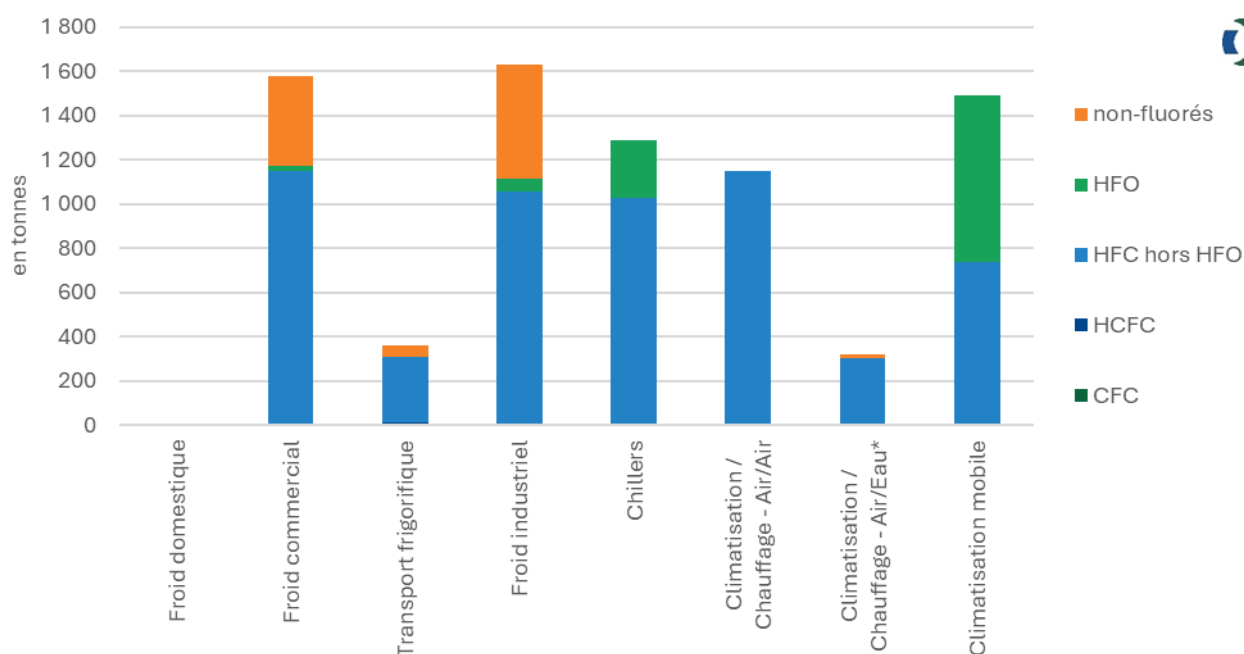
Figure 117 – Quantités par type de fluide frigorigène - PRODUCTION par secteur

Tableau 54 – Quantités totales de fluides frigorigènes mises sur le marché par secteur

Quantités totales mises sur le marché en 2023 (tonnes)	Froid domestique	Froid commercial	Transport frigorifique	Froid industriel	Chillers	Climatisation / Chauffage - Air/Air	Climatisation / Chauffage - Air/Eau*	Climatisation mobile	Total
R-11	-	-	-	0,67	-	-	-	-	0,7
R-12	-	-	2,01	-	-	-	-	-	2,01
Total CFC	-	-	2,01	0,67	-	-	-	-	2,68
R-22	-	-	11	0,47	-	-	-	-	11
Total HCFC	-	-	11	0,47	-	-	-	-	11
R-134a	0,07	196	122	300	166	0,55	3,87	703	1 493
R-32	-	-	-	-	522	602	162	5,19	1 292
Fluides de PRG~3950a	-	83	18	117	-	-	0,94	-	218
R-407A	-	68	-	7,88	-	-	-	-	76
R-407C	-	0,60	-	-	85	1,52	5,00	6,66	98
R-407F	-	59	-	11	0,04	-	-	-	70
R-410A	-	1,94	0,39	-	119	537	130	-	788
Fluides de 2000<PRG<3000b	-	2,01	-	17	5,36	0,54	-	-	25
Fluides de PRG~1300c	-	622	-	356	-	-	-	-	978
R-452A	-	-	76	-	-	-	-	-	76
R-454C - R-455A (PRG~150)	-	106	-	13	-	-	-	-	119
R-466A	-	-	-	-	49	-	-	-	49
Fluides de PRG~600d	0,02	13	77	233	80	9,99	0,28	21	434
Total HFC hors HFO	0,09	1 152	293	1 055	1 026	1 152	302	736	5 716
HFOe	-	23	-	59	264	-	0,76	758	1 104
Total HFC (HFO inclus)	0,09	1 175	293	1 114	1 290	1 152	303	1 494	6 820
R-290	0,04	16	-	-	-	-	19	-	35
R-600a	2,26	1,01	-	-	-	-	-	-	3,27
R-717	-	1,64	5,07	488	-	-	-	-	495
R-744	-	384	50	25	-	-	0,68	-	459
Total non-fluorés	2,30	403	55	513	-	-	19	-	992
Total général	2,39	1 578	361	1 628	1 290	1 152	322	1 494	7 826

a : R-404A, R507 ; b : R-417A, R-422A, R-422D, R427A (remplacés progressivement par du R-22) ; c : R-448A, R-449A ; d : R-513A, R-513B, R-450A, R-456A ; e : R-1234yf, R-1234ze, R-1233zd

* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie



* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie

AFCE - 2025

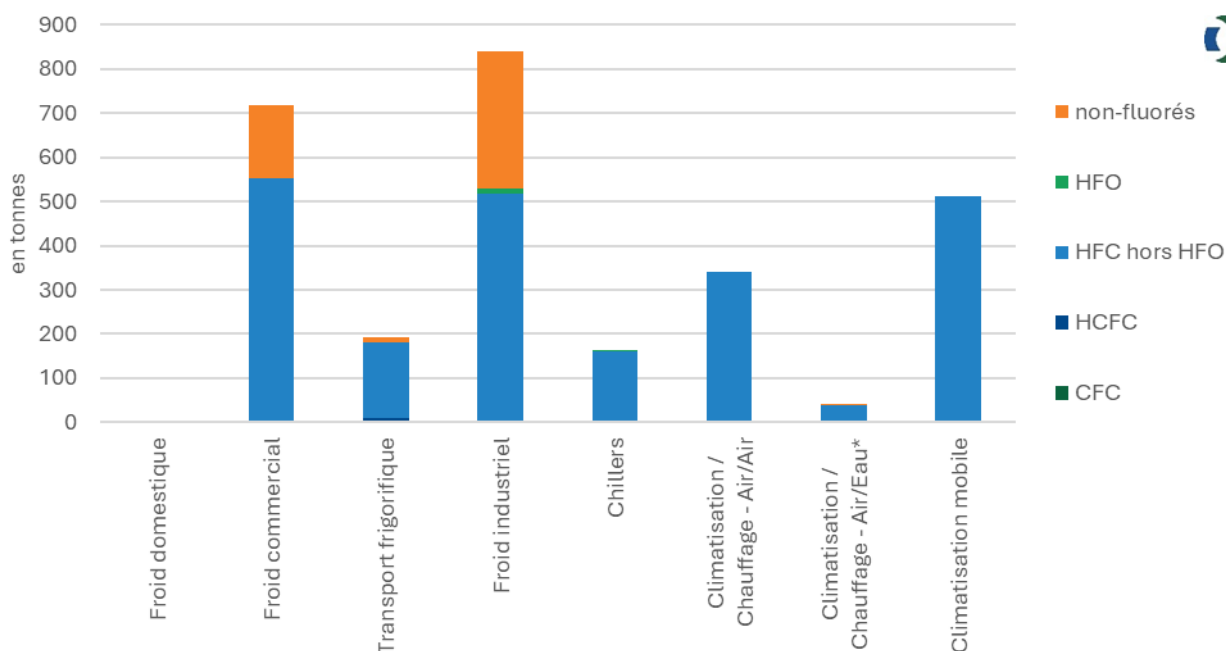
Figure 118 – Quantités totales mises sur le marché par type de fluide frigorigène par secteur

Tableau 55 – Besoin en fluides frigorigènes pour la maintenance par secteur

Quantités totales pour la maintenance en 2023 (tonnes)	Froid domestique	Froid commercial	Transport frigorifique	Froid industriel	Chillers	Climatisation / Chauffage - Air/Air	Climatisation / Chauffage - Air/Eau*	Climatisation mobile	Total
R-11	-	-	-	0,58	-	-	-	-	0,6
R-12	-	-	1,75	-	-	-	-	-	1,75
Total CFC	-	-	1,75	0,58	-	-	-	-	2,33
R-22	-	-	9,39	0,41	-	-	-	-	9,80
Total HCFC	-	-	9,39	0,41	-	-	-	-	9,80
R-134a	0,06	170	101	203	56	0,48	0,10	507	1 038
R-32	-	-	-	-	1,69	77	0,03	-	79
Fluides de PRG~3950a	-	72	15	101	-	-	0,82	-	190
R-407A	-	59	-	6,86	-	-	-	-	66
R-407C	-	0,52	-	-	43	1,32	3,95	5,79	55
R-407F	-	51	-	9,90	0,04	-	-	-	61
R-410A	-	1,68	0,34	-	55	260	33	-	350
Fluides de 2000<PRG<3000b	-	1,75	-	14	4,66	0,47	-	-	21
Fluides de PRG~1300c	-	181	-	110	-	-	-	-	291
R-452A	-	-	25	-	-	-	-	-	25
R-454C - R-455A (PRG~150)	-	9,02	-	1,89	-	-	-	-	11
R-466A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fluides de PRG~600d	0,02	6,96	26	67	0,52	-	-	-	101
Total HFC hors HFO	0,08	553	169	515	161	339	38	513	2 288
HFOe	-	-	-	13	2,61	-	-	-	16
Total HFC (HFO inclus)	0,08	553	169	529	163	339	38	513	2 304
R-290	0,04	7,11	-	-	-	-	0,11	-	7,25
R-600a	0,28	-	-	-	-	-	-	-	0,28
R-717	-	1,42	0,05	299	-	-	-	-	300
R-744	-	155	12	11	-	-	0,02	-	179
Total non-fluorés	0,32	164	12	310	-	-	0,13	-	486
Total général	0,40	717	192	840	163	339	38	513	2 803

a : R-404A, R507 ; b : R-417A, R-422A, R-422D, R427A (remplacés progressivement par du R-22) ; c : R-448A, R-449A ; d : R-513A, R-513B, R-450A, R-456A ; e : R-1234yf, R-1234ze, R-1233zd

* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie



* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie

AFCE - 2025

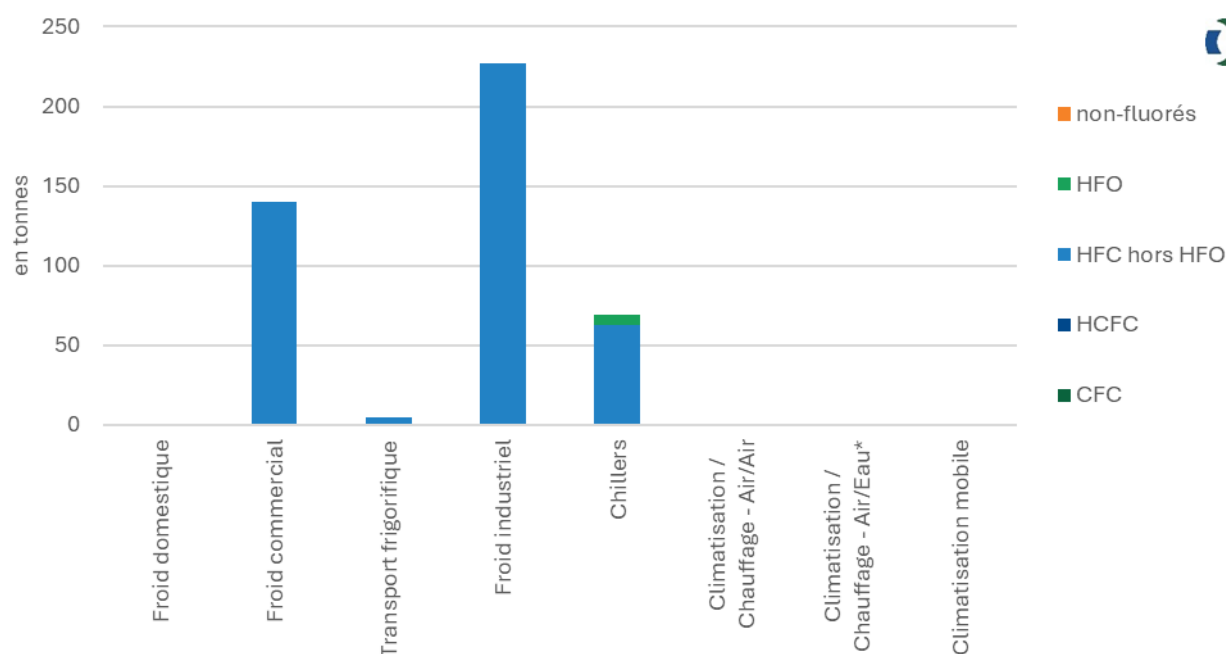
Figure 119 – Besoin pour la maintenance par type de fluide frigorigène par secteur

Tableau 56 – Besoin en fluides frigorigènes pour le retrofit par secteur

Quantités totales pour le retrofit en 2023 (tonnes)	Froid domestique	Froid commercial	Transport frigorifique	Froid industriel	Chillers	Climatisation / Chauffage - Air/Air	Climatisation / Chauffage - Air/Eau*	Climatisation mobile	Total
R-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total CFC	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total HCFC	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-134a	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-32	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fluides de PRG~3950a	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-407A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-407C	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-407F	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-410A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fluides de 2000<PRG<3000b	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fluides de PRG~1300c	-	140	-	147	-	-	-	-	287
R-452A	-	-	4,51	-	-	-	-	-	4,51
R-454C - R-455A (PRG~150)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-466A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fluides de PRG~600d	-	-	-	80	62	-	-	-	142
Total HFC hors HFO	-	140	4,51	227	62	-	-	-	433
HFOe	-	-	-	-	6,57	-	-	-	6,57
Total HFC (HFO inclus)	-	140	4,51	227	69	-	-	-	440
R-290	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-600a	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-717	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-744	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total non-fluorés	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total général	-	140	4,51	227	69	-	-	-	440

a : R-404A, R507 ; b : R-417A, R-422A, R-422D, R427A (remplacés progressivement par du R-22) ; c : R-448A, R-449A ; d : R-513A, R-513B, R-450A, R-456A ; e : R-1234yf, R-1234ze, R-1233zd

* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie



* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie

AFCE - 2025

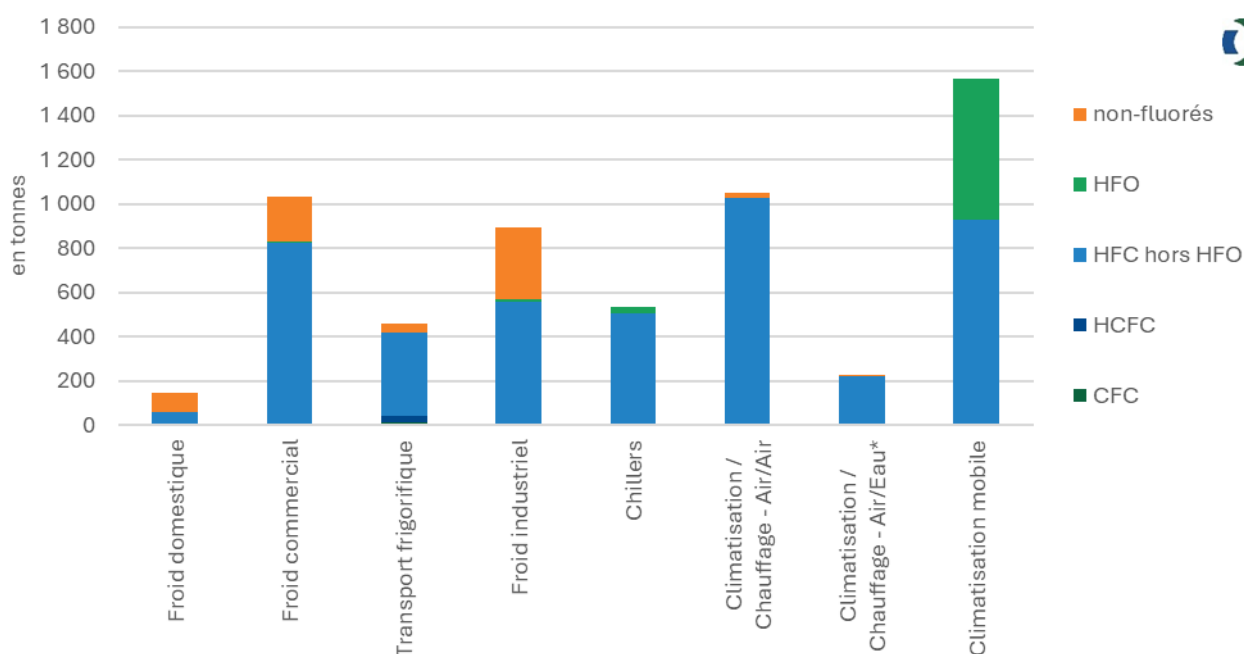
Figure 120 – Besoin pour le retrofit par type de fluide frigorigène par secteur

Tableau 57 – EMISSIONS TOTALES de fluides frigorigènes par secteur en tonnes

Emissions totales en 2023 (tonnes)	Froid domestique	Froid commercial	Transport frigorifique	Froid industriel	Chillers	Climatisation / Chauffage - Air/Air	Climatisation / Chauffage - Air/Eau*	Climatisation mobile	Total
R-11	-	-	-	0,63	0,06	-	-	-	0,7
R-12	-	-	12	0,06	0,06	0,0002	-	-	12
Total CFC	-	-	12	0,69	0,13	0,0002	-	-	12
R-22	-	-	30	1,34	1,601	0,0002	1,78	-	35
Total HCFC	-	-	30	1,34	1,601	0,0002	1,78	-	35
R-134a	60	223	227	213	144	1,46	3,28	914	1 785
R-32	-	-	-	-	102	254	27	1,10	384
Fluides de PRG~3950a	-	126	24	118	-	-	1,47	-	269
R-407A	-	67	-	7,26	-	-	-	-	74
R-407C	-	0,54	-	-	122	54	35	9,23	221
R-407F	-	51	-	10	0,01	-	-	-	61
R-410A	-	1,74	0,69	-	114	714	153	-	983
Fluides de 2000<PRG<3000b	-	3,17	-	18	13	3,51	-	-	37
Fluides de PRG~1300c	-	300	-	116	-	-	-	-	416
R-452A	-	-	55	-	-	-	-	-	55
R-454C - R-455A (PRG~150)	-	43	-	2,09	-	-	-	-	46
R-466A	-	-	-	-	6,78	-	-	-	6,8
Fluides de PRG~600d	0,02	7,11	73	71	2,66	0,46	0,01	2,74	157
Total HFC hors HFO	60	823	379	555	505	1 027	220	927	4 495
HFOe	-	6,53	-	14	28	-	0,03	640	689
Total HFC (HFO inclus)	60	829	379	569	533	1 027	220	1 567	5 183
R-290	0,04	8,27	-	-	-	26	2,44	-	37
R-600a	86	0,51	-	-	-	-	-	-	87
R-717	-	1,44	2,26	312	-	-	-	-	315
R-744	-	191	38	11	-	-	0,05	-	241
Total non-fluorés	87	201	41	323	-	26	2,49	-	680
Total général	146	1 031	460	894	535	1 053	224	1 567	5 910

a : R-404A, R507 ; b : R-417A, R-422A, R-422D, R427A (remplacés progressivement par du R-22) ; c : R-448A, R-449A ; d : R-513A, R-513B, R-450A, R-456A ; e : R-1234yf, R-1234ze, R-1233zd

* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie



* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie

AFCE - 2025

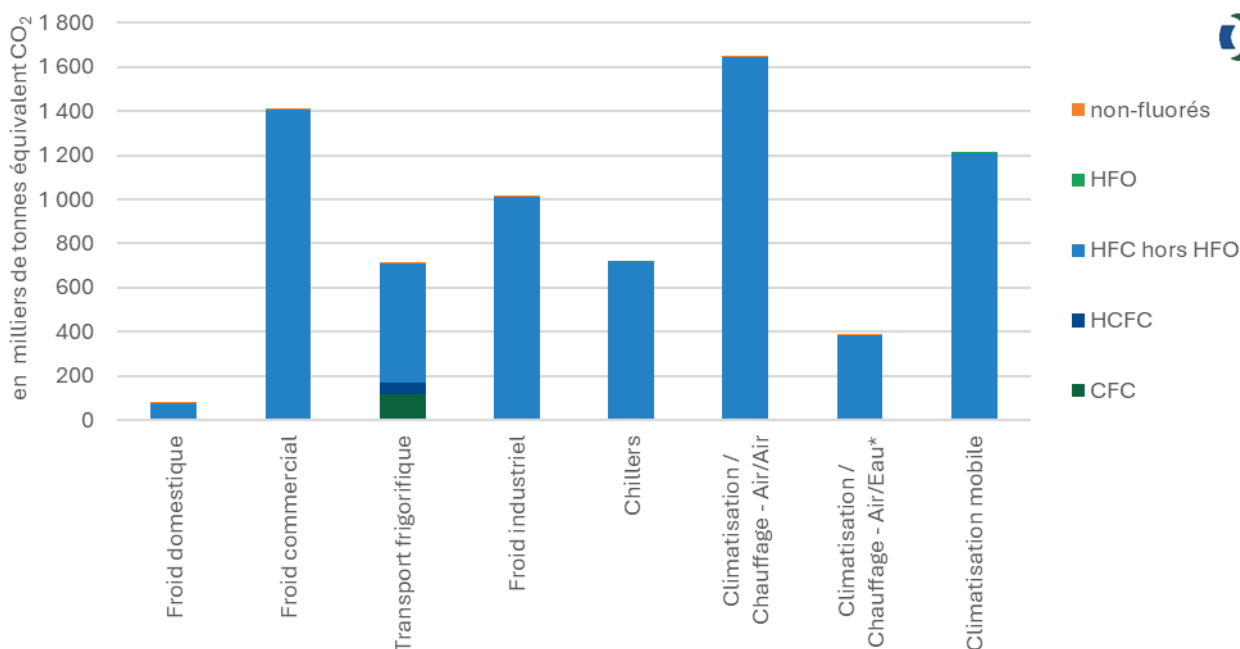
Figure 121 – EMISSIONS TOTALES par type de fluide frigorigène par secteur en tonnes

Tableau 58 – EMISSIONS TOTALES de fluides frigorigènes par secteur en EQUIVALENT CO₂

Emissions totales en 2023 (ktCO ₂ e)	Froid domestique	Froid commercial	Transport frigorifique	Froid industriel	Chillers	Climatisation / Chauffage - Air/Air	Climatisation / Chauffage - Air/Eau*	Climatisation mobile	Total
R-11	-	-	-	5,87	0,60	-	-	-	6,5
R-12	-	-	118	0,57	0,63	0,00	-	-	119
Total CFC	-	-	118	6,44	1,23	0,0018	-	-	126
R-22	-	-	52	2,36	2,82	0,00	3,13	-	61
Total HCFC	-	-	52	2,36	2,818	0,0003	3,13	-	61
R-134a	78	290	295	276	187	1,89	4,26	1 189	2 320
R-32	-	-	-	-	69	172	18	0,75	260
Fluides de PRG~3950a	-	497	93	464	-	-	5,78	-	1 059
R-407A	-	128	-	14	-	-	-	-	142
R-407C	-	0,88	-	-	198	88	57	15	359
R-407F	-	86	-	17	0,01	-	-	-	103
R-410A	-	3,34	1,32	-	219	1 373	294	-	1 891
Fluides de 2000<PRG<3000b	-	7,01	-	40	30	7,77	-	-	85
Fluides de PRG~1300c	-	383	-	149	-	-	-	-	532
R-452A	-	-	107	-	-	-	-	-	107
R-454C - R-455A (PRG~150)	-	6,36	-	0,31	-	-	-	-	6,67
R-466A	-	-	-	-	4,72	-	-	-	4,7
Fluides de PRG~600d	0,01	3,88	41	41	1,50	0,25	0,00	1,50	89
Total HFC hors HFO	78	1 405	536	1 002	710	1 642	379	1 206	6 958
HFOe	-	0,01	-	0,01	0,04	-	0,00	0,64	-
Total HFC (HFO inclus)	78	1 405	536	1 002	710	1 642	379	1 207	6 959
R-290	0,00	0,02	-	-	-	0,08	0,01	-	0,11
R-600a	0,26	0,00	-	-	-	-	-	-	0,26
R-717	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-744	-	0,19	0,04	0,01	-	-	0,00	-	0,24
Total non-fluorés	0,26	0,22	0,04	0,01	-	0,08	0,01	-	0,61
Total général	78	1 406	707	1 010	714	1 643	382	1 207	7 146

a : R-404A, R507 ; b : R-417A, R-422A, R-422D, R427A (remplacés progressivement par du R-22) ; c : R-448A, R-449A ; d : R-513A, R-513B, R-450A, R-456A ; e : R-1234yf, R-1234ze, R-1233zd

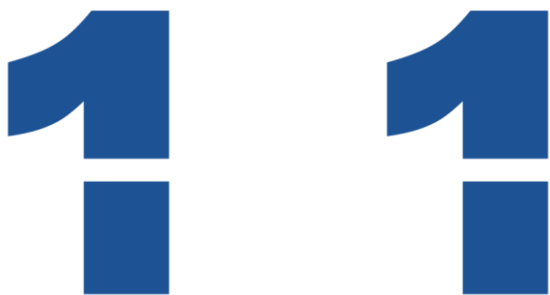
* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie



* Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie

AFCE - 2025

Figure 122 – EMISSIONS TOTALES par type de fluide frigorigène par secteur en EQUIVALENT CO₂



Annexes

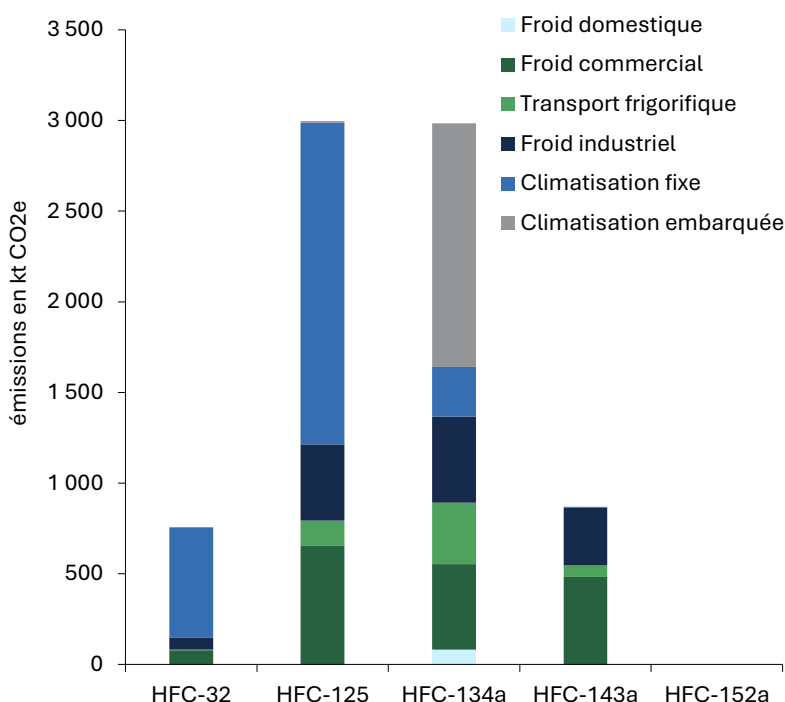
11.1. PRG donnés par le 4^{ème} & 5^{ème} rapport du GIEC (AR4 – AR5)

Tableau 59 – PRG des fluides frigorigènes pris en compte dans le calcul

REFRIGERENT	PRG4	PRG5		REFRIGERENT	PRG4	PRG5
R-11	4 750	4 660		R-422D	2 729	2 473
R-12	10 900	10 200		R-427A	2 138	2 024
R-1233zd	5	5		R-448A	1 387	1 273
R-1234yf	4	1		R-449A	1 397	1 282
R-1234ze	7	1		R-450A	605	547
R-125	3 500	3 170		R-452A	2 141	1 945
R-134a	1 430	1 300		R-454B	466	467
R-143a	4 470	4 800		R-454C	148	146
R-152a	124	138		R-455A	148	146
R-22	1 810	1 760		R-456A	687	626
R-290	3	3		R-466A	735	697
R-32	675	677		R-507	3 985	3 985
R-401A	1 183	1 130		R-513A	631	573
R-404A	3 922	3 943		R-513B	596	540
R-407A	2 107	1 923		R-600a	3	3
R-407C	1 774	1 624		R-717	0	0
R-407F	1 825	1 674		R-744	1	1
R-408A	3 152	3 257				
R-410A	2 088	1 924				
R-417A	2 346	2 127				
R-422A	3 143	2 847				

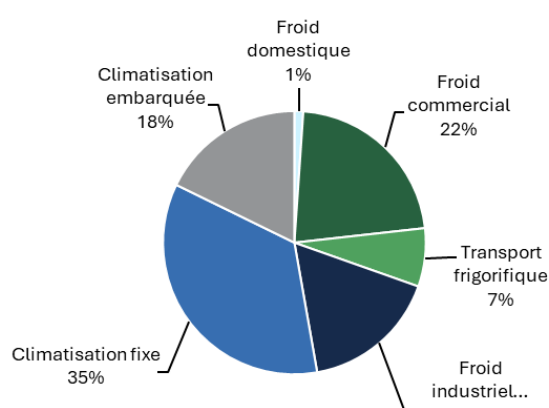
11.2. Emissions déclarées pour le secteur 2F1

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 »).



source Citepa / format CCNUCC - mars 2025

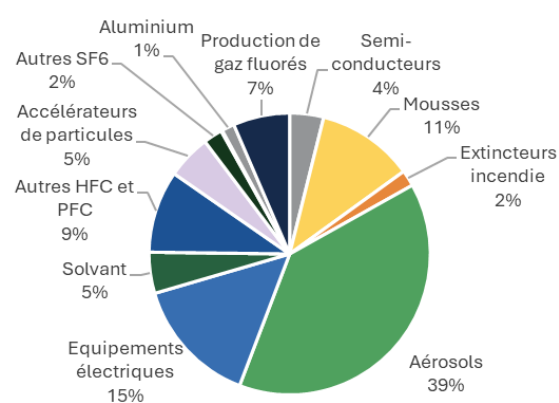
analyse_froid&clim.xls/bilan



source Citepa / format CCNUCC - mars 2025

analyse_froid&clim.xls/b

Figure 123 - Distribution des émissions de HFC en CO₂e du CRF 2F1 en 2023 (périmètre Kyoto)



source Citepa / format CCNUCC - mars 2025

Graph_2F1_Conso_np.xlsx/Secteu

Figure 124 - Contribution des secteurs hors HVACR aux émissions de HFC en CO₂e de la catégorie CRF 2F1 en 2023 (périmètre Kyoto)

11.3. Méthodologie

11.3.1. Introduction

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 (CO₂), méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O), les deux familles de substances halogénées, à savoir les hydrofluorocarbures (HFC) et perfluorocarbures (PFC), l'hexafluorure de soufre (SF₆) ainsi que le trifluorure d'azote (NF₃). Dans le cadre de la France, les périmètres couverts sont la Métropole et l'ensemble des territoires d'Outre-mer pour la CCNUCC ; la Métropole et les territoires d'Outre-mer inclus dans l'Union Européenne (UE) pour le Protocole de Kyoto.

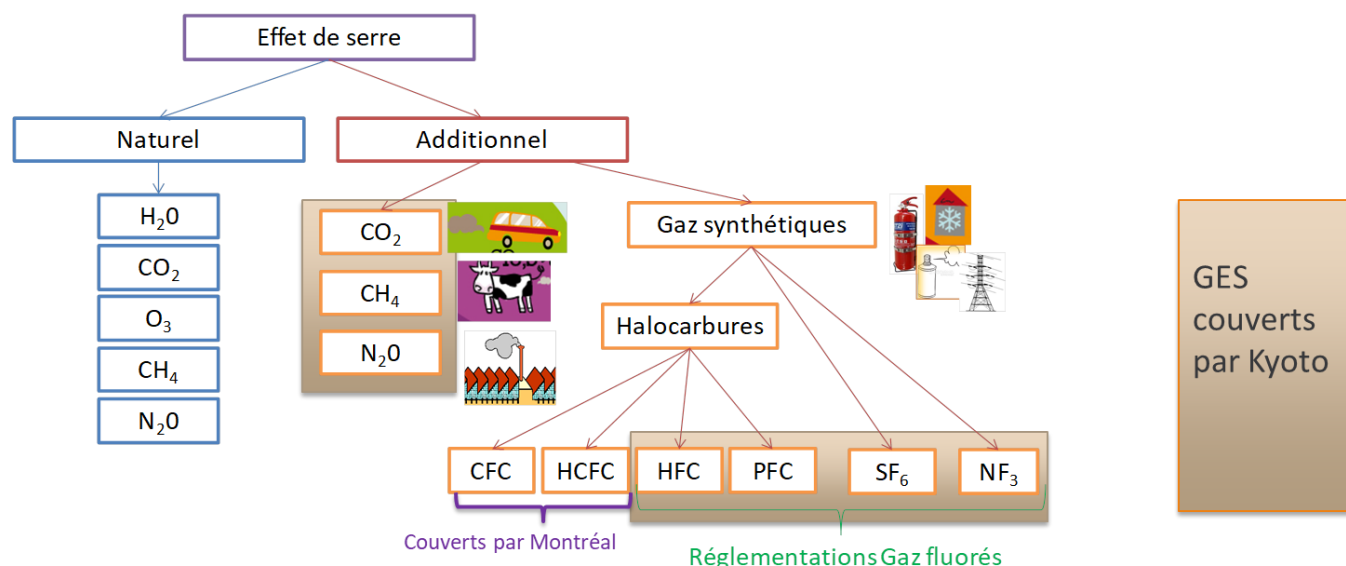


Figure 125 - Les gaz à effet de serre

Le Citepa, mandaté par le ministère de l'Environnement depuis 2000, réalise les inventaires d'émissions de gaz à effet de serre (GES), service d'intérêt économique général (SIEG). Dans ce cadre, il calcule les émissions de l'ensemble des gaz à effet de serre, dont les HFC, et en particulier ceux utilisés dans les secteurs du froid et de la climatisation.

Dans le cadre des obligations de rapportage de la France, ces émissions sont déclarées au secteur 2F1 des tables CRT (Common Reporting Tables) de la CCNUCC.

La Figure 126 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 :

- les quantités chargées dans les nouveaux équipements,
- la banque, soit les quantités présentes dans les équipements formant le parc français,
- 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 se produisant au cours

de la vie de l'équipement et les émissions de fin de vie.

Elles sont décomposées par HFC primaire :

- HFC-32,
- HFC-125,
- HFC-134a,
- HFC-143a
- et HFC-152a.

Les HFC contenus dans les mélanges HCFC-HFC 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 :

- froid domestique,
- froid commercial,
- transport frigorifique,
- froid industriel incluant une partie des chillers,
- climatisation fixe, incluant la climatisation à air, les pompes à chaleur résidentielles et une partie de chillers,
- 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 en cours (ici 2022), à chaque édition d'inventaire.

Tables CRF											
GREENHOUSE GAS SOURCE AND SINK CATEGORIES	Gas (please specify) <i>One row per substance</i>	ACTIVITY DATA			IMPLIED EMISSION FACTORS ⁽¹⁾			EMISSIONS ⁽²⁾			
		Amount			Product manufacturing factor	Product life factor	Disposal loss factor	From manufacturing	From stocks	From disposal	Recovery ⁽³⁾
		Filled into new manufactured products	In operating systems (average annual stocks)	Remaining in products at decommissioning							
		(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	NO	IE	NO	NO
HFC-125	HFC-125	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO
HFC-134a	HFC-134a	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO
HFC-143a	HFC-143a	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO
C3F8	C3F8	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO	IE	NO	NO
Domestic refrigeration											
HFC-134a	HFC-134a	NO	1,28	NO	NO	0,30	NO	NO	0,00	NO	NO
Industrial refrigeration											
Transport refrigeration											
Mobile air-conditioning											
HFC-134a	HFC-134a	NO	16,33	NO	NO	8,33	NO	NO	1,36	NO	NO
Stationary air-conditioning											
HFC-32	HFC-32	NO	0,57	NO	NO	100,00	NO	NO	0,57	NO	NO
HFC-125	HFC-125	NO	0,62	NO	NO	100,00	NO	NO	0,62	NO	NO
HFC-134a	HFC-134a	NO	0,34	NO	NO	100,00	NO	NO	0,34	NO	NO
HFC-143a	HFC-143a	NO	0,09	NO	NO	100,00	NO	NO	0,09	NO	NO
C3F8	C3F8	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO

Figure 126 – Tables CRF (Common Reporting Format), mode de déclaration des émissions de HFC auprès de la CNUCC

Bien que tous les pays européens soient 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 des émissions calculées 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 exhaustive possible. En

particulier :

- C'est une [méthode détaillée « Tier2a »](#) recommandée par le GIEC pour le calcul des émissions des secteurs du froid et de la climatisation
- Elle 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 ;
- Elle utilise les données [issues de la profession](#) et collabore avec les fédérations de professionnels ;
- Elle 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 ;
- Elle 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 niveaux moyens.

La demande de l'AFCE

Pour répondre aux besoins de la profession, l'AFCE a souhaité que le Citepa réalise un rapport annuel dédié aux secteurs du froid et de la climatisation et couvrant l'ensemble des fluides frigorigènes, pas seulement les HFC soumis à déclaration. Chaque année, le rapport présente donc les résultats du calcul d'inventaire de 1990 à l'année n-1, n étant l'année d'édition du rapport, par famille de fluide frigorigène (CFC, HCFC, HFC, autres fluides non fluorés) et par fluide pour l'année n-2, les résultats de l'année n-1 n'étant qu'une estimation provisoire. Les résultats sont regroupés pour les fluides frigorigènes de même type (par exemple R-448A/R-449A pour les mélanges de PRG autour de 1300) car la méthode de calcul ne permet pas de distinguer les parts de marché des fluides frigorigènes.

Le rapport comporte les éléments sur :

- l'approche utilisée pour le calcul des émissions de fluides frigorigènes,
- 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 l'année n-2 ; l'estimation provisoire pour l'année n-1, calculée à partir de données projetées est également présentée

La date de parution du rapport est contrainte aux dates de soumission auprès des instances internationales qui est finalisée en avril de l'année suivante (par exemple, les calculs 2023 ont été réalisés en 2024 et soumis puis validés en avril 2025).

Pour avoir des explications détaillées sur la méthode de calcul et la reconstitution de la base de données des hypothèses, par secteur, merci de consulter le rapport d'inventaire de 2022 [Ref 1 – 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](#)

] Les rapports suivants présentent seulement un résumé de la méthode de calcul et s'attachent à détailler les hypothèses de l'année en cours.

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 retours sur les précédents rapports d'inventaire publiés qui permettent à la fois d'améliorer le calcul des émissions et d'adapter le rapport pour qu'il soit plus utile à la profession.

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 réglementation européenne F-Gas utilise les PRG du 4^{ème} rapport du GIEC, même dans sa version révisée ((UE) 2024/573) excepté pour les HFO pour lesquels elle considère les PRG du 6^{ème} rapport du GIEC).

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.

Les inventaires 2021 et 2022 ont 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 60 – Evolution des PRG des principaux CFC, HCFC et HFC utilisés en réfrigération et climatisation [Ref 5]

SUBSTANCE	FORMULE CHIMIQUE	PRG A HORIZON 100 ANS		
		2 ND RAPPORT (SAR)	4 ^E RAPPORT (AR4)	5 ^E RAPPORT (AR5)
Substances relatives au Protocole de Montréal				
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
Hydrofluorocarbures (HFC)				
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.

11.3.2. Résumé de la méthode de calcul

La méthode de calcul s'appuie sur les lignes directrices du GIEC [Ref 2], les développements réalisés par le CES

MINES-ParisTech lors de la réalisation des inventaires de fluides frigorigènes jusqu’en 2016 [Ref 7] et des travaux de thèse [Ref 3].

L’ensemble des équipements du froid et de la climatisation sont pris en compte et structurés selon 8 grands secteurs (

Tableau 61). 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 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. Des données complémentaires sont nécessaires 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. Le SYNEG n’a pas encore pu fournir ces éléments.

Enquête 2023 :

Pour les besoins de déclarations d’inventaire auprès de la CNUCCC et de la CE, qui ne comportent que 6 principaux secteurs, les chillers et les pompes à chaleurs doivent être répartis dans les secteurs « climatisation » et « froid industriel ». Les pompes à chaleur résidentielles sont, dans leur globalité, supposées appartenir au secteur climatisation. Pour le secteur « froid industriel, une enquête assez ancienne auprès des fabricants avait montré la tendance que 2/3 des émissions des chillers pouvaient être attribuées au secteur froid industriel. Le secteur « climatisation » inclut donc les émissions de la climatisation à air, des pompes à chaleur réversibles et 1/3 des émissions des chillers. Dans le cadre de l’enquête 2023-2024, Unclima a été sollicité pour mettre à jour ces tendances. Peu de réponses ont pu être obtenues cette année. Les premiers éléments de l’enquête montrent que :

- Les chillers de forte puissance concernent plus significativement l’industrie ;
- Les technologies « water cooled » sont davantage utilisées en industrie que les « air cooled » ;
- Selon les positionnements des fabricants, les réponses peuvent être assez variées et le seuil de rattachement au secteur industriel être assez bas si le fabricant est bien implanté dans le secteur industriel.

A ce stade des réponses, il a été décidé de ne pas faire évoluer les ratios pour cette année et de relancer les adhérents d’Uniclima pour l’an prochain.

Tableau 61 – Structure de la base de données des secteurs du froid et de la climatisation

SECTEUR	SOUS-SECTEUR
Froid domestique	Réfrigérateurs Congélateurs Sèche-linges thermodynamiques Caves à vin
Froid commercial	Supermarchés Hypermarchés Petits commerces : • équipements frigorifiques utilisant des groupes de condensation (chambre froide, par exemple) • équipements utilisant des groupes hermétiques (armoire réfrigérée par exemple) et distributeurs automatiques
Transport frigorifique	Semi-remorques Utilitaires Conteneurs frigorifiques autonomes Navires réfrigérés

SECTEUR	SOUS-SECTEUR
Froid industriel	Agroalimentaire : • viande • lait • brasserie et industrie du vin • autres industries agroalimentaires • entrepôts réfrigérés Procédés chimiques Procédés pharmaceutiques Production caoutchouc Patinoires Tanks à lait
Groupes refroidisseurs à eau	À compresseur centrifuge De forte puissance (> 350 kW) De moyenne puissance (50 à 350 kW) De faible puissance (< 50 kW)
Climatisation / Chauffage - Air/Air	Climatiseur mobile ; Climatiseur fenêtre (ou window) PAC air/air Mono-split PAC air/air Multi-split Systèmes splits centralisés PAC air/air DRV (Débit Réfrigérant Variable) ou VRV en anglais Roof top Armoires verticales (ou consoles) ; Armoire spéciale (ou cabinet)
Climatisation / Chauffage - Air/Eau, Eau/Eau, Géothermie	PAC Air/eau PAC Eau/eau PAC géothermiques (Sol/sol ou Sol/eau) Chauffe-eaux thermodynamiques (CET)
Climatisation automobile	Climatisation automobile (jusqu'à 5 t) Véhicules industriels (camions de plus de 5 t) Cars et bus Transport ferroviaire (trains/TGV, tramways, RER et métros)

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 ($E_{\text{durée de vie}}$) ;
- des émissions de fin de vie, lors de la mise au rebut de l'équipement ($E_{\text{fin de vie}}$) ;
- des émissions liées à la gestion des conteneurs de fluides frigorigènes, notamment aux talons de charge résiduels ($E_{\text{conteneurs}}$).

$$E_{\text{totales}} = E_{\text{charges}} + E_{\text{durée de vie}} + E_{\text{fin de vie}} + E_{\text{conteneurs}}$$

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

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

Mise en œuvre de l'approche de niveau 2a

La Figure 127 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.

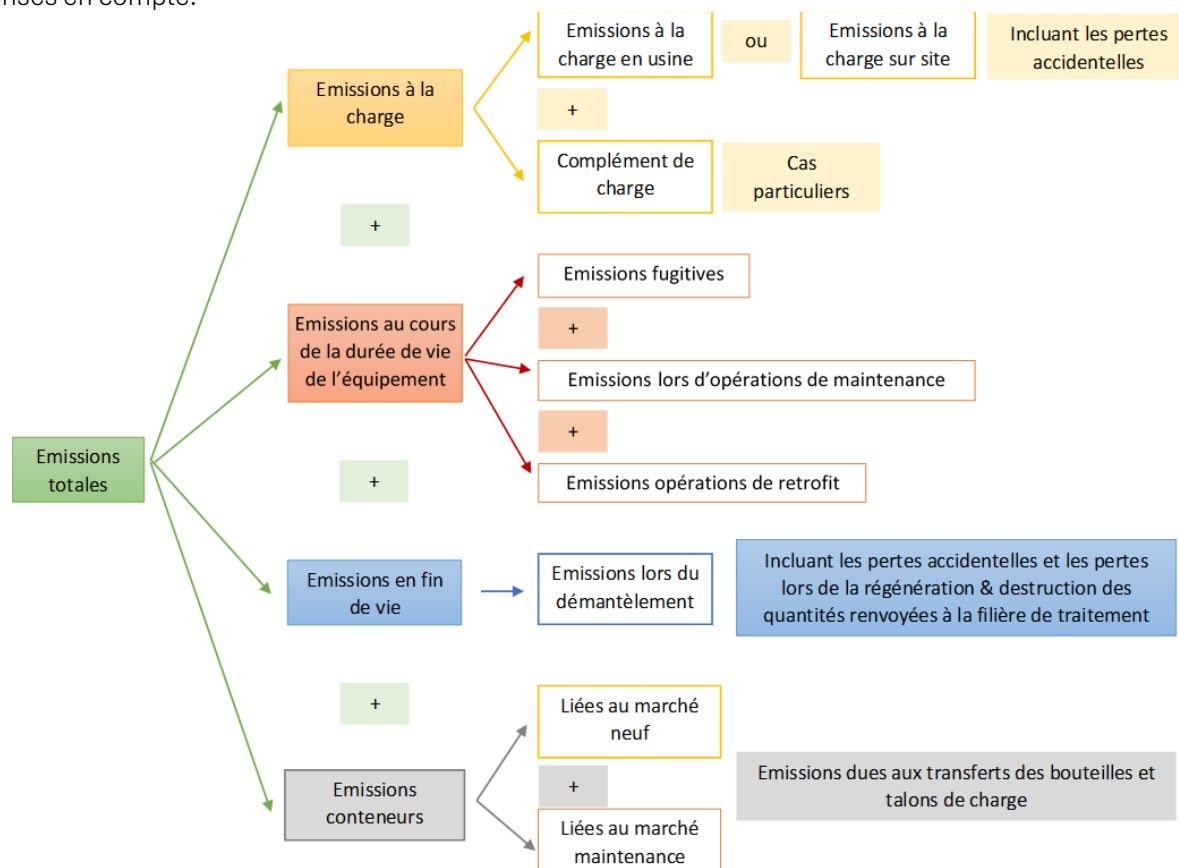


Figure 127 - Principes de la méthode de calcul des émissions de fluides frigorigènes

Les émissions sont calculées à partir :

- de paramètres permettant d'évaluer la « donnée d'activité » (Tableau 62) ;
- d'un facteur d'émission.

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. Un modèle de la courbe de durée de vie [Ref 3] est utilisé de façon à introduire une évolution plus réaliste de la banque et des transitions de fluides frigorigènes, par application. Chaque équipement est caractérisé par une durée de vie moyenne, autour de laquelle est construite, par millésime de mise sur le marché, une courbe de durée de vie en trois parties (exemples Figure 128, Figure 129).

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.

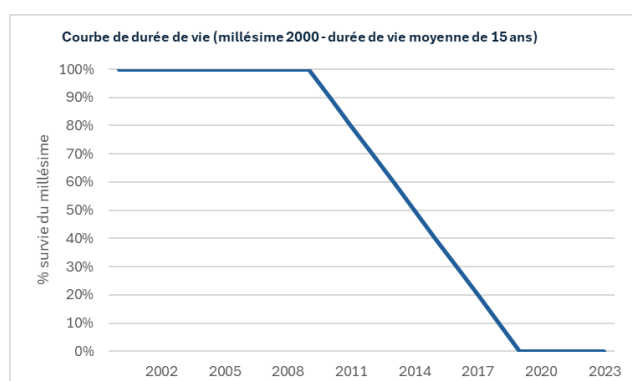


Figure 128 – Exemple d'une courbe de durée de vie pour un équipement de durée de vie moyenne de 15 ans

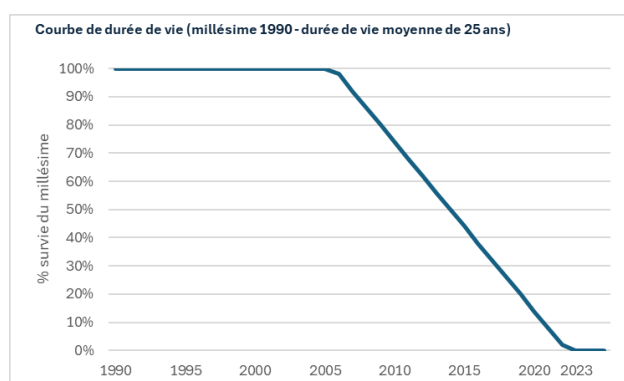


Figure 129 – Exemple d'une courbe de durée de vie pour un équipement de durée de vie moyenne de 25 ans

Bilan des données nécessaires au calcul

L'ensemble des données d'activité et facteurs d'émissions récapitulé au Tableau 62, a été consolidé, pour la période nécessaire au calcul d'inventaire de 1990 à 2022, pour chacune des 40 applications des 8 domaines du froid et de la climatisation prises en compte. Ces données sont revues chaque année, alors que l'année en cours est mise à jour.

Tableau 62 – Données d'activité nécessaires par application et par an pour le calcul des émissions de réfrigérants

TYPE D'EMISSION	DONNEE D'ACTIVITE	PARAMETRES DONT DEPENDENT LES DONNEES D'ACTIVITES
A la charge	Quantités chargées dans les équipements neufs	Marchés ou productions d'équipements selon mode de charge & charge moyenne & fluides utilisés
Durée de vie	Banque	Marchés d'équipements et fluides utilisés & Charge moyenne & durée de vie Caractéristiques de la maintenance et du retrofit
Fin de vie	Quantités contenues dans les équipements arrivant en fin de vie	Marchés d'équipement & Charge moyenne & durée de vie & mode de maintenance et taux d'émission fugitif (impactant la charge résiduelle)
Conteneurs	Marchés de HFC	Marché neuf, marché maintenance, marché retrofit

Les facteurs d'émissions sont, dans le cas de la France, généralement évalués par retour d'enquête de terrain et avis de fabricants et d'experts. 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 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 mais il n'est appliqué qu'aux talons de charge, lesquels sont supposés égaux à 15 % du marché. Des échanges avec l'ADC3R [Ref 53] ont visé à affiner cette estimation. Après discussion, le niveau de ces hypothèses semble correct cependant, la plupart des gros conteneurs ne sont, en pratique, pas vidés mais rechargés des mêmes fluides frigorigènes. Par conséquent, les émissions ne se produisent pas systématiquement. Restent les émissions se produisant lors du transfert en conteneurs et bouteilles de différents volumes. La distinction est difficile à chiffrer. Il a été convenu de maintenir les hypothèses.
- **Le facteur d'émission à la charge de l'équipement** varie, selon les lignes directrices du GIEC, entre 0,2 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, fugitives et de fin de vie, prises en compte dans le calcul seront précisées dans la partie hypothèses de chaque secteur.

11.4. Acronymes et abréviations

A

AR4 Assessment Report 4 (4ème rapport du GIEC)

AR5 Assessment Report 5 (5ème rapport du GIEC)

C

CCNUCC Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique

CE Commission Européenne

CFC ChloroFluoroCarbures

G

GES Gaz à effet de serre

GIEC Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (pour IPCC en anglais : Intergovernmental Panel on Climate Change)

GF Gaz fluorés

H

HC HydroCarbures

HCFC HydroChloroFluoroCarbures

HFC HydroFluoroCarbures

HFO HydroFluoroOléfines (HFC à bas PRG)

P

PRG Potentiel de Réchauffement Global (pour GWP en anglais, Global Warming Potential)

U

UE Union Européenne

UTCATF Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Forêt

11.5. Table des figures

Figure 1 - Répartition des émissions de GES en 2023 (Métropole & territoires d'Outre-mer compris dans l'Europe) ...	6
Figure 2 - Répartition sectorielle des gaz fluorés en 2023 (Métropole)	6
Figure 3 - Répartition sectorielle hors réfrigération et climatisation des gaz fluorés en 2023 (Métropole)	6
Figure 4 - Répartition des émissions de GES en CO ₂ équivalent en France (Métropole & territoires d'Outre-mer compris dans l'Europe). Source : Citepa, données Secten 2025.	7
Figure 5 - Evolution des émissions de gaz fluorés (HFC, PFC, SF ₆ , NF ₃) en France de 1990 à 2023, (France métropole et territoires d'Outre-mer inclus dans l'UE). Source : Citepa, rapport CNUCC 2025	7
Figure 6 - Evolution de la banque totale de fluides frigorigènes en France métropole	8
Figure 7 - Evolution de la banque de HFC par secteur en France métropole.....	9
Figure 8 - Répartition sectorielle de la banque de HFC (en tonnes) en France métropole	9
Figure 9 - Répartition sectorielle de la banque équivalente CO ₂ de HFC en France métropole.....	9
Figure 10 - Evolution des émissions de fluides frigorigènes en France métropole	10
Figure 11 - Evolution des émissions de HFC par secteur en France métropole.....	11
Figure 12 - Répartition sectorielle des émissions de HFC (en tonnes) en France métropole	11
Figure 13 - Evolution, en tonnes de CO ₂ équivalent (AR5), des émissions de fluides frigorigènes en France métropole	12
Figure 14 - Evolution, en tonnes de CO ₂ équivalent (AR5), des émissions de HFC par secteur en France métropole.	13
Figure 15 - Répartition sectorielle des émissions CO ₂ équivalentes (AR5) de HFC en France métropole.....	13
Figure 16 Banque de fluide dans le secteur du froid domestique	13
Figure 17 - Demande totale en fluides frigorigènes pour la France métropole	14
Figure 18 - Demande totale en HFC par secteur pour la France métropole	15
Figure 19 - Besoin en fluides frigorigènes pour la production d'équipements préchargés en France métropole	16
Figure 20 - Besoin HFC par secteur pour la production d'équipements préchargés en France métropole	16
Figure 21 - Besoin en fluides frigorigènes pour la charge d'équipements sur site	17
Figure 22 - Besoin en HFC par secteur pour la charge d'équipements sur site.....	17
Figure 23 Banque de fluide dans le secteur du froid domestique	17
Figure 24 - Evolution du besoin estimé pour la maintenance des installations sur le parc d'équipements en France	18
Figure 25 - Evolution du besoin estimé en HFC pour la maintenance des installations sur le parc d'équipements en France	18
Figure 26 - Evolution du besoin estimé pour le retrofit des installations en France.....	19
Figure 27 - Evolution du besoin estimé en HFC par secteur pour le retrofit des installations en France.....	19
Figure 28 - Comparaison de la demande totale calculée en HFC aux marchés déclarés au SNEFCCA.....	20
Figure 29 Comparaison de la demande calculée et du marché déclaré de R-410A.....	21
Figure 30 Comparaison de la demande calculée et du marché déclaré de R-407C	21
Figure 31 Comparaison de la demande calculée et du marché déclaré de R-134a	21
Figure 32 Comparaison de la demande calculée et du marché déclaré de R-404A.....	21
Figure 33 Comparaison des données sur la récupération en France métropole	22
Figure 34 Part des réfrigérants utilisés sur le marché des réfrigérateurs domestiques	26
Figure 35 Part des réfrigérants utilisés sur le marché des sèche-linges avec pompe à chaleur.....	27
Figure 36 Banque de fluide dans le secteur du froid domestique	29
Figure 37 Banque de fluide dans le secteur du froid domestique	29
Figure 38 Demande en fluides frigorigènes pour la production dans le secteur du froid domestique	30
Figure 39 Emissions totales du froid domestique	30
Figure 40 Emissions CO ₂ équivalentes du froid domestique (millions de tonnes)	31
Figure 41 Evolution de la surface des hypermarchés et des supermarchés en France	35
Figure 42 Ratios de charge surfacique en supermarchés et hypermarchés.....	36
Figure 43 Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les nouvelles installations des hypermarchés.....	37
Figure 44 Evolution des fluides frigorigènes utilisés en supermarchés.....	38
Figure 45 Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les petits commerces (groupes de condensation)	38
Figure 46 Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les petits commerces (groupes hermétiques).....	39

Figure 47 Taux d'émission à la maintenance - Froid commercial.....	41
Figure 48 Efficacité de récupération en fin de vie des équipements dans le secteur du froid commercial	41
Figure 49 Banque de fluide dans le secteur du froid commercial	42
Figure 50 Quantités totales mises sur le marché en France dans le secteur du froid commercial	43
Figure 51 Quantités nécessaires à la production d'équipements en France dans le secteur du froid commercial	44
Figure 52 Besoin en fluides frigorigènes pour la charge sur site des équipements neufs pour le secteur du froid commercial.....	44
Figure 53 Besoin en fluides frigorigènes pour la maintenance du parc d'installations dans le secteur du froid commercial.....	45
Figure 54 Besoin en fluides frigorigènes pour le retrofit d'installations dans le secteur du froid commercial	46
Figure 55 Emissions totales du froid commercial	47
Figure 56 Emissions CO ₂ équivalentes du froid commercial (millions de tonnes)	47
Figure 57 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les systèmes poulie courroie.....	52
Figure 58 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les systèmes semi-remorques	53
Figure 59 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les conteneurs frigorifiques (transport maritime).....	53
Figure 60 - Taux d'émissions à la maintenance – transports frigorifiques	55
Figure 61 - Banque de fluide dans le secteur du transport frigorifique	56
Figure 62 - Quantités nécessaires à la production dans le secteur du transport frigorifique.....	57
Figure 63 - Quantités nécessaires à la charge des équipements sur site pour le secteur du transport frigorifique.....	57
Figure 64 - Besoin pour la maintenance dans le secteur du transport frigorifique	58
Figure 65 - Emissions totales du transport frigorifique	58
Figure 66 - Emissions CO ₂ équivalentes du transport frigorifique (millions de tonnes)	59
Figure 67 Ratio de charge équivalent – Exemple de l'industrie laitière	63
Figure 68 Evolution des réfrigérants utilisés dans les installations neuves de l'industrie de la viande	64
Figure 69 - Taux d'émission à la maintenance - Froid industriel.....	66
Figure 70 - Banque de fluide dans le secteur du froid industriel	68
Figure 71 - Besoin en fluides frigorigènes pour les installations neuves du froid industriel.....	68
Figure 72 - Quantités nécessaires à la maintenance dans le secteur du froid industriel	69
Figure 73 - Besoin pour le retrofit dans le secteur du froid industriel	69
Figure 74 - Emissions totales du froid industriel	70
Figure 75 - Emissions CO ₂ équivalentes du froid industriel (millions de tonnes)	71
Figure 76 - Evolution des fluides frigorigènes utilisés par gamme de chillers	76
Figure 77 - Facteur d'émission à la charge des chillers (en %)	77
Figure 78 Facteur d'émission pendant la durée de vie – chillers (en %)	78
Figure 79 Taux d'émission à la maintenance – Chillers.....	78
Figure 80 Facteurs d'émission en fin de vie des chillers (en %)	79
Figure 81 - Banque de fluide dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau	79
Figure 82 Quantités nécessaires à la production des groupes refroidisseurs à eau (GRE) en France métropole.....	80
Figure 83 Besoin pour la maintenance dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE).....	80
Figure 84 Besoin pour le retrofit dans le secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE).....	81
Figure 85 Emissions totales du secteur des groupes refroidisseurs à eau (GRE).....	82
Figure 86 Emissions CO ₂ équivalentes des groupes refroidisseurs à eau (GRE) (millions de tonnes)	82
Figure 87 Evolution de la charge des systèmes splits centralisés	87
Figure 88 - Facteur d'émission à la charge (en %) des équipements de climatisation à air.....	90
Figure 89 - Facteur d'émission pendant la durée de vie – PAC air/air et climatisation fixe (en %)	90
Figure 90 - Taux d'émissions à la maintenance des équipements de climatisation à air de type split.....	91
Figure 91 - Efficacité de récupération en fin de vie (en %) des équipements de la climatisation et PAC à air.....	92
Figure 92 - Banque de fluide du secteur de la climatisation air/air.....	92
Figure 93 - Répartition sectorielle de la banque de la climatisation air/air	93
Figure 94 - Quantités nécessaires à la charge des équipements de la climatisation air/air	94
Figure 95 - Quantités nécessaires à la production dans le secteur de la climatisation air/air	94
Figure 96 - Quantités nécessaires à la maintenance dans le secteur de la climatisation air/air	95
Figure 97 - Quantités nécessaires à le retrofit dans le secteur de la climatisation air/air.....	95

Figure 98 - Emissions totales du secteur de la climatisation air/air.....	96
Figure 99 - Emissions CO ₂ équivalentes de la climatisation air/air (millions de tonnes).....	97
Figure 100 - Répartition sectorielle des émissions CO ₂ équivalentes de la climatisation air/air.....	97
Figure 101 - Facteur d'émission fugitif – pompes à chaleurs réversibles (en %).....	101
Figure 102 - Banque de fluide dans le secteur de la climatisation air/eau, eau/eau.....	102
Figure 103 Quantités requises à la production dans le secteur de la climatisation air/eau, eau/eau.....	103
Figure 104 Quantités nécessaires à la maintenance dans le secteur climatisation air/eau, eau/eau.....	103
Figure 105 Emissions totales du secteur de la climatisation air/eau, eau/eau.....	104
Figure 106 Emissions CO ₂ équivalentes du secteur de la climatisation air/eau, eau/eau (millions de tonnes).....	105
Figure 107 Evolution du taux de climatisation automobile en France métropole (en %).....	108
Figure 108 Facteur d'émission fugitif des véhicules (en %) en moyenne sur la flotte de véhicules.....	113
Figure 109 Facteurs d'émission à la maintenance des véhicules (en %).....	113
Figure 110 - Banque de fluide dans le secteur de la climatisation automobile.....	116
Figure 111 - Quantités nécessaires à la production dans le secteur de la climatisation mobile.....	116
Figure 112 - Quantités nécessaires à la maintenance dans le secteur de la climatisation automobile.....	117
Figure 113 - Emissions totales du secteur de la climatisation mobile.....	118
Figure 114 Emissions CO ₂ équivalentes de la climatisation automobile (millions de tonnes).....	118
Figure 115 – Quantités par type de fluide frigorigène à la banque par secteur.....	120
Figure 116 – Quantités par type de fluide frigorigène à la charge par secteur.....	121
Figure 117 – Quantités par type de fluide frigorigène à la production par secteur.....	122
Figure 118 – Quantités totales mises sur le marché par type de fluide frigorigène par secteur.....	123
Figure 119 – Quantités totales pour la maintenance par type de fluide frigorigène par secteur.....	124
Figure 120 – Quantités totales pour le retrofit par type de fluide frigorigène par secteur.....	125
Figure 121 – Emissions totales par type de fluide frigorigène par secteur en tonnes.....	126
Figure 122 – Emissions totales par type de fluide frigorigène par secteur en équivalent CO ₂	127
Figure 123 - Distribution des émissions de HFC en CO ₂ e du CRF 2F1 en 2023 (périmètre Kyoto).....	130
Figure 124 - Contribution des secteurs aux émissions de HFC en CO ₂ e de la catégorie CRF 2F1 en 2023 (périmètre Kyoto).....	130
Figure 125 - Les gaz à effet de serre.....	131
Figure 126 – Tables CRF (Common Reporting Format), mode de déclaration des émissions de HFC auprès de la CNUCC.....	132
Figure 127 - Principes de la méthode de calcul des émissions de fluides frigorigènes.....	137
Figure 128 – Exemple d'une courbe de durée de vie pour un équipement de durée de vie moyenne de 15 ans.....	138
Figure 129 – Exemple d'une courbe de durée de vie pour un équipement de durée de vie moyenne de 25 ans.....	138

11.6. Table des tableaux

Tableau 1 – Banque de fluide 2022	13
Tableau 2 – Banque de fluide 2022	17
Tableau 3 – Marchés d'équipements du secteur de froid domestique (nombre d'unités).....	25
Tableau 4 – Estimation des productions d'équipements du secteur de froid domestique.....	25
Tableau 5 – Hypothèses de charges nominales des équipements de froid domestiques.....	25
Tableau 6 – Durée de vie moyenne des équipements de froid domestiques.....	27
Tableau 7 – Facteur d'émission à la charge des équipements de froid domestique	28
Tableau 8 – Facteur d'émission fugitif des équipements de froid domestique	28
Tableau 9 – Facteur d'émission de fin de vie des équipements de froid domestique	28
Tableau 10 – Banque de fluide 2022	29
Tableau 11 – Catégories de magasin prises en compte dans les équipements des petits commerces	33
Tableau 12 – Modes de maintenance des équipements de froid commercial.....	34
Tableau 13 – Parcs de magasins.....	35
Tableau 14 – Charges moyennes en super et hypermarchés (kg/m ²)	36
Tableau 15 – Charges moyennes des équipements par type de petits commerces (kg).....	36
Tableau 16 – hypothèses de facteurs d'émission à la charge des équipements de froid commercial.....	39
Tableau 17 – Facteur d'émission fugitive des équipements de froid commercial	40
Tableau 18 – Hypothèses de facteurs d'émission fin de vie – secteur du froid commercial	42
Tableau 19 – prise en compte de la maintenance dans la méthode de calcul pour le transport frigorifique.....	49
Tableau 20 – Marchés des groupes frigorifiques pour le transport routier.....	50
Tableau 21 – Productions estimées des groupes frigorifiques pour le transport routier	51
Tableau 22 – Evolution des niveaux de charge nominale des équipements frigorifiques du transport routier (en kg)..	51
Tableau 23 – charges nominales des équipements frigorifiques du transport maritime (kg).....	51
Tableau 24 – Facteurs d'émissions à la charge pour le transport frigorifique	54
Tableau 25 – Facteurs d'émissions fugitives pour les applications du transport frigorifique	54
Tableau 26 – Facteurs d'émission en fin de vie des équipements du transport frigorifique.....	55
Tableau 27 – Répartition des surfaces d'entrepôts frigorifiques en France – Insee 2012	62
Tableau 28 – Ratios frigorifiques caractéristiques par application	63
Tableau 29 – Facteur d'émission à la charge des installations de froid industriel	65
Tableau 30 – Facteurs d'émissions fugitives par application du froid industriel	65
Tableau 31 – Facteurs d'émissions en fin de vie des équipements du froid industriel.....	67
Tableau 32 - Rythme de maintenance des Chillers	73
Tableau 33 - durée de vie moyenne des chillers	74
Tableau 34 – Ratios de charge par gamme de chillers en 2023	75
Tableau 35 – Fluides frigorigènes utilisés sur le marché des chillers en 2023	76
Tableau 36 - modes de charge des équipements de climatisation air/air	84
Tableau 37 - Modes de maintenance des équipements de climatisation air/air	85
Tableau 38 - Durées de vie moyenne des équipements de climatisation air/air	85
Tableau 39 – hypothèses de charge nominale constante par équipement de climatisation air/air	87
Tableau 40 – charges nominales des équipements de climatisation air/air	88
Tableau 41 – Fluides frigorigènes utilisés sur les marchés neufs des équipements de climatisation air/air.....	89
Tableau 42 – charges nominales des PAC en 2023	100
Tableau 43 – Fluides frigorigènes utilisés sur le marché neuf des PAC en 2023	100
Tableau 44 – hypothèses concernant les conditions de maintenance des systèmes de climatisation automobile..	107
Tableau 45 – Durées de vie moyennes par sous-secteur de la climatisation automobile	108
Tableau 46 – charges nominales des PAC en 2023	109
Tableau 47 – Facteurs d'émissions à la charge des systèmes de climatisations automobiles.....	111
Tableau 48 – Facteurs d'émissions fugitifs des systèmes de climatisations automobiles	112
Tableau 49 – Données GIEC sur les taux d'émission fugitifs en climatisation automobile.....	112
Tableau 50 – taux d'émission en fin de vie des véhicules automobiles.....	114

Tableau 51 – Quantités de fluides frigorigènes - BANQUE par secteur	120
Tableau 52 – Quantités de fluides frigorigènes - CHARGE SUR SITE par secteur	121
Tableau 53 – Quantités de fluides frigorigènes - PRODUCTION par secteur	122
Tableau 54 – Quantités totales de fluides frigorigènes mises sur le marché par secteur	123
Tableau 55 – Besoin en fluides frigorigènes pour la maintenance par secteur	124
Tableau 56 – Besoin en fluides frigorigènes pour le retrofit par secteur	125
Tableau 57 – EMISSIONS TOTALES de fluides frigorigènes par secteur en tonnes	126
Tableau 58 – EMISSIONS TOTALES de fluides frigorigènes par secteur en EQUIVALENT CO ₂	127
Tableau 59 – PRG des fluides frigorigènes pris en compte dans le calcul	129
Tableau 60 – Evolution des PRG des principaux CFC, HCFC et HFC utilisés en réfrigération et climatisation [Ref 5]	134
Tableau 61 – Structure de la base de données des secteurs du froid et de la climatisation	135
Tableau 62 – Données d'activité nécessaires par application et par an pour le calcul des émissions de réfrigérants	139

11.7. Références bibliographiques

Ref 1 – 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 2 - Lignes directrices du GIEC 2006 & Raffinements 2019 (Chapter 7: Emissions of Fluorinated Substitutes for Ozone Depleting Substances)

Ref 3 - Thèse Sabine Saba, MINES-ParisTech, 2009 Global inventories and direct emissions estimation of greenhouse gases of the refrigeration systems

Ref 4 - RTOC 2018 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 5 – 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 6 - Gifam (Groupement des marques d’appareils pour la maison).
<https://www.gifam.fr/accueil/gem/refrigerateur/#chiffres-cls>

Ref 7 - 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 8 - WHIRLPOOL - Communication interne

Ref 9 - Revue spécialisée Entreprendre - "Cave à vin : EuroCave leader mondial... et 100 % made in France" - 29/10/2014

Ref 10 - Eurocave - Communication interne

Ref 11 - Enquête terrain Citepa - fluide frigorigène équipements domestiques

Ref 12 - Lignes directrices du GIEC 2006 – Volume 3 – Chapitre 7 – Tableaux 7.9

Ref 13 - ADEME - Rapports annuels Equipement Electriques et Electroniques

Ref 14 - Nielsen - Retour sur 40 ans de distribution française

Ref 15 - INSEE - Les points de vente du commerce de détail 1982 à 1992

Ref 16 - INSEE - Base de données : évolution du commerce 1992 - 2004

Ref 17 - INSEE - Base de données : hyper super 2004 à 2009

Ref 18 - INSEE - Enquête d'établissement dans le commerce 1980

Ref 19 - ACOSS - Les dénombremments annuels selon la NAF 732

Ref 20 - LSA - Communication de Dominique Amar pour le Citepa.

Ref 21 - Perifem - Communication interne

Ref 22 - European Partnership for Energy and the Environment - Communication interne

Ref 23 - RTOC 1998 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 24 - Lignes directrices du GIEC 1996 - Volume 3 - Chapitre 2.17

Ref 25 - 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 26 - Fédération Française de Carrosserie (FFC) - Communication interne

Ref 27 - Container Handbook

Ref 28 - Petit Forestier - Communication interne

Ref 29 - RTOC 2002 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 30 - Annuaire du Syndicat National des patinoires,
<https://www.syndicatdespatinoires.com/annuaire/>

Ref 31 - FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), statistics Division,
<http://www.fao.org/faostat/fr/#home>

Ref 32 - Informations d'experts - Daikin et Denis Clodic

Ref 33 - Uniclima - extractions annuelles de données internes

Ref 34 - AFPAC - La Pompe à Chaleur : De nos ambitions 2030 à nos perspectives 2050 - Mars 2018

Ref 35 - CCFA - Rapports annuels Analyse statistiques

Ref 36 - PSA - Communication interne

Ref 37 - Renault - Communication interne

Ref 38 - Scania - Communication interne

Ref 39 - Iveco - Communication interne

Ref 40 - CGDD - Chiffres clés du transport - Edition 2019

Ref 41 - RATP - Communication interne

Ref 42 - Base Behr Hella Service - Quantité de remplissage d'huile et réfrigérant VL/VUL/PL

Ref 43 - NRF - Airconditioning Filling Chart - R134a/R1234yf

Ref 44 - RTOC 2014 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 45 - RTOC 1998 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 46 - Renault - Communication interne

Ref 47 - RTOC 2010 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee

Ref 48 - ADEME - Rapports annuels Automobile (VHU)

Ref 49 - Rapport d'inventaire AFCE / Citepa, 2022. Inventaire des émissions de fluides frigorigènes pour la France métropole. Résultats 2020 et estimation provisoire 2021.

Ref 50 – Entretien avec M.Doucet SYNEG (Union des fabricants d'équipements et d'ustensiles pour la restauration et les arts culinaires), Avril 2023 et Mai 2024.

Ref 51 – Interview Marie-Line Moutel-Hornung, groupe Serap, novembre 2022.

Ref 52 – Communications de Jean-Michel Carré, Lennox, pour le Citepa.

Ref 53 – Interview de Laurent Guegan, ADC3R, Juin 2024.

Ref 54 – Communication du Gifam pour le Citepa, Émilie PIN, Responsable Statistiques et Etudes, Novembre 2023, sur la base de données GfK Market Intelligence.



Le Citepa est une association qui guide les acteurs de la transition écologique en France et dans le monde.

Elle évalue l'impact des activités humaines sur le climat et la pollution atmosphérique. Elle produit des données de référence et développe des solutions pour favoriser la réduction des émissions, l'amélioration de la qualité de l'air et l'adaptation au changement climatique.

Notre équipe pluridisciplinaire participe à la construction d'un monde durable.

Citepa
Guider l'action
Air & Climat

Crédits photo : @Citepa
/ Peter Gunar
/ FluoroTech