



Rapport **OMINEA** | Consommation d'halocarbures et SF₆ Ed. 2026

Organisation et méthodes des
inventaires nationaux des émissions
atmosphériques en France

Rapport **OMINEA** | Consommation d'halocarbures et SF₆ Ed. 2026

Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France

Avril 2026

Rédaction	
Contributeurs	Stéphanie BARRAULT, Lisa GRELLIER

Coordination, Vérification et Approbation finale		
Coordination et Vérification	Corentin VANCAYSEELE, Ingénieur d'études	11/02/2026
Approbation finale	Etienne MATHIAS, Responsable Division Inventaires	29/04/2026

Pour citer ce document :

Citepa, 2026. Rapport OMINEA | Consommation d'halocarbures et SF₆ – 23^{ème} édition

© Citepa 2026

Ce Rapport a été réalisé avec la participation financière du Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche (MTBFMT).

Cette édition annule et remplace toutes les éditions antérieures relatives au même format d'inventaire.

Rapport n°2731omi/ 2026 | 2F. Consommation d'halocarbures et SF6.docx

Ce rapport national d'inventaire est disponible sur le site Internet du Citepa, à la page suivante :

<https://www.citepa.org/methodologie-de-linventaire-omine/>

@ Citepa

42, rue de Paradis – 75010 PARIS – Tel. 01 44 83 68 83 – Fax 01 40 22 04 83

www.citepa.org | contact@citepa.org



Sommaire

Table des illustrations	3
Table des tableaux	4
Préambule	5
Consommation de gaz fluorés Introduction	6
Réfrigération et climatisation	7
Agents d'expansion des mousses	69
Extincteurs d'incendie.....	73
Aérosols.....	75
Solvants.....	78
Crédit des illustrations	80

Table des illustrations

Figure 1 : Extrait des lignes directrices du GIEC 2006.....	11
Figure 2 : Principes de la méthode de calcul des émissions de fluides frigorigènes	12
Figure 3 : Emissions à la charge selon (GIEC, 2006)	12
Figure 4 : Calcul des émissions à la charge	13
Figure 5 : Emissions au cours de la durée de vie selon (GIEC, 2006)	14
Figure 6 : Exemple de courbe de durée de vie pour un millésime d'équipements de durée de vie moyenne de 15 ans mis sur le marché en 2000.	15
Figure 7 : Emissions de fin de vie selon (GIEC, 2006)	17
Figure 8 : Emissions dues à la gestion des conteneurs selon (GIEC, 2006)	18
Figure 9 : Courbe de fin de vie cars et bus (durée de vie de 15 ans)	25
Figure 10 : Evolution du taux de climatisation automobile en France hexagonale (en %)	26
Figure 11 : Charge moyenne de réfrigérant par véhicule (en kg)	27
Figure 12 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les systèmes de climatisation des véhicules particuliers et utilitaires légers mis sur le marché	29
Figure 13 : Facteur d'émission pendant la durée de vie des véhicules (en %)	31
Figure 14 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les véhicules frigorifiques utilitaires	36
Figure 15 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les camions frigorifiques semi-remorques	36
Figure 16 : Ratio de charge équivalent – Exemple de l'industrie laitière et de l'industrie de la viande	41
Figure 17 : Répartition des fluides frigorigènes utilisés en agroalimentaire – exemple de l'industrie du lait	42
Figure 18 – Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les systèmes splits	52
Figure 19 – Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les chillers de type volumétrique de moyenne puissance	53
Figure 20 – Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les pompes à chaleur air/eau	54
Figure 21 : Facteur d'émission à la charge (en %)	55
Figure 22 : Facteur d'émission pendant la durée de vie – climatisation fixe (en %)	56
Figure 23 : Facteur d'émission pendant la durée de vie – chillers (en %).....	56
Figure 24 : Facteur d'émission pendant la durée de vie – pompe à chaleur (en %)	57
Figure 25 : Efficacité de récupération (en %)	59
Figure 26 : Hypothèses d'évolution des ratios de charge surfaciques en super et hypermarchés	62
Figure 27 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés en hypermarchés	63
Figure 28 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés en supermarchés	64
Figure 29 : Evolution des facteurs d'émissions fugitives en froid commercial.....	65
Figure 30 : Facteurs d'émissions en fin de vie des équipements du froid commercial.....	66

Figure 31 : Logigramme du processus d'estimation des émissions..... 77

Table des tableaux

Tableau 1 : Table des modes de charge	14
Tableau 2 : Données d'activité pour le calcul des émissions de réfrigérants	18
Tableau 3 : Marchés et productions d'équipements de froid domestique	20
Tableau 4 : Caractéristiques de charge nominale des équipements	22
Tableau 5 : Facteurs d'émissions à la charge des équipements	23
Tableau 6 : Facteur d'émission au cours de la durée de vie des équipements de froid domestique	23
Tableau 7 : Facteur d'émission en fin de vie des équipements	24
Tableau 8 : Hypothèses prises en compte dans le calcul des émissions fugitives.....	24
Tableau 9 : Hypothèses de durée de vie des systèmes de climatisation des équipements	24
Tableau 10 : Marchés et productions d'équipements de climatisation automobile.....	25
Tableau 11 : Charge nominale des systèmes de climatisation	27
Tableau 12 : Facteurs d'émissions à la charge des systèmes de climatisation	29
Tableau 13 : Facteurs d'émissions au cours de la durée de vie des véhicules	30
Tableau 14 : Facteurs d'émission fugitifs des climatisations de véhicules automobiles.....	30
Tableau 15 : Facteur d'émission en fin de vie des équipements	31
Tableau 16 : Hypothèses liées à la maintenance dans le transport frigorifique, par type d'équipement	33
Tableau 17 : Marchés et productions d'équipement du transport frigorifique	34
Tableau 18 : Evolution des niveaux moyens de charge nominale du transport frigorifique routier (en kg).....	35
Tableau 19 : Evolution des niveaux moyens de charge nominale du transport frigorifique maritime.....	35
Tableau 20 : Facteurs d'émissions à la charge des équipements de transport frigorifique	37
Tableau 21 : Facteurs d'émissions au cours de la durée de vie des équipements de transport frigorifique	37
Tableau 22 : Facteurs d'émissions en fin de vie des équipements de transport frigorifique	38
Tableau 23 : Répartition des surfaces d'entrepôts frigorifiques en France – Insee 2012	39
Tableau 24 : Ratios caractéristiques des procédés de froid industriel.....	40
Tableau 25 : Facteur d'émission à la charge des installations de froid industriel	42
Tableau 26 : Facteurs d'émission lors de la durée de vie des installations de froid industriel	42
Tableau 27 : Facteurs d'émission lors du démantèlement des installations de froid industriel.....	43
Tableau 28 : Récapitulatif des modes de charge des équipements de la climatisation stationnaire	45
Tableau 29 : Récapitulatif des modes de maintenance des équipements de la climatisation stationnaire	45
Tableau 30 : Durées de vie moyennes des équipements de la climatisation stationnaire	46
Tableau 31 : Récapitulatif des modes de charge des équipements de la climatisation à air	48
Tableau 32 : Modes de charge des chillers.....	49
Tableau 33 : Modes de charge des pompes à chaleur résidentielles	49
Tableau 34 : Niveaux de charge moyenne (kg) des équipements de climatisation stationnaire en 2024	50
Tableau 35 : Gammes de puissance des équipements de la climatisation stationnaire (en kW)	50
Tableau 36 – principaux fluides frigorigènes utilisés sur le marché neufs des équipements en 2024.....	52
Tableau 37 – Application des modèles de facteurs d'émission par type d'équipement	58
Tableau 38 : Groupes de petits commerces par niveau de charge de réfrigérant	60
Tableau 39 : Modes de maintenance des installations de froid commercial.....	60
Tableau 40 – Ratios de charge surfaciques pour les sous-secteurs des supermarchés et hypermarchés.....	62
Tableau 41 – Charges moyennes par type de magasin pour les petits commerces	62
Tableau 42 : Répartition des HFC en fonction de leurs secteurs d'application	70

Préambule

Le rapport OMINEA comprend une description détaillée, par secteur émetteur, des méthodologies utilisées pour estimer les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques (approche utilisée, données sources, hypothèses, facteurs d'émissions, etc.).

Le présent document s'attache à décrire les méthodologies utilisées pour estimer les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques du secteur **Consommation d'halocarbures et SF₆**.

En parallèle, les méthodologies détaillées des autres secteurs sont disponibles sur le site internet du Citepa. Les volumes sont structurés commme suit :

- OMINEA. Parties générales
- OMINEA. Énergie. Éléments généraux
- OMINEA. Industrie de l'énergie
- OMINEA. Industrie manufacturière
- OMINEA. Transports
- OMINEA. Autres secteurs
- OMINEA. Non spécifiés
- OMINEA. Émissions fugitives des combustibles
- OMINEA. Produits minéraux
- OMINEA. Chimie
- OMINEA. Métallurgie
- OMINEA. Produits non énergétiques des carburants et de l'utilisation de solvants
- OMINEA. Industrie électronique
- OMINEA. Consommation d'halocarbures et SF₆
- OMINEA. Autres usages et fabrication de produits
- OMINEA. Autres procédés
- OMINEA. Agriculture
- OMINEA. Déchets
- OMINEA. UTCATF
- OMINEA. Autres
- OMINEA. Références & Annexes

Toutes les références et annexes citées dans le présent document font références au document OMINEA. Références & Annexes évoqué ci-dessus. **Il est conseillé de télécharger ce document en parallèle dans le cadre d'une consultation du présent guide méthodologique.**



Consommation de gaz fluorés |

Introduction

Cette section couvre les émissions de HFC liées à l'utilisation de ces substances comme produits à part entière.

A la suite de l'interdiction des CFC par le Protocole de Montréal depuis 1994, les HFC ont été utilisés en substituts des CFC et des HCFC. Ainsi, ils sont utilisés dans la majeure partie des secteurs industriels, commerciaux et résidentiels, à savoir les secteurs de la réfrigération et de l'air conditionné, dans certains aérosols, dans la fabrication des mousses, comme solvants de nettoyage et dégraissage et dans certains extincteurs.

En 2014, le règlement CE n° 517/2014 du 16/04/2014 relatif au gaz à effet de serre fluorés imposait une réduction progressive (phasedown) des quantités CO₂ équivalentes de HFC mises sur le marché européen de 2015 à 2030 et interdisait la mise sur le marché de certains produits et équipements contenant des gaz fluorés au-delà d'un certain PRG, selon un certain calendrier. Ce règlement a été révisé et remplacé par le règlement UE 2024/573 du 7 février 2024, plus restrictif, qui accélère le phasedown et l'étend jusqu'à une interdiction complète de mise sur le marché des HFC à l'horizon 2050.

Rédaction : **Stéphanie BARRAULT**, **Lisa GRELLIER**

Date de mise à jour	Responsable	Date de validation	Vérificateur
09/02/2026	SB	07/03/2025	BC

Réfrigération et climatisation

Le Citepa a développé un outil dédié au calcul des émissions de réfrigérants. Il permet un calcul détaillé des émissions au cours de la vie des équipements pour toutes les applications du froid et de la climatisation. L'outil de calcul développé est couplé à des bases de données par territoire regroupant l'ensemble des hypothèses permettant de reconstituer les données d'activité et facteurs d'émissions par sous-secteur. En 2023, cet outil a été transposé en version web. Ce nouveau développement a été l'occasion d'améliorer quelques fonctionnalités, notamment de vérification des hypothèses (amélioration QAQC : vérification de l'exhaustivité des années, de complétude des données entrées sur l'historique, des répartitions de fluides frigorigènes utilisés de façon que la somme soit bien à 100%, visualisation graphique des hypothèses et des résultats par sous-secteur, etc.).

Les HFC sont utilisés comme fluides frigorigènes dans différents types d'équipements de réfrigération et de climatisation. En se basant sur la structuration proposée dans le rapport RTOC 2018 de l'UN Environment et sur la structuration des données disponibles en France, le calcul est décomposé selon huit grands secteurs d'équipements :

1. Les applications domestiques,
2. La réfrigération commerciale,
3. Les transports frigorifiques,
4. Le froid industriel,
5. La climatisation fixe et le chauffage,
6. Les groupes refroidisseurs à eau,
7. Les pompes à chaleur résidentielles,
8. Et la climatisation embarquée.

Ces huit grands secteurs sont décomposés en 40 sous-secteurs d'équipements. Une base de données regroupe l'ensemble des données d'activité et facteurs d'émission par sous-secteur pour la France hexagonale. Les hypothèses sont détaillées dans ce rapport.

Correspondance dans divers référentiels

CCNUCC / CRT	2.F.1
CEE-NU / NFR	Hors champs
SNAPc (extension CITEAP)	06.05.02
CE / directive IED	Hors champs
CE / E-PRTR	Hors champs
CE / directive GIC	Hors champs

Approche méthodologique

Activité	Facteurs d'émission
Marchés et productions d'équipements par sous-secteur Evolution des fluides frigorigènes utilisés Ratios de charge (kg/kW) ou charges moyennes Durée de vie	Spécifiques, déterminés à partir d'enquêtes de terrain, d'informations données par les filières de traitement et avis d'experts sectoriels.

Niveau de méthode

Rang 2a.

Références utilisées

- [207] Centre Efficacité énergétique des Systèmes de l'Ecole des Mines de Paris – Inventaire annuel des émissions des fluides frigorigènes en France jusqu'en 2016
- [1090] GIFAM - Chiffres clés annuels par équipement
- [1091] WHIRLPOOL - Communication interne
- [1092] Eurocave - Communication interne
- [1093] Enquête terrain Citepa - fluide frigorigène équipements domestiques
- [1094] Revue spécialisée Entreprendre - "Cave à vin : EuroCave leader mondial... et 100 % made in France" - 29/10/2014
- [1095] Lignes directrices du GIEC 2006 – Volume 3 – Chapitre 7 – Tableaux 7.9
- [1096] ADEME - Rapports annuels Equipement Electriques et Electroniques
- [1097] CCFA - Rapports annuels Analyse statistiques
- [1098] PSA - Communication interne
- [1099] Renault - Communication interne
- [1100] Scania - Communication interne
- [1101] Iveco - Communication interne
- [1102] CGDD - Chiffres clés du transport - Edition 2019
- [1103] RATP - Communication interne
- [1104] Base Behr Hella Service - Quantité de remplissage d'huile et réfrigérant VL/VUL/PL
- [1105] NRF - Airconditioning Filling Chart - R134a/R1234yf
- [1106] RTOC 2014 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee
- [1107] RTOC 1998 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee
- [1108] RTOC 2010 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee
- [1109] RTOC 2006 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee
- [1110] ADEME - Rapports annuels Automobile (VHU)
- [1113] Fédération Française de Carrosserie (FFC) - Communication interne
- [1114] Petit Forestier - Communication interne
- [1115] Container Handbook
- [1116] European Partnership for Energy and the Environment - Communication interne
- [1117] RTOC 2002 - Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee
- [1118] Lignes directrices du GIEC 1996 - Volume 3 - Chapitre 2.17

- [1119] Nielsen - Retour sur 40 ans de distribution française
- [1120] INSEE - Les points de vente du commerce de détail 1982 à 1992
- [1121] INSEE - Base de données : évolution du commerce 1992 - 2004
- [1122] INSEE - Base de données : hyper super 2004 à 2009
- [1123] INSEE - Enquête d'établissement dans le commerce 1980
- [1124] ACOSS - Les dénombremments annuels selon la NAF 732
- [1125] LSA - Communication interne
- [1126] Perifem - Communication interne
- [1127] Mines ParisTech - La F-GasII et son impact sur les émissions de fluides frigorigènes en France à l'Horizon 2035 - S. Barrault, M. NEMER
- [1129] Uniclimate - extractions annuelles de données internes
- [1130] Informations d'experts - Daikin et Denis Clodic
- [1131] AFPAC - La Pompe à Chaleur : De nos ambitions 2030 à nos perspectives 2050 - Mars 2018
- [1151] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), statistics Division, [FAOSTAT](#), nov 2026.
- [1152] Annuaire du Syndicat National des patinoires [Syndicat National des Patinoires](#), nov 2026.
- [1153] Global inventories and direct emission estimations of greenhouse gases of refrigeration systems, Sabine Saba, Ph. D; Thesis MINES-ParisTech December 2009
- [1154] ADEME, Rapport annuel de l'Observatoire des fluides frigorigènes et gaz fluorés
- [1402] Rapport AFCE Fluides frigorigènes - Septembre 2025 - Inventaire des émissions de fluides frigorigènes pour la France métropole - AFCE (Alliance Froid Climatisation Environnement) <https://www.afce.asso.fr/rapport-septembre-2025-fluides-frigorigenes/>
- [1403] Rapport National d'Inventaire 2020, section 2F1, transports frigorifiques. La méthode de reconstitution de l'évolution des fluides frigorigènes dans le transport ferroviaire y est détaillée.
- [1404] Marine Traffic <https://www.kpler.com/product/maritime/container-intelligence#terminal>
- [1405] Rapport du Technical Option Committee 2002 de l'UNEP (<https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-05/RTOC2002.pdf>)
- [1406] Les entrepôts et leur activité. Chiffres & statistiques Commissariat général au Développement durable N°334 juillet 2012 <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/media/1430/download?inline>
- [1407] Logistique | Données et études statistiques
- [1408] Entrepôts frigorifiques : entre obsolescence et opportunités d'investissement <https://www.arthur-loyd.com/actualites/entrepots-frigorifiques-entre-obsolescence-et-opportunites-d-investissement>
- [1409] USNEF Union Syndicale Nationale des Exploitations Frigorifiques
- [1410] Communication confidentielle de Jérôme Maldodano, Uniclimate, pour le Citepa
- [1411] Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre - Chapitre 7 - ÉMISSIONS DE SUBSTITUTS FLUORÉS DE SUBSTANCES APPAUVRISSENT L'OZONE - Tableau 7.9
- [1412] Inventaire des émissions de HFC en Nouvelle Calédonie pour les secteurs du froid et de la climatisation. Rapport Citepa pour la DIMENC. 2023

[1413] Immatriculations des véhicules particuliers et utilitaires légers dans les territoires d'outre-mer dans l'UE. Données du CCFA (Comité des Constructeurs Français Automobiles) [CCFA-2025-FR-45.pdf](#).

Caractéristiques de la catégorie

Quatre sources d'émissions sont à considérer :

1. Les émissions à la charge des équipements,
2. Les émissions pendant la durée de vie des équipements,
3. Les émissions en fin de vie des équipements, lors de leur démantèlement,
4. Les émissions liées à la gestion de conteneurs de fluides frigorigènes utilisés pour la charge ou la maintenance des équipements.

Tous les fluides frigorigènes utilisés par sous-secteur sont pris en compte. Une fois les émissions calculées par fluide d'usage (ou fluide commercial), elles sont décomposées par fluide primaire (HFC-32, HFC-125, HFC-134a, HFC-143a, HFC-152a et, dans certains cas, HFO, hydrocarbures (HC) ou CO₂), en tenant compte de la composition exacte des mélanges.

Au cours du temps, plusieurs familles réfrigérants ont été successivement utilisées dans les équipements de climatisation et réfrigération, notamment du fait de la réglementation : les substances appauvrissant la couche d'ozone (CFC et HCFC) ont été progressivement remplacées par les HFC. Ces derniers ayant des valeurs de PRG élevées, ils sont progressivement remplacés par les HFO (HFC à bas PRG) ou par d'autres fluides frigorigènes non fluorés ayant un plus faible impact sur le climat.

Méthode d'estimation des émissions de gaz à effet de serre (NID) :

Emissions de Gaz fluorés

La méthode de calcul des émissions de HFC développée par le Citepa est basée sur les recommandations du GIEC, l'approche adoptée par les CES de MINES-ParisTech [207] et des travaux de thèse tels que [1153].

Rappel des principes de l'Approche de niveau 2a

Dans le cas des réfrigérants, si les informations nécessaires sont disponibles (données par sous-application et facteurs d'émission spécifiques), les lignes directrices du GIEC recommandent d'utiliser, pour la réalisation des inventaires d'émissions de gaz à effet de serre, une approche de Niveau 2a, approche détaillée, par facteur d'émission. Cette méthode reconstitue la banque¹ de fluides frigorigènes par application, elle 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.

¹ La banque de fluides frigorigènes correspond aux quantités de fluides frigorigènes contenues dans les équipements formant le parc d'installations.

Figure 1 : Extrait des lignes directrices du GIEC 2006

<p>Aperçu des lignes directrices</p> <p>La méthodologie de Niveau 2a :</p> <p>Prend en compte l'élimination ou la diminution progressive des CFC et des HCFC dans le calendrier du Protocole de Montréal ou dans les réglementations nationales ou régionales, afin d'établir le choix fluide frigorigène pour toutes les applications ;</p> <p>Définit la charge générale de fluide frigorigène et la durée de vie de l'équipement par sous application ;</p> <p>Définit les facteurs d'émission pour la charge de fluide frigorigène, pendant le fonctionnement, la maintenance et la fin de vie.</p> <p>Pour calculer les émissions au cours de la durée de vie de l'équipement, il est nécessaire de dériver le stock total de l'équipement indépendamment de leur année. En faisant cela, la banque de réfrigération est établie par sous application.</p> <p>Afin d'obtenir une cohérence, il est suggéré de calculer le marché annuel des fluides frigorigènes à partir des quantités de fluides frigorigènes chargés dans l'équipement neuf et des quantités de fluides frigorigènes utilisés pour la maintenance du stock total d'équipements.</p>
--

Pour prendre en compte toutes les émissions de fluides frigorigènes au cours de la vie des équipements, il est alors recommandé 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 lors la maintenance des équipements, incluant les pertes accidentelles ($E_{duree-de-vie}$) ;
- des émissions de fin de vie, lors de la mise au rebut de l'équipement ($E_{fin-de-vie}$) ;
- des émissions liées à la gestion des conteneurs de fluides frigorigènes, notamment aux talons de charge résiduels ($E_{conteneurs}$).

$$Emissions_{totales} = Emissions_{charge} + Emissions_{duree\ de\ vie} + Emissions_{fin\ de\ vie} + Emissions_{conteneurs} \quad (1.2F1)$$

Les lignes directrices ne mentionnent pas les émissions liées aux retrofits² d'installations, qui peuvent être incluses dans les émissions au cours de la durée de vie.

Dans l'approche Tier2a, les facteurs d'émission sont appliqués aux données d'activité. Leur estimation peut se faire de différentes façons, selon les données disponibles et être spécifiques. Le GIEC met à disposition des gammes de facteurs d'émission.

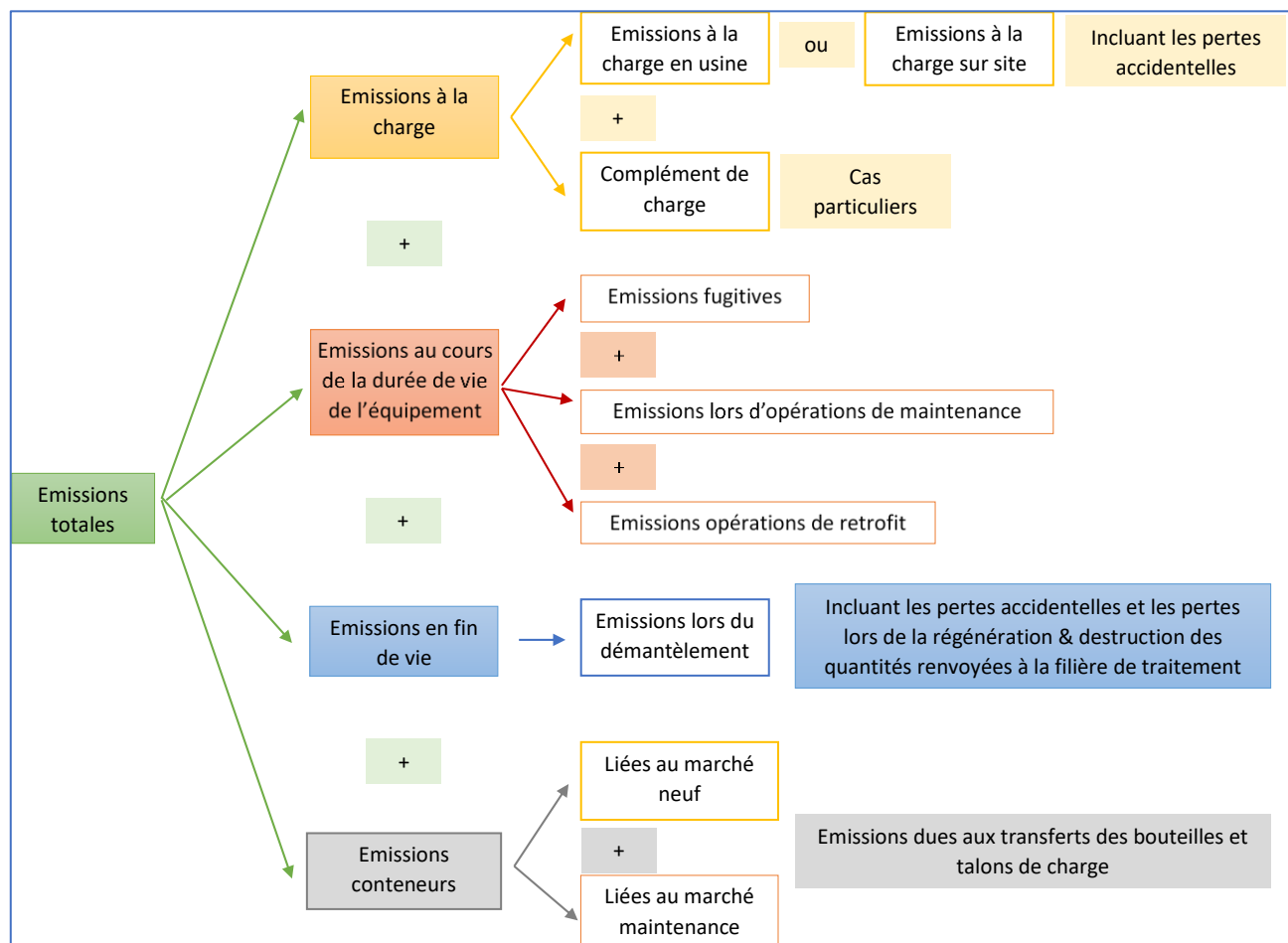
Mise en œuvre de l'approche de niveau 2a

La figure suivante présente la méthode de calcul mise en œuvre, à partir des recommandations du GIEC. Toutes les émissions au cours de la vie de l'équipement sont prises en compte. Les émissions sont calculées à partir :

- de paramètres permettant d'évaluer la donnée d'activité : statistique de parc, marché ou équipement, fluides frigorigènes, caractéristiques techniques (puissance frigorifiques, ratios de charge, etc.) ;
- et d'un facteur d'émission. Dans le cadre de notre approche, les facteurs d'émission sont établis par enquête de terrain auprès de fabricants de matériels, de personnels chargés de la maintenance des installations, par consultation des quantités consommées pour la maintenance des équipements ou basés sur des avis d'experts. Les hypothèses retenues ont été comparées aux gammes de variations sectorielles fournies par les rapports du GIEC.

² Un retrofit est une conversion d'un équipement utilisant un fluide frigorigène vers un autre fluide frigorigène, pour des raisons essentiellement liées à la réglementation, tout en conservant le même équipement.

Figure 2 : Principes de la méthode de calcul des émissions de fluides frigorigènes



Dans le cadre de notre approche, les différents types d'émissions ont été analysés et calculés en fonction de la réalité du terrain : lieux de charges, types d'opérations se produisant au cours de la vie des équipements, mise en œuvre des obligations réglementaires, efficacité des filières de fin de vie.

Emissions à la charge

Les émissions à la charge correspondent aux pertes lors de la manipulation du fluide frigorigène au moment de la charge de l'équipement. Les lignes directrices recommandent de les calculer relativement aux **quantités de fluides frigorigènes chargées dans les équipements neufs et d'un facteur d'émission par sous-secteur**.

Figure 3 : Emissions à la charge selon (GIEC, 2006)

EQUATION 7.12
SOURCES OF EMISSIONS WHEN CHARGING NEW EQUIPMENT

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

Where:

$E_{charge, t}$ = emissions during system manufacture/assembly in year t , kg

M_t = amount of HFC charged into new equipment in year t (per sub-application), kg

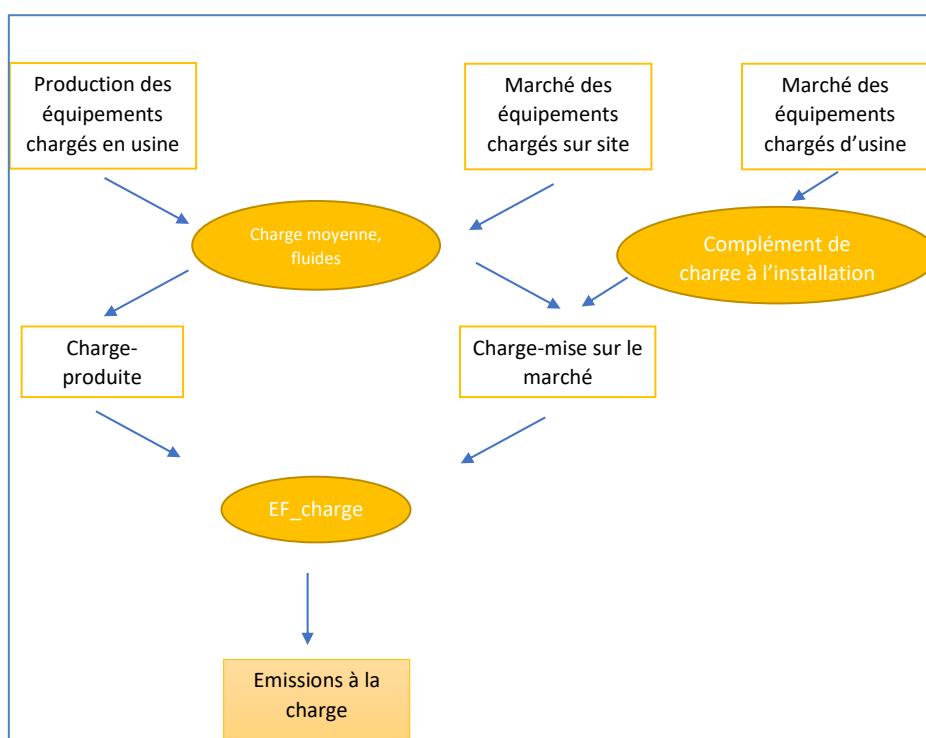
k = emission factor of assembly losses of the HFC charged into new equipment (per sub-application), percent

Etant donné que celles-ci dépendent des lieux de charge de chaque équipement, il est pris en compte que :

- Si les équipements sont chargés en usine (ex : climatisation de type split), les émissions à la charge sont liées aux quantités d'équipements produites. La donnée d'activité (*Charge-produite*) est alors fonction de la production nationale d'équipements, de la charge moyenne et des fluides frigorigènes utilisés.
- Si les équipements sont chargés au moment de leur installation (ex : supermarché), soit « chargés sur site », les émissions à la charge sont liées aux quantités d'équipements installés, soit mis sur le marché. La donnée d'activité (*charge-mise-sur-le-marché*) est alors fonction du marché national d'équipements, de la charge moyenne et des fluides frigorigènes utilisés.
- Dans certains cas particuliers, les équipements sont chargés d'usine et un complément de charge a lieu au moment de l'installation.

Le facteur d'émission (*EF_charge*) est plus faible pour les équipements chargés d'usine que pour les équipements chargés sur site pour lesquels une intervention manuelle est nécessaire.

Figure 4 : Calcul des émissions à la charge



Le modèle de calcul prend en compte ces trois possibilités : pour chaque sous-secteur doit être précisé, dans un tableau des modes de charge, le lieu de charge et la part du complément de charge rapportée à la charge initiale, le cas échéant. La charge de réfrigérant dans les équipements constitue notamment une donnée essentielle car elle impacte à la fois les quantités mises sur le marché et les quantités totales de réfrigérants présents dans le parc français (banque).

$$E_{charge_{i,j}} = EF_{charge_i} \times [A_k \times Charge_{produite_{i,j}} + [(1 - A_k) + A_k \times B_k] \times Charge_{mise\ sur\ le\ marché_{i,j}}] \quad (2.2F1)$$

Avec :

- *EF_charge* : Facteur d'Emission à la charge
- $Charge_{produite}(i,j) = Equipment_production(i) \times Refrigerant_production_share(i,j) \times Average_charge(i,j)$ (3.2F1)
- $Charge_{mise-sur-marché}(i,j,k) = Equipment_market(i,k) \times Refrigerant_market_share(i,j,k) \times Average_charge(i,j,k)$ (4.2F1)
- *i* : année, *j* : fluide frigorigène, *k* : sous-secteur
- *Equipment_Refrigerant_market/production_share* : part des fluides frigorigènes utilisés sur le marché/en production
- *Equipment_production/market* : nombre d'équipements produits/mis sur le marché par an et sous-secteur
- *Average_charge* : charge nominale moyenne équipements d'un sous-secteur mis sur le marché ou produits l'année *i*

Les données d'activité *charge_produite* et *charge_marché* sont obtenues à partir de données statistiques sur respectivement les productions (*Equipment_production*) et marchés d'équipements (*Equipment_market*), les parts des différents fluides frigorigènes utilisés par le sous-secteur (*Refrigerant_production_share*) et la charge moyenne (*Average_charge*) des équipements ; celle-ci peut être obtenue de différentes façons, le plus souvent à partir d'un ratio de charge (kg/kW) pouvant lui-même dépendre du fluide frigorigène utilisé et d'une puissance frigorifique moyenne. Les lieux de charge sont définis, par sous-secteur, tel que dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Table des modes de charge

Nom du sous-secteur k	Chargé en usine A _k	Complément de charge sur site (En %) : ne concerne que les équipements chargés d'usine. B _k
	Oui = 1 (charge usine) Non = 0 (charge sur site)	0 pas de complément X% => le complément de charge correspond à X% de la charge initiale

Emissions au cours de la durée de vie

La formule donnée par les lignes directrices pour les émissions de durée de vie englobe à la fois les émissions fugitives et les émissions liées à la maintenance, sans considérer les cas de retrofits d'installation. Il est recommandé de calculer la banque de réfrigérants correspondant à l'ensemble des installations d'un sous-secteur.

Figure 5 : Emissions au cours de la durée de vie selon (GIEC, 2006)

EQUATION 7.13
SOURCES OF EMISSIONS DURING EQUIPMENT LIFETIME

$$E_{lifetime,t} = B_t \cdot \frac{x}{100}$$

Where:

$E_{lifetime,t}$ = amount of HFC emitted during system operation in year t , kg

B_t = amount of HFC banked in existing systems in year t (per sub-application), kg

x = annual emission rate (i.e., emission factor) of HFC of each sub-application bank during operation, accounting for average annual leakage and average annual emissions during servicing, percent

In calculating the refrigerant bank (B_t) all systems in operation in the country (produced domestically and imported) have to be considered on a sub-application by sub-application basis.

La banque correspond aux quantités de fluides frigorigènes présentes, une année donnée, dans les équipements formant le parc d'installations. Elle va donc dépendre des quantités d'équipements présentes et de la quantité de fluide contenue dans chaque équipement, la charge. Afin de calculer la banque de façon la plus réaliste possible, il a été choisi de calculer les charges réelles des équipements et de prendre en compte une courbe de survie, traduisant la part des équipements d'un millésime donné présente sur le parc une année donnée.

Calcul de la charge réelle

Au cours de sa durée de vie, la charge d'un équipement varie par rapport à sa charge nominale, en fonction de son taux d'émissions fugitives, de ses occurrences de maintenance et recharges et des éventuels retrofits qu'il subit. Les occurrences de maintenance sont calculées à partir de l'hypothèse d'un seuil de maintenance (excepté pour les équipements dont la maintenance se fait de façon annuelle) : ce seuil définit la part de la charge perdue à partir de laquelle il est nécessaire de faire une maintenance pour recharger l'équipement. En dehors de ces occurrences, la charge décroît chaque année (i) en fonction du taux d'émissions fugitives de l'équipement (EF_{fug}), celui-ci étant caractéristique d'un millésime (L) donné (5.2F1).

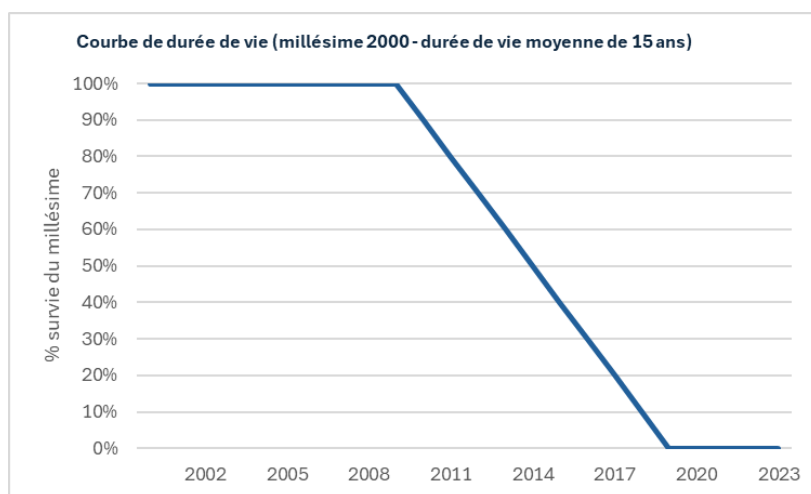
$$Charge\ réelle_{i,L} = (1 - (i - L)) * EF_{fug,L} \div 100 \times Charge\ market_L \text{ (5.2F1)}$$

Le complément de charge correspond à l'écart entre la charge initiale (*charge_market*) et la charge réelle l'année de l'occurrence de maintenance.

Calcul de la banque

La « banque » de fluides frigorigènes est constituée des quantités des différents fluides frigorigènes stockées dans les équipements installés sur le sol français. Elle est calculée par le cumul, sur la durée de vie de l'équipement, des quantités annuelles de fluides contenus dans les équipements mis sur le marché français et de leur charge moyenne. Afin de tenir compte d'une évolution plus réaliste de la banque, par application, le modèle de la courbe de durée de vie développé dans la thèse de S.Saba [1153] est utilisé. Pour chaque sous-secteur d'équipement, il est ainsi considéré une « courbe de durée de vie » ou « survival curve » construite en fonction de la donnée d'une durée de vie moyenne et donnant, pour un millésime mis sur le marché une année L , la part des équipements de ce millésime restant sur le parc d'installations l'année i (% *survie*). La durée de vie moyenne (DDV) est donnée par hypothèse. Pour ces inventaires, il est supposé que la durée de vie maximum est d'un tiers supérieure à la durée de vie moyenne.

Figure 6 : Exemple de courbe de durée de vie pour un millésime d'équipements de durée de vie moyenne de 15 ans mis sur le marché en 2000.



La banque est alors calculée, pour chaque sous-secteur, à partir des quantités mises sur le marché ($charge_{\text{mise-sur-marché}}$ équation 4.2F1) soit, des données de marchés d'équipements, de la charge nominale moyenne, ou d'un ratio de charge au cours du temps, et de la durée de vie de l'équipement.

$$banque(i, j) = \sum_{L=i-DDV_{max}+1}^i Part_Restante(L, i) * charge_{marché}(L, j) \quad (5.2F1)$$

$$banque(i, j) = \sum_{L=i-DDV_{max}+1}^i Part_Restante(L, i) * charge_{réelle}(L, j) \quad (5bis.2F1)$$

Où

- L : millésime (ou année de mise sur le marché) d'un équipement
- DDV_{max} : Durée de vie maximale atteinte par un équipement d'un millésime donné
- $Charge_{marché}$ est définie par (4.2F1)
- $Part_restante$: part du millésime L d'équipement encore présent sur le parc d'installations l'année i

Une banque réelle, distincte de la banque théorique, peut également être calculée, en fonction de la $charge_{réelle}$, afin de prendre les quantités restant dans les équipements l'année i donnée.

Comme il avait déjà été identifié dans les précédentes éditions d'inventaires, les émissions pendant la durée de vie peuvent être décomposées en émissions fugitives, qui sont liées à la banque précédemment calculée, les émissions au cours des opérations de maintenance (lorsque celle-ci peut être distinguée) et lors d'éventuels retrofits des équipements.

$$Emissions_{durée\ de\ vie} = Emissions_{fugitives} + Emissions_{servicing} + Emissions_{retrofit} \quad (6.2F1)$$

Emissions fugitives

Le calcul des émissions fugitives nécessite d'évaluer un taux d'émissions rapporté à la banque. Pour certains sous-secteurs d'équipements, tels que les supermarchés par exemple, ce taux d'émission peut être estimé directement, connaissant les consommations de fluides frigorigènes utilisées pour la maintenance des installations sur un échantillon significatif. Dans d'autres cas, les taux d'émissions sont caractéristiques des équipements neufs, évoluent avec les millésimes en fonction du progrès technologique. Un taux d'émission fugitive moyen est alors calculé sur le parc en tenant compte des taux d'émissions caractérisant chaque millésime et de la composition du parc, dépendant de la courbe de survie du sous-secteur. Afin d'améliorer la prise en compte des émissions fugitives et de ne pas les surestimer, le calcul se base désormais sur la banque réelle, tenant compte des charges réelles restant dans les équipements l'année en cours.

$$\text{Emiss_fugitive}(i,j,k) = \overline{EF_{fugitive_{bank}}}(i,k) \cdot \text{Bank_reelle}(i,j,k) \quad (7.2F1)$$

Prise en compte de la fréquence de maintenance

La maintenance est prise en compte de façon détaillée dans le calcul. Afin d'évaluer les occurrences de maintenance, il est pris en compte une charge réelle (5.2F1), correspondant à l'évolution de la charge de l'équipement au cours du temps. Celle-ci se trouve réduite des pertes fugitives annuelles jusqu'à l'atteinte d'un certain seuil pour lequel l'équipement doit subir une opération de maintenance et un complément de charge lui permettant de retrouver sa charge nominale. Les années où la maintenance a lieu (occurrences de maintenance), des émissions lors des opérations de maintenance sont considérées : elles sont évaluées en tenant compte d'un facteur d'émission à la recharge (EF_recharge) de l'installation et des quantités rechargées, soit le complément de charge.

Dans le cas où le taux d'émission fugitive est rapporté au parc et correspond aux quantités consommées pour la maintenance, on considère une maintenance annuelle, sans décharge de l'installation et les émissions à la maintenance sont supposées incluses dans les émissions fugitives pour les installations dont la maintenance est annuelle car les quantités consignées dans les rapports d'entretien correspondent aux quantités consommées par l'opérateur au moment de la maintenance, incluant les quantités rechargées et les pertes.

$$\text{Emiss}_{maint}(i,j,k) = (1 - C(k)) \cdot EF_{recharge}(i,k) \cdot \text{Complement}_{Charge}(i,j,k) + C(k) \cdot EF_{recharge}_{i,k} \cdot \text{Emiss}_{fugitive}_{i,j,k} \quad (8.2F1)$$

- $C(k) = 0$ si la maintenance est annuelle, 1 sinon
- Le complément de charge étant non nul que si $i = \text{occurrence de maintenance}$
- $EF_{recharge}$ = Facteur d'émission à la recharge de l'installation maintenue
- Emiss_fugitive donnée par (7.2F1)

Il est considéré qu'actuellement il n'y a plus de cas où l'équipement est déchargé lors de sa maintenance.

Emissions liées au retrofit d'une installation

Les retrofits d'installations sont pris en compte en considérant que durant la période précédent une interdiction, 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. Une courbe de survie est appliquée aux équipements retrofités, basée sur une durée de vie moyenne de 10 ans. Des tables de retrofit définissent les tendances, par secteur et par an, de conversion des installations d'un fluide vers un autre. De même façon que pour la charge_marché sont définies une charge_retrofit et une charge_reelle_retrofit, prises en compte dans le calcul de la banque réelle (5.2F1, 5bis.2F1). Les émissions associées aux retrofits sont alors de deux types : une fin de vie de l'équipement initial, une charge de l'équipement converti. Les facteurs d'émission sont de même type que ceux considérés à la recharge et en fin de vie des équipements.

$$\text{Charge}_{retrofit}(i,j,k) = \sum_{Jret} \text{Retrofit}(Jret,j,i)/100 \cdot \text{Bank_reelle}(i-1,Jret,k) \quad (9.2F1)$$

$$\text{Banque}_{retrofitee}(i,Jret,k) = (100\% - \frac{\text{Retrofit}(Jret,jret,i)}{100}) \cdot \text{Bank_reelle}(i-1,Jret,k) \quad (10.2F1)$$

$$E_{miss_retrofit}(i, Jret, k) = EF_{_decharge(i, k)} * Banque_retrofitee(i, Jret, k) \quad (11.2F1)$$

$$E_{miss_retrofit}(i, j, k) = EF_{_recharge(i, k)} * charge_retrofit(i, j, k) \quad (12.2F1)$$

- Jret correspond au fluide vers lequel le retrofit est fait, j étant le fluide frigorigène d'origine.
- Retrofit(J1, J2, i) est la table donnant pour la part de la banque de fluide J1 convertie vers le fluide J2 l'année i, pour chaque sous-secteur k.
- EF_decharge = facteur d'émission lors de la décharge de l'installation
- EF_recharge = facteur d'émission lors de la recharge de l'installation avec le nouveau fluide frigorigène

Emissions en fin de vie

Les émissions en fin de vie, au moment du démantèlement de l'équipement, vont dépendre dans certains cas de l'existence et de la performance de la filière de traitement et, dans d'autres cas, de la qualité de l'intervention sur site pour décharger l'équipement de son fluide frigorigène et le transférer aux usines de destruction ou de régénération.

Figure 7 : Emissions de fin de vie selon (GIEC, 2006)

EQUATION 7.14
EMISSIONS AT SYSTEM END-OF-LIFE

$$E_{end-of-life, t} = M_{t-d} \cdot \frac{p}{100} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{rec, d}}{100}\right)$$

Where:

- $E_{end-of-life, t}$ = amount of HFC emitted at system disposal in year t , kg
- M_{t-d} = amount of HFC initially charged into new systems installed in year $(t-d)$, kg
- p = residual charge of HFC in equipment being disposed of expressed in percentage of full charge, percent
- $\eta_{rec, d}$ = recovery efficiency at disposal, which is the ratio of recovered HFC referred to the HFC contained in the system, percent

La prise en compte de la charge réelle de l'équipement au cours de sa durée de vie permet également d'évaluer plus précisément la charge résiduelle de l'équipement arrivant en fin de vie, tenant compte des émissions fugitives et occurrences de maintenance et de limiter ainsi les double-comptes entre les émissions fin de vie et les émissions fugitives. Les quantités parvenant en fin de vie peuvent s'exprimer ainsi :

$$E_{fin_de_vie} = \sum_{L=i-DDV_{max}+1}^i \left(Part_{Restante(L, i-1)} - Part_{Restante(L, i)} \right) * charge_{reelle(L, j, k)} * EF_{fin_de_vie}(i, k) \quad (13.2F1)$$

Où

- $Part_{restante}(L, i-1) - Part_{Restante}(L, i)$ donne la part du millésime L parvenant en fin de vie l'année i
- $EF_{fin_de_vie}$ = facteur d'émission en fin de vie de l'équipement = 100%-efficacité de la filière de récupération

Cette formule est appliquée de même façon pour le calcul des quantités rétrofitées parvenant en fin de vie.

Emissions conteneurs

Ce sont les émissions liées à la manipulation des conteneurs et le transfert de fluides frigorigènes utilisés pour fournir le marché. Afin de les évaluer, il est nécessaire de connaître le besoin en fluides frigorigènes pour la production et la charge d'équipements neufs ainsi que pour la maintenance du parc et le retrofit des installations. A ce besoin doivent être ajoutés

les talons de charge correspondant aux quantités restant dans les bouteilles lorsqu'elles sont retournées aux distributeurs. Cette quantité est évaluée, selon les distributeurs à environ 15% du marché [1402].

Figure 8 : Emissions dues à la gestion des conteneurs selon (GIEC, 2006)

EQUATION 7.11
SOURCES OF EMISSIONS FROM MANAGEMENT OF CONTAINERS

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

Where:

$E_{containers,t}$ = emissions from all HFC containers in year t , kg
 RM_t = HFC market for new equipment and servicing of all refrigeration application in year t , kg
 c = emission factor of HFC container management of the current refrigerant market, percent

- Le besoin pour la production d'équipements neufs (Besoin_prod) correspond à la charge_production (3.2F1) augmentée des émissions à la charge correspondantes ;
- Le besoin pour la charge d'équipements (Besoin_charge) sur site correspond à la charge_market (4.2F1) augmentée des émissions à la charge correspondantes ;
- Le besoin pour la maintenance (Besoin_maintenance) correspond aux compléments de charge lorsque la maintenance dépend d'un seuil et aux émissions fugitives lorsqu'elle est annuelle, auxquels s'ajoutent les émissions à la recharge lors des opérations de maintenance (8.2F1) ;
- Le besoin pour le retrofit (Besoin_retrofit) correspond à charge_retrofit (9.2F1), augmenté des émissions à la recharge ;

Les quantités totales de fluides frigorigènes placées sur le marché (Quantités_marché) sont reconstituées à partir des données précédentes, en tenant compte des talons de charge.

$$\text{Quantités_marché}(i,j,k) = (1 + \text{Part_talons}(i)) * [\text{Besoin_charge}(i,j,k) + \text{Besoin_prod}(i,j,k) + \text{Besoin_maintenance}(i,j,k) + \text{Besoin_retrofit}(i,j,k)] \quad (14.2F1)$$

- Part_talons = 15% (hypothèse distributeur)

Le marché calculé (14.2F1) est aussi comparé aux marchés déclarés par les producteurs et les distributeurs de fluides frigorigènes déclarées à l'Observatoire des Fluides Frigorigènes de l'ADEME [1154] et constitue une étape de vérification de cohérence de l'approche.

$$E_{conteneurs}(i,j,k) = EF_{conteneurs}(i) / 100 * \text{Quantités_marchés}(i,j,k) \quad (15.2F1)$$

Avec

$$EF_{conteneurs} = 3\% \text{ (hypothèse distributeur)}$$

Remarque

La méthode de calcul décrite ci-dessus a été implémentée dans un outil développé par le Citepa. Celui-ci doit être couplé à une base de données regroupant, pour chaque sous-secteur d'équipements, l'ensemble des données et hypothèses nécessaires au calcul, soit : les caractéristiques techniques, les marchés et productions d'équipements, les hypothèses concernant les fluides utilisés, les facteurs d'émission, les hypothèses de retrofit, etc.

Tableau 2 : Données d'activité pour le calcul des émissions de réfrigérants

Type d'émission	Donnée d'activité	Paramètres dont dépendent les données d'activités
A la charge	Quantités chargées dans les équipements neufs	Marchés ou productions d'équipements selon mode de charge & charge moyenne

Type d'émission	Donnée d'activité	Paramètres dont dépendent les données d'activités
		& 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

Description des sous-secteurs

Applications domestiques

Structure du secteur

Ce secteur regroupe quatre sous-secteurs :

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

Réfrigérateurs

Les réfrigérateurs sont utilisés depuis de nombreuses années dans le froid domestique. Il existe différents types de réfrigérateurs :

- le table-top : il est équipé d'une porte dont le dessus est à hauteur du plan de travail (85 cm au-dessus du sol) et se compose généralement d'un compartiment principal de conservation et d'un petit compartiment de fabrication de glaçons ;
- le simple porte : il est équipé d'une seule porte et est composé d'un compartiment de conservation des denrées fraîches et éventuellement d'un petit compartiment de fabrication de glaçons ;
- le combiné : il est doté de deux portes avec en partie basse un compartiment de congélation et en haut un compartiment de conservation des denrées fraîches ;
- le double porte : il est aussi doté de deux portes mais le compartiment congélation se trouve cette fois en haut ;
- l'américain : il est composé de deux compartiments placés côte à côte, généralement un réfrigérateur et un congélateur.

Congélateurs

Les congélateurs sont utilisés depuis de nombreuses années dans le froid domestique. Il existe différents types de congélateurs :

- le congélateur armoire : il est proposé dans des capacités allant de 45 litres à plus de 450 litres. Il occupe un espace similaire à un réfrigérateur et trouve sa place dans la cuisine ou dans le cellier ;
- le congélateur coffre : il peut offrir les plus grandes capacités de stockage, allant de 100 litres à 750 litres. Il est souvent équipé de paniers pour le rangement des denrées et trouve sa place dans un cellier ou un garage ;
- le congélateur table top : il est idéal pour les petits espaces avec une contenance d'environ 85 litres. Il mesure généralement moins d'un mètre.

En règle générale, un congélateur d'un volume inférieur à 150 litres est suffisant pour une personne seule, un volume de 150 à 250 litres pour 3 personnes, et plus de 250 litres pour une famille de quatre personnes.

Sèche-linges pompes à chaleur

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

Caves à vin

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

- la cave de vieillissement : elle permet au vin de vieillir et de se bonifier dans des conditions régulées grâce à la stabilité de température (autour de 12°C), la bonne circulation de l'air et l'hygrométrie (entre 60 et 80%) ;
- la cave de mise en température : elle permet de conserver les bouteilles à température de dégustation ;
- la cave combinée ou multi-températures : c'est une cave polyvalente qui permet de stocker différentes sortes de vin sur plusieurs étages à des températures différentes offrant à la fois la possibilité de vieillissement et de mise en température.

Généralités

Modes de charge

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

Modes de maintenance

Il n'y a pas de maintenance faite sur ces équipements qui sont scellés.

Durée de vie moyenne

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

Données d'activités

Tableau 3 : Marchés et productions d'équipements de froid domestique

Année 2024	Marchés d'équipements	Productions d'équipements
Réfrigérateurs	2 581 000	0
Congélateurs	547 000	0
Caves à vin	140 000	26 000
Sèche linges thermodynamiques	483 000	0

Marchés

Réfrigérateur et congélateur

Le Gifam (Groupement Interprofessionnel des Fabricants d'Appareils d'Équipement Ménager) [1090] publie chaque année les statistiques pour certains appareils domestiques, dont les réfrigérateurs et les congélateurs.

Une répartition des modèles de réfrigérateurs et congélateurs (en termes de volume moyen) sur le parc français est disponible pour certaines années (2001, 2011, 2017) [1090] [207]. Ainsi, les ventes annuelles en France sont connues avec une bonne précision.

Sèche-linge pompe à chaleur

Le marché des sèche-linges pompe à chaleur en France a été reconstitué depuis 2010 à partir des informations d'un producteur d'équipement [1091] et des données récentes du Gifam [1090] qui fournit les ventes de sèche-linges en France ainsi que la segmentation par produit permettant de distinguer les sèche-linges PAC des sèche-linges à condensation et des sèche-linges à évacuation.

Cave à vin

Le marché des caves à vin a vraiment décollé au début des années 2000 jusqu'à la crise de 2008 avant de repartir en 2010 et 2011. Le taux d'équipement des ménages français était relativement faible en 2005 (2,9%) et a augmenté pour concerner, en 2015, environ 7% des foyers français selon le Gifam. Le marché des caves à vin a été reconstitué à partir d'informations sur le parc des caves à vin en France pour certaines années (2007, 2010, 2011, 2015, 2017). Depuis 2018, les ventes annuelles de ces équipements proviennent du Gifam [1090].

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 sont les productions d'équipements.

Réfrigérateur et congélateur

Les réfrigérateurs ne sont plus produits en France depuis 2001 et les congélateurs depuis 2005. Les données de production entre 1994 et 2000 proviennent des rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [207]. Les années antérieures sont estimées sur la base de la tendance entre 1994 et 1995.

Sèche-linge pompe à chaleur

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

Cave à vin

Il existe un seul fabricant de caves à vin en France (groupe Eurocave). L'hypothèse a été faite de considérer les productions à partir de l'année où le marché des caves à vin a commencé à être représentatif en France, soit en 2000. Les productions antérieures ont donc été considérées négligeables, faute d'information du fabricant. Le volume de production en France en 2013 a été utilisé et provient d'une revue spécialisée [1094]. Les volumes de productions des années antérieures et postérieures ont été estimées en suivant les tendances d'un taux d'augmentation annuel de 8%.

Charge nominale

Réfrigérateurs

La charge nominale moyenne des réfrigérateurs mis sur le marché peut être évaluée en fonction :

- d'un ratio de charge, exprimé en grammes de réfrigérant par litre de volume de réfrigérateur, ce ratio étant variable en fonction du type de fluide réfrigérant utilisé ;
- du volume moyen des équipements mis sur le marché.

Congélateurs

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

Tableau 4 : Caractéristiques de charge nominale des équipements

2024	Ratio de charge (kg/l) (R-600a)	Volume moyen (l)
Réfrigérateur	0.23	244
Congélateur	0.3	200

Sèche-linge pompe à chaleur

La quantité de réfrigérant R-134a contenu dans un appareil dépend des classes énergétiques, 280g pour les bases A+ et 370g pour les bases A++ d'après un fabricant [1091]. La moyenne des deux valeurs est considérée dans l'inventaire, soit 325 g/appareil. Ce volume de charge est cohérent avec la gamme proposée dans les Lignes directrices du GIEC 2006 (entre 50 et 500 g/appareil).

Cave à vin

La quantité de réfrigérant contenu dans les caves à vin varie en fonction de la gamme. Selon un fabricant [1092], cette quantité est comprise entre 30g et 100g. La valeur considérée dans l'inventaire la moyenne de ces deux valeurs, soit 65 g/appareil. Ainsi, pour cette sous-application, la charge de réfrigérant est également cohérente avec l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 (entre 50 et 500 g/appareil).

Réfrigérants

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

Réfrigérateurs et congélateurs

Le CFC-12 a historiquement été utilisé avant son interdiction par le Protocole de Montréal. Deux fluides l'ont remplacé à partir de 1994 et 1995, le R-134a et l'isobutane (R-600a). L'évolution des fluides frigorigènes utilisés au cours du temps a été évaluée à partir d'enquêtes de terrain menées régulièrement (figure ci-dessous) [207].

La réglementation européenne CE 517/2014 interdit la mise sur le marché des réfrigérateurs et congélateurs domestiques contenant un fluide frigorigène dont le PRG est supérieur à 150 depuis 1^{er} janvier 2015. L'intégralité des équipements mis sur le marché à partir de 2015 le sont avec du R-600a.

Sèche-linge pompe à chaleur

Dans l'inventaire, il est supposé que seul le R-134a était utilisé dans les équipements jusqu'en 2018 où une enquête terrain [1093] a mis en évidence la présence de R-450A et R-290. Une introduction progressive de ces fluides a donc été prise en compte dans les hypothèses de calcul. En 2024, la répartition est estimée à 30% de R-450A / 70% de R-290.

Cave à vin

En 2017, selon un catalogue de vente de caves à vin qui recense les produits et les diverses caractéristiques dont les réfrigérants, sur 25 produits le R-600a et le R-134a sont les fluides les plus employés. A noter qu'il existe également des technologies basées sur les systèmes de refroidissement thermoélectrique pour lesquels aucun gaz réfrigérant n'est utilisé. Une enquête terrain réalisé en 2019 [1093] a par ailleurs permis de constater que le R-600a était le fluide le plus largement utilisé. Il a été supposé une introduction du R-600a progressive en remplacement du R-134a à partir de 2000.

Facteurs d'émission

1. A la charge

Tableau 5 : Facteurs d'émissions à la charge des équipements

En 2024	Réfrigérateurs	Congélateurs	Sèche-linges pompes à chaleur	Caves à vin
Facteur d'émission à la charge	0,2%	0,2%	0,1%	0,6%

Réfrigérateur et congélateur

Le facteur d'émission à la charge des réfrigérateurs et congélateurs a évolué au cours du temps avec l'amélioration des pratiques. Un facteur d'émission de 2% a été utilisé jusqu'à la fin de l'utilisation du R-12 dans le milieu des années 1990. Par la suite, une régression linéaire a été appliquée jusqu'au milieu des années 2010 à un taux de perte de 0,2% a été utilisé, correspondant à la tranche basse des facteurs d'émission des Lignes directrices du GIEC 2006 pour le froid domestique [1095].

Sèche-linge pompe à chaleur

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

Cave à vin

Le facteur d'émission utilisé correspond à la moyenne de l'intervalle préconisé dans les lignes directrices du GIEC 2006 [1095], soit 0,6%.

2. Fugitif

Les appareils de froid domestique sont très étanches, le circuit frigorifique étant simple et entièrement soudé. Les émissions fugitives sont donc quasi-inexistantes et constituées de très rares pertes complètes de la charge correspondant généralement à un défaut initial de brasure. Le taux d'émissions fugitives est donc assimilé à la fréquence de défaillance des équipements : il est considéré stable, de l'ordre de 0,01 % correspondant à 1 défaillance sur 10 000 appareils [207]. 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 quatre sous-applications de ce secteur.

Tableau 6 : Facteur d'émission au cours de la durée de vie des équipements de froid domestique

En 2024	Appareils domestiques
Facteur d'émission fugitif	0,01 %

3. Fin de vie

Depuis la mise en place de la filière DEEE en 2007 imposée par la réglementation française (décret n° 2005-829 du 20 juillet 2005 relatif à la composition des équipements électriques et électroniques et à l'élimination des déchets issus de ces équipements), des éco-organismes assurent la collecte, le recyclage et le suivi des quantités récupérées. Les quantités annuelles de CFC, HCFC, HFC et HC extraits en première phase de dépollution des appareils de froid domestique sont communiquées par l'ADEME dans les rapports DEEE [1096]. Un taux de récupération peut ainsi être estimé en comparant les quantités récupérées et les quantités de réfrigérants supposés être en fin de vie en fonction des mises sur le marché et de la durée de vie moyenne des équipements. Ce taux de récupération est supposé caractériser le secteur du froid domestique. Le même taux de récupération, et donc le même facteur d'émission fin de vie, est appliqué à chaque sous-application domestique. A noter que le suivi n'est désormais plus publié régulièrement et les tendances après 2021 sont supposées stables.

Tableau 7 : Facteur d'émission en fin de vie des équipements

En 2024	Appareils domestiques
Facteur d'émission fin de vie	40 %

Climatisation embarquée

Structure du secteur

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

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

Généralités

Modes de charge

Tous ces équipements sont chargés en usine (sur les lieux de production).

Modes de maintenance

Dans le modèle de calcul, il est considéré que ces équipements subissent une opération de maintenance dès lors que la quantité de fluide réfrigérant contenu dans le système de climatisation est en deçà d'un certain seuil à partir duquel la climatisation du véhicule fonctionne moins bien. Par ailleurs, les équipements de transport routier nécessitent une décharge complète du fluide lors de la maintenance. Les différentes hypothèses retenues dans le modèle sont listées ci-dessous :

Tableau 8 : Hypothèses prises en compte dans le calcul des émissions fugitives

Sous-secteurs	Rythme de maintenance	Seuil	Décharge complète lors de la maintenance
Climatisation automobile	selon seuil	60%	Oui
Véhicules industriels	selon seuil	60%	Oui
Car et bus	selon seuil	60%	Oui
Transport ferroviaire	selon seuil	50%	Non

Durée de vie moyenne

La durée de vie moyenne des équipements provient des rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [207]. Celle-ci va influencer sur le profil de la courbe de durée de vie. Le tableau ci-dessous en récapitule les valeurs :

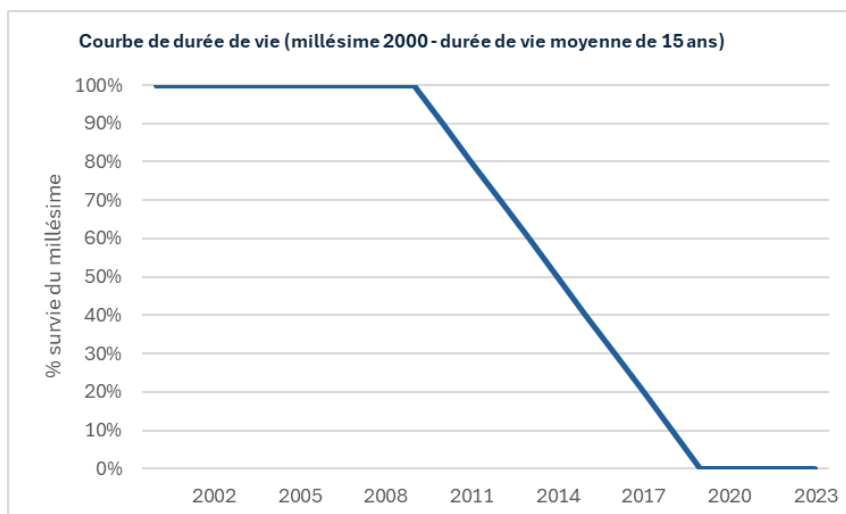
Tableau 9 : Hypothèses de durée de vie des systèmes de climatisation des équipements

Sous-secteur	Durée de vie (ans)
Climatisation automobile	12

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

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

Figure 9 : Courbe de fin de vie cars et bus (durée de vie de 15 ans)



Données d'activités

Marchés

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

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

Tableau 10 : Marchés et productions d'équipements de climatisation automobile

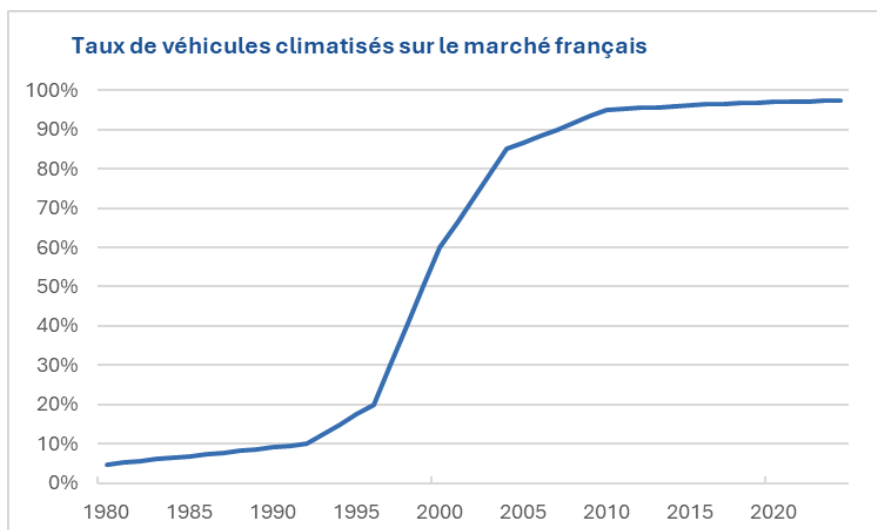
Année 2024	Immatriculations neuves	Productions d'équipements
Véhicules particuliers et utilitaires légers	2 100 000	1 300 000
Véhicules industriels	49 000	38 000
Cars et bus	5 100	3 600

Climatisation automobile

Le marché de véhicules en France est communiqué chaque année par le Comité des Constructeurs Français d'Automobiles (CCFA) [1097] 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 et d'informations annuelles provenant des principaux constructeurs automobiles en France [1098] et [1099].

Figure 10 : Evolution du taux de climatisation automobile en France hexagonale (en %)



Véhicules industriels

Le marché de véhicules industriels supérieurs à 5t en France est connu à l'aide des données du CCFA [1097] pour toute la période à partir de 1990.

Le taux de climatisation est supposé être identique à celui de la climatisation automobile utilisé à partir du modèle COPERT à la différence qu'il continue à progresser à partir de 2010 pour atteindre 99% en 2018 selon un fabricant [1100].

Car et bus

Le marché de cars et bus en France est connu à l'aide des données du CCFA [1097] 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 [207] et de données fabricants [1101]. La courbe ainsi générée conduit à un niveau de 80 % de véhicules climatisés mis sur le marché en 2020 qui est prolongé sur 2020-2024.

Transport ferroviaire

Les marchés ont été reconstitués à l'aide du parc de chaque mode de transport.

Le parc de moteurs et de remorques (ou rames) de trains et TGV est connu relativement bien pour les années récentes avec les données publiées par le ministère chargé de l'écologie [1102]. Entre 2007 et 2017, le parc de matériel ferroviaire train/TGV s'est accru en moyenne de 2,3% par an. Dans cette même période, le parc des métros, RER et tramways a augmenté de 24% en France.

Dans cette sous-application, la donnée d'activité à renseigner n'est pas un nombre de train/TGV/etc. mais un nombre de climatisations équipant ces modes de transport. Pour cela, on se base sur diverses sources de données :

- pour les tramways, le rapport inventaire des fluides frigorigènes [207] indique qu'ils ont une climatisation par cabine et une autre climatisation pour 2 remorques ;
- pour les trains/TGV, la SNCF a communiqué son parc d'équipement de climatisation en 2013 qui a permis d'établir un ratio du nombre de climatisation par cabine et remorque pour chaque type de trains (TGV et autres trains) ;
- pour les métros, des informations ont été transmises par l'exploitant des transports parisiens [1103] sur le nombre de rames dotées d'une climatisation puis extrapolées aux métros situés en province. De plus, il a été considéré que chaque cabine conducteur était équipée d'une climatisation.

Productions

La production de trains, métro, RER et tramways a été considérée comme égale aux marchés annuels.

Charge nominale

Ce paramètre varie en fonction du temps afin de tenir compte de la forte réduction qui marque en particulier ce secteur. Les données historiques sont reconstituées à partir de publications et les données récentes mises à jour par des enquêtes de terrain ou calculs selon des données récentes. Pour l'année 2024, les niveaux moyens de charge par application sont les suivants :

Tableau 11 : Charge nominale des systèmes de climatisation

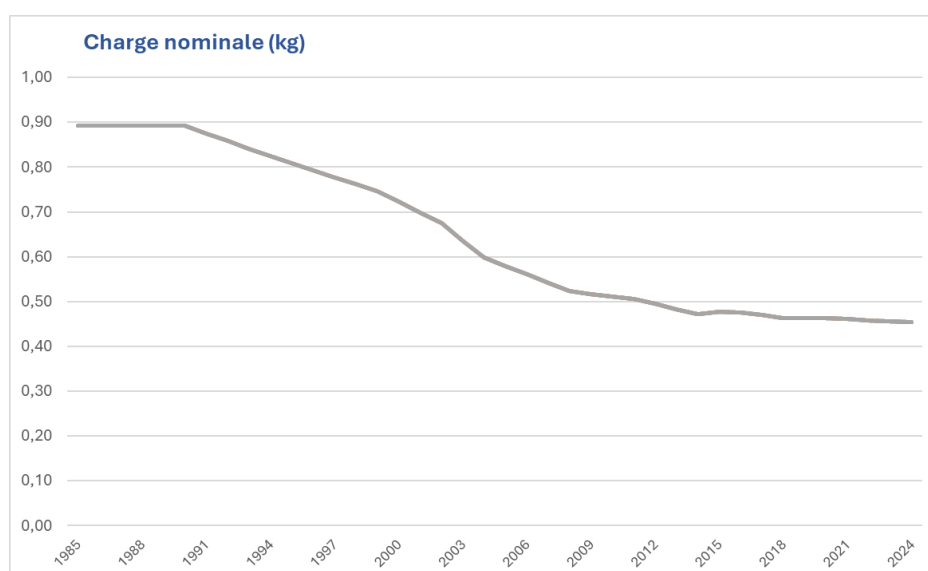
2024	Charge nominale (kg)
Climatisation automobile	0,45
Véhicules industriels	0,90
Cars et bus	10
Trains	14,5

Climatisation automobile

La charge moyenne des véhicules automobiles (Véhicules particuliers (VP) et Véhicules Utilitaires légers (VUL)) est calculée chaque année à partir des données caractéristiques fournies par les équipementiers ([1104] et [1105]) et des trente meilleures ventes de véhicules ([1097]).

La charge moyenne calculée diminue au cours du temps. Le niveau s'élevait à presque 900 g de réfrigérant par véhicule dans les années 1990 alors qu'il se situe aujourd'hui en-dessous de 500 g. La charge estimée ces dernières années est donc inférieure à l'intervalle indiqué dans les Lignes directrices du GIEC 2006 [1095] 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.

Figure 11 : Charge moyenne de réfrigérant par véhicule (en kg)



Véhicules industriels

Les charges moyennes sont estimées sur la base d'informations transmises par deux producteurs français [1402].

Les niveaux de charge varient ainsi au cours du temps avec une constante diminution de 1 310g de réfrigérant par véhicule en 1990 à 920g en 2020. Ces valeurs sont comprises dans l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 (de 500 à 1 500g de réfrigérant par véhicule) [1095].

Car et bus

La quantité de réfrigérant contenu dans les bus et cars dépend notamment de la longueur et du type de bus (en fonction, seule la cabine du chauffeur peut être climatisée ou bien le bus entièrement).

La courbe d'évolution de la charge moyenne de ces équipements a été reconstituée à partir :

- d'informations tirées du rapport RTOC (report of the Refrigeration, air conditioning and heat pumps Technical Options Committee) [1106] ;
- de données fabricant [1101].

Transport ferroviaire

Pour les trains, connaissant le parc d'équipements en TGV et autres trains ainsi qu'une distinction entre les cabines et les remorques, un ratio du nombre de climatisations par cabine et remorque pour chaque type de trains a été établi en 2013 à l'aide du nombre de climatisations et de la quantité de réfrigérant installé dans le parc issu d'un état des lieux du principal opérateur ferroviaire en France [1402] cette année-là. Ce ratio a ensuite été utilisé pour en déduire le parc d'équipement pour les autres années. Les quantités de réfrigérant déduits 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 [1103] 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.

Réfrigérants

La directive 2006/40/CE du 17 mai 2006 concernant les émissions provenant des systèmes de climatisation des véhicules à moteur (MAC) interdit pour les véhicules neufs l'utilisation de fluide frigorigène dont le PRG est supérieur à 150 à compter du 1er janvier 2017. Cette directive européenne concerne les véhicules particuliers et non les véhicules utilitaires légers. Ainsi, le R-1234yf n'est pas présent dans l'intégralité des nouveaux marchés de véhicules. De même, la production des véhicules destinées à l'exportation hors Europe n'est pas concernée.

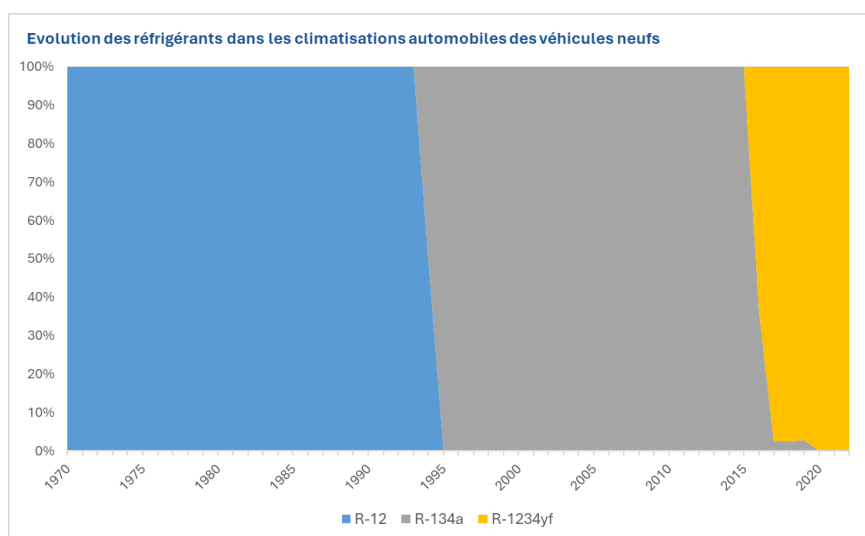
Climatisation automobile

Au cours du temps, trois principaux fluides frigorigènes se sont succédé dans les climatisations des véhicules : le R-12 (CFC), le R-134a (HFC) et le HFC-1234yf (HFO), progressivement introduit sur les véhicules neufs mis sur le marché Européen depuis 2014-2015. Selon le RTOC [1107], tous les véhicules produits depuis 1995 sont équipés de climatisation au HFC-134a. La transition entre le R-12 et le R-134a s'est faite très rapidement, en deux ans environ.

Selon des informations du producteur de HFC-134a, en 2017 la réglementation européenne a été respectée et la totalité des véhicules particuliers ont été mis sur le marché européen avec des systèmes de climatisations fonctionnant au R-1234yf. En revanche, la progression du R-1234yf en remplacement du R-134a n'a eu lieu que très tardivement. Peu de véhicules utilisant le R-1234yf ont été mis sur le marché européen avant 2014 et la part du R-1234yf n'a été significative

qu'à partir de 2016. A partir de 2016, on évalue le nombre de VP et VUL mis sur le marché avec du R-1234yf à l'aide des données de production d'un fabricant automobile [1099].

Figure 12 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les systèmes de climatisation des véhicules particuliers et utilitaires légers mis sur le marché



Véhicules industriels

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

Car et bus

L'évolution historique des fluides frigorigènes utilisés dans cette application a été reconstituée à partir des données des rapports RTOC [1403]. Comme pour les véhicules industriels, il est supposé que le R-134a est le seul fluide frigorigène utilisé pour les années récentes, la transition avec le R-1234yf n'étant pas encore amorcée.

Transport ferroviaire

Pour les trains et TGV, selon la SNCF, les équipements de climatisation utilisent le R-134a ou le R-407C, selon qu'ils équipent les TGV ou les TER et les postes de cabine ou wagon voyageur. Pour les RER, tramways et métros, le fluide utilisé en remplacement du R-22 est le R-134a [1103].

Facteurs d'émission

A la charge

Tableau 12 : Facteurs d'émissions à la charge des systèmes de climatisation

En 2024	Climatisation automobile	Véhicules industriels	Cars et bus	Trains
Facteur d'émission à la charge	0.23%	0.23%	0.13%	1.50%

Climatisation automobile

Le facteur d'émission à la production des véhicules est estimé sur la base d'informations transmises par deux producteurs automobiles [207]. Dans les années 1990, le facteur d'émission est estimé à environ 3% puis diminue pour se situer entre 0,2 et 0,3% ces dernières années. Le facteur d'émission national calculé pour les années récentes est donc compris dans l'intervalle des facteurs d'émission indiqués dans les Lignes directrices du GIEC 2006 (entre 0,2 et 0,5%) [1095].

Véhicules industriels

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

Car et bus

Le facteur d'émission à la charge des cars et bus est spécifique, déterminé par l'estimation par bilan matière d'un producteur pour les années 2018 et 2019 (respectivement 0,12 et 0,13 %). Ce ratio est inférieur à la gamme des Lignes directrices du GIEC 2006 [1095] mais a été estimé pour deux années successives et récentes et considéré comme niveau moyen depuis 2018. Pour les années antérieures à 2018, faute de données spécifiques aux cars et bus, les valeurs estimées pour la climatisation automobile sont utilisées.

Transport ferroviaire

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

Fugitif

Tableau 13 : Facteurs d'émissions au cours de la durée de vie des véhicules

En 2024	Climatisation automobile	Véhicules industriels	Cars et bus	Trains
Facteur d'émission fugitif	8 %	8 %	10 %	5 %

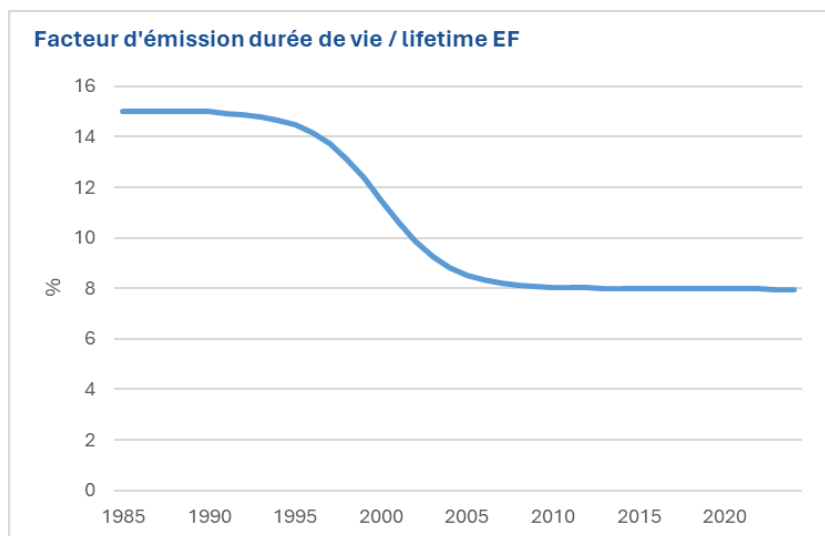
Climatisation automobile

Les facteurs d'émission pendant le fonctionnement des véhicules proviennent d'une courbe en S créée à partir des valeurs suivantes tirées des Lignes directrices du GIEC 2006 [1095] :

Tableau 14 : Facteurs d'émission fugitifs des climatisations de véhicules automobiles

	Intervalle		
	Haut	Bas	Moyenne
1 ^{ère} génération	20 %	10%	15%
2 ^{ème} 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 13 : Facteur d'émission pendant la durée de vie des véhicules (en %)**Véhicules industriels**

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

Car et bus

Les hypothèses retenues dans cette sous-application proviennent du RTOC 2010 [1108] dans lequel il est indiqué que les taux de pertes annuelles pour les cars et bus sont d'environ 10% de sa charge d'origine et que pour les engins construits avant 2000, ce facteur d'émission était 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 [207] et maintenu constant, faute d'information complémentaire.

Fin de vie**Tableau 15 : Facteur d'émission en fin de vie des équipements**

En 2024	Climatisation automobile	Véhicules industriels	Cars et bus	Trains
Facteur d'émission de fin de vie	43 %	86 %	50 %	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 [688] 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 non négligeable.

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

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

Pour les années antérieures, le taux de récupération est extrait des rapports d'inventaires de fluides frigorigènes [207].

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

Avec :

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

Le nombre de VHU traités chaque année est présent dans les rapports VHU de l'ADEME [1110] que même que les exportations. Le nombre de véhicules mis sur le marché à l'année N-12 (durée de vie moyenne des véhicules) est connu précisément dans les rapports du CCFA [1097]. La part des fluides traités dans les VHU pris en charge par les casses est estimée sur la base d'hypothèses et augmente chaque année. Celle-ci a été estimée à 25% en 2013 et 50% en 2017. Des enquêtes terrains auprès des casses pourraient valider l'ordre de grandeur de ces hypothèses. Les niveaux des années suivantes ont été estimés tendanciuellement, pour atteindre 44 % d'efficacité de récupération en 2024, tenant compte des exportations.

Une tendance similaire décalée dans le temps est supposée pour les cars et bus.

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 [207] sont maintenus.

Transport ferroviaire

D'après le service de maintenance de la SNCF, la récupération en fin de vie des équipements de climatisation des trains est équivalente à celle réalisée lors des opérations de maintenance [207]. La progression de l'efficacité de récupération est estimée à partir d'une courbe en S démarrant en 1990 pour atteindre 90 % dans les années 2020.

Transports frigorifiques

Structure du secteur

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

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

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

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

Généralités

Modes de charge

Il est considéré que :

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

Modes de maintenance

Il est considéré que ces équipements subissent une opération de maintenance dès lors que la quantité de fluide réfrigérant contenu 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 par équipement sont listées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 16 : Hypothèses liées à la maintenance dans le transport frigorifique, par type d'équipement

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

Durée de vie moyenne

L'hypothèse de durée de vie moyenne est de 10 ans pour les transports routiers, de 20 ans pour les conteneurs frigorifiques et de 30 ans pour les navires équipés de cales réfrigérées [207]. Elle est associée à une courbe de durée de vie, comme pour les autres secteurs.

Données d'activités

Tableau 17 : Marchés et productions d'équipement du transport frigorifique

Année 2024	Marchés d'équipements	Productions d'équipements
Véhicules utilitaires légers réfrigérés	5 800	5 500
Semi-remorques et camions réfrigérés	5 500	22 500
Reefers	0	0
Conteneurs réfrigérés	26 500	26 500

Marchés

Véhicules utilitaires réfrigérés légers

Le calcul de la banque de fluides et des émissions fugitives dépend du parc circulant en France, celui-ci peut être calculé à partir des marchés annuels de véhicules utilitaires légers réfrigérés.

Les marchés historiques (avant 2000) ont été reconstitués à partir des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [207] et d'hypothèses sur les taux de croissance du sous-secteur.

De 2002 à 2016, les données de marchés des véhicules frigorifiques ont été transmises par l'association Carcoserco [207]. Depuis 2018, les données ne sont pas publiées et le marché national est estimé sur la base de communication de la Fédération Française de Carrosserie (FFC) telles que « l'observatoire du véhicule industriel » [1113] et sur les tendances historiques.

Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques

Les marchés annuels de remorques et de semi-remorques sont estimés de la même façon que pour les véhicules utilitaires légers réfrigérés.

Reefers

La flotte maritime de navires réfrigérés a été estimée à partir de la flotte mondiale pour laquelle des statistiques sont disponibles [1402]. Au niveau mondial, le marché est équivalent à la production. Il est considéré qu'une part de 10% peut être attribuée à la France.

Les marchés historiques (avant 2004) ont été reconstitués à partir des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [207] et d'hypothèses sur les taux de croissance du sous-secteur. Les marchés des années plus récentes ont été estimés à l'aide de données disponibles sur le site MarineTraffic [1404] et des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [207].

Conteneurs frigorifiques

Comme pour la flotte de navires réfrigérés, seules des statistiques mondiales étant disponibles, le marché national de conteneurs réfrigérés est supposé égal à 10% du marché mondial.

Les marchés historiques et récents ont été estimés à partir des anciens rapports d'inventaires de fluides frigorigènes [207] et du Container Handbook [1115].

Le transport frigorifique par voie ferroviaire est peu développé en France : environ une centaine de wagons selon les anciens rapports d'inventaires de l'Ecole des Mines [207]. Compte tenu de la similarité des technologies utilisés, le transport ferroviaire réfrigéré est comptabilisé dans le parc total de conteneurs frigorifiques.

Productions

Les données de production des véhicules du transport routier frigorifique sont issues de communications du Cemafroid sur certaines années [207] et extrapolées sur 2017-2024 faute de nouvelle communication.

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

Charge

Concernant le transport routier, les charges sont estimées à partir des données issues d'enquêtes anciennes auprès de différents fabricants [207] et de communications récentes du Petit Forestier [1114].

Les charges des équipements du transport routier sont considérées constantes jusqu'en 2006 et, selon les communications des fabricants, en baisse progressivement depuis 2007.

Tableau 18 : Evolution des niveaux moyens de charge nominale du transport frigorifique routier (en kg)

Charge de référence (kg)	Avant 2006	2010	2024
Véhicules utilitaires réfrigérés légers	2,5	2,2	2,0
Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	7,2	6,7	6,5

Pour le transport maritime, les charges sont estimées à partir des anciens rapports d'inventaires de l'Ecole des Mines [207]. Les charges des navires à cales réfrigérées sont supposées constantes jusqu'en 2000, année à partir de laquelle celles-ci diminuent largement avant de se stabiliser en 2010. On suppose une charge constante sur la toute la série temporelle pour les conteneurs réfrigérés.

Tableau 19 : Evolution des niveaux moyens de charge nominale du transport frigorifique maritime

Charge de référence	Avant 2000	Depuis 2010
Reefers (t)	4	1
Conteneurs réfrigérés (kg)	4,6	4,6

Réfrigérants

Véhicules utilitaires réfrigérés légers

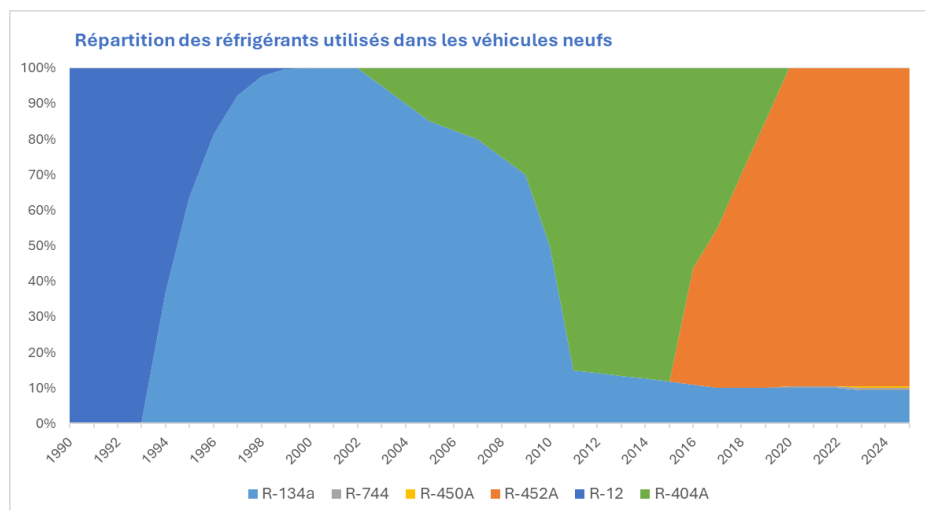
Entre 1970 et 1990 on considère que l'ensemble du parc de véhicules utilitaires réfrigérés légers fonctionnaient au R-12. On estime qu'au début des années 1990, une transition s'opère vers des systèmes chargés au R-134a. Il est considéré dans l'inventaire que ce dernier est utilisé à 100% dans les véhicules équipés de groupes de type « poulie-courroie » jusqu'au début des années 2000. Ces hypothèses ont été définies en prenant en compte le rapport RTOC de 1998 [1107], les anciens rapports d'inventaires réalisés par Mines-ParisTech [207] et de l'évolution de la législation internationale concernant les émissions de CFC.

A partir de 2003, le R-134a fait progressivement place à l'utilisation de R-404A qui devient prépondérant après 2010. A partir de 2016, le R-452A, avec un PRG de 1945, est proposé pour remplacer le R-404A qui voit sa part se réduire significativement. A partir de 2020 les véhicules frigorifiques utilitaires légers sont essentiellement produits avec du R-452A (à 90%) et du R-134a (10%). Le R-450A peut être également utilisé (<1%).

L'évolution des fluides frigorigènes utilisés a été revue sur la période 2020-2024 sur la base de nouvelles communications et l'ensemble a été estimé sur la base :

- des données fournies par les anciens rapports des inventaires d'émissions des fluides frigorigènes [207], incluant des communications de Carrier et du Cemafruid,
- d'échanges avec Petit Forestier [1114],
- d'échanges avec l'European Partnership for Energy and the Environment [1116]
- de communications confidentielles de fabricants d'équipements.

Figure 14 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les véhicules frigorifiques utilitaires

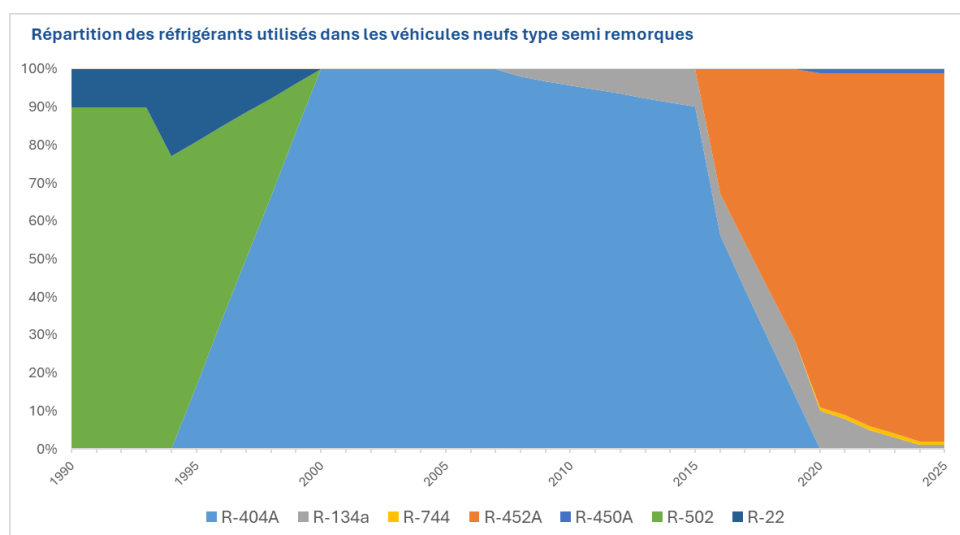


Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques

Les hypothèses retenues jusqu'au milieu des années de 90 considèrent que les camions et semi-remorques frigorifiques étaient chargés principalement au R-502 puis au R-22. Le R-404A a été introduit dans les années 1995 et son utilisation s'est généralisée à tous les véhicules équipés de groupes frigorifiques autonomes de type « moteur thermique ». Ces hypothèses s'appuient sur le rapport RTOC de 1998 [1107], les anciens rapports d'inventaires [207] de Mines-ParisTech et sur l'évolution de la législation internationale.

Selon les tendances fournies par le Cemafruid, le R-452A remplace progressivement le R-404A entre 2016 et 2020. En 2020, sont également introduits d'autres fluides à faible PRG tels que le R-450A ou le R-744. La répartition des fluides utilisés a été estimée sur la base des mêmes références que pour les véhicules utilitaires légers.

Figure 15 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les camions frigorifiques semi-remorques



Reefers

Entre 1970 et la fin 1999, le R-22 et le R-12 constituent les deux fluides frigorigènes utilisés dans les cales frigorifiques des navires, la part du R-12 diminuant rapidement sur les dernières années conformément aux données communiquées dans le rapport RTOC de 2002 [1117]. On considère que fluide disparaît de la flotte internationale à la fin des années 90.

Le R-404A, le R-410A et le R-717 ont progressivement été introduits dans les équipements neufs à partir de 2000. On considère que la part du R-717 atteint 10% en 2020 tandis que les parts du R-404A et R-410A croissent respectivement jusqu'à 30% et 60% en 2020. En parallèle, on considère que la présence du R-22 dans le parc diminue jusqu'à disparaître du marché neuf en 2020. Sur 2020-2024 le R-404A n'est progressivement plus utilisé, au profit du R-717. Ces résultats

reposent principalement sur les rapports RTOC [1107][1405] et la prise en compte de l'évolution de la législation internationale.

Conteneurs frigorifiques

Jusqu'en 1993, sur la base du rapport RTOC de 1998 [1107] on estime que l'ensemble des conteneurs frigorifiques sont chargés au R-12. On considère ensuite que le ce fluide laisse rapidement sa place au R-134a (plus de 75% en 1999), au R-22 (20% en 1999) et au R-404A (presque 5% en 1999). Ces hypothèses ont été définies en s'appuyant sur le rapport RTOC de 1998 [1107], les anciens rapports d'inventaires de Mines-ParisTech [207] et de l'évolution de la législation internationale.

Entre 2000 et 2003, le marché est partagé entre le R-134a, le R-22 et le R-404A. Cependant il semble que le R-22 disparaisse rapidement laissant le R-134a en position de fluide principal (plus de 95% entre 2003 et 2011). Ce dernier est néanmoins en perte de vitesse depuis 2012 et ne représente que près de 20% dans le marché français en 2020. Concernant le R-404A, l'hypothèse est faite qu'il occupe une part constante jusqu'en 2016 (3%) avant de décroître. En parallèle de la diminution de l'utilisation du R-134a, on prend en compte l'apparition de plusieurs autres fluides : le R-513A, le R-513B et le R-744.

Facteurs d'émission

A la charge

Tableau 20 : Facteurs d'émissions à la charge des équipements de transport frigorifique

En 2024	Toutes applications
Facteur d'émission à la charge	1 %

Ces valeurs des facteurs d'émission à la charge sont issues des lignes directrices du GIEC de 1996 [1118] et de 2006 [1095] et considérés constants depuis 2006.

Fugitif

Tableau 21 : Facteurs d'émissions au cours de la durée de vie des équipements de transport frigorifique

En 2024	VUL réfrigérés	Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	Reefers	Conteneurs frigorifiques
Facteur d'émission fugitif	18 %	12 %	15 %	20 %

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

Depuis 2014, les facteurs d'émission du transport frigorifiques routier sont calculés sur la base de données communiquées par Petit Forestier [1114]. Les évolutions historiques ont été reconstituées à partir des données publiées dans [207].

Reefers & Conteneurs frigorifiques

Peu d'informations étant disponibles pour le transport maritime, les évolutions des facteurs d'émission sont estimées sur la base du rapport RTOC de 1998 [1107] et des anciens rapports d'inventaire [207]. Depuis 2016, les facteurs sont considérés constants : de 15 % pour les reefers et de 20 % pour les conteneurs.

Fin de vie

Tableau 22 : Facteurs d'émissions en fin de vie des équipements de transport frigorifique

En 2024	VUL réfrigérés	Systèmes autonomes équipant les camions et semi-remorques	Reefers	Conteneurs frigorifiques
Facteur d'émission de fin de vie	30 %	30 %	60 %	50 %

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

Pour le transport maritime, les courbes en S ont une évolution plus lente. Il est supposé que la récupération commence dans les années 1990 pour atteindre 40 % en 2020 pour les reefers et 50 % pour les conteneurs.

Froid industriel

Structure du secteur

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 déjà comptabilisé dans le secteur des chillers. Plus généralement, une partie du froid industriel utilise des chillers pour assurer le refroidissement d'une partie du processus de production.

Il convient de souligner que le secteur du froid industriel est marqué d'une forte confidentialité et peu d'informations sont disponibles ou communiquées pour permettre d'améliorer l'estimation de ce secteur ou vérifier l'exhaustivité des procédés à prendre en compte. Cependant, depuis deux ans, une enquête de terrain a permis d'entamer une collaboration avec des fédérations du froid agroalimentaire, de l'industrie du lait et de la viande en particulier.

Ce secteur est actuellement décomposé en 9 sous-secteurs :

- L'industrie agroalimentaire de la viande,
- L'industrie agroalimentaire du lait,
- Les autres industries alimentaires,
- Les entrepôts réfrigérés,
- Les tanks à lait,
- Les patinoires
- L'industrie chimique,
- L'industrie pharmaceutique,
- L'industrie du caoutchouc.

Généralités

Modes de charge

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

Modes de maintenance

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

Durée de vie moyenne

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

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 [207] :

- 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.

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) [1151]. Celles-ci sont mises à jour avec un certain délai et présentent 1 à 3 ans de décalage par rapport à l'année en cours, selon les productions.

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

Entrepôts réfrigérés

Les entrepôts frigorifiques sont distincts, dans le calcul, de l'industrie agroalimentaire même si une partie des entrepôts est utilisé par l'IAA (8 % en 2010 [1406]).

Tableau 23 : 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 précédent[1406]), ce qui représente une forte évolution par rapport aux hypothèses des précédentes éditions d'inventaire où la part des entrepôts réfrigérés en froid négatif était supposée de 70 %.

L'évolution du volume d'entrepôts est estimée en fonction de différentes publications [1406][1407][1408]. Le niveau 2021 (extrapolé à 2022) 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) [1409].

Procédés industriels

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

Charge

Dans le cas du froid industriel, la charge installée est estimée à partir du plusieurs ratios de charge selon la méthode utilisée historiquement dans [207]. On peut résumer l'ensemble de ces ratios à deux principaux :

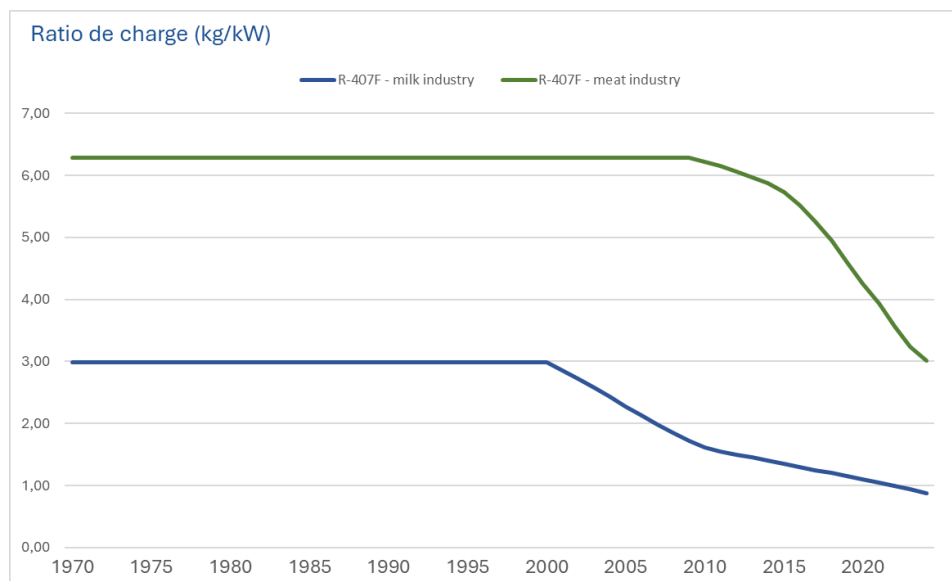
- Un ratio de charge « équivalent », en kg/kW prenant en compte
 - les caractéristiques générales des systèmes à détente directe et des systèmes directs pour le froid positif et le froid négatif ;
 - la part du froid négatif dans la puissance totale (dans le cas de l'industrie laitière, par exemple, 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.

Tableau 24 : Ratios caractéristiques des procédés de froid industriel

Procédés	Viande (kW/t)	Lait (kW/t)	Autres (kW/t)	Entrepôts (kW/m ³)	Tanks à lait (kg/m ³)
Besoin frigorifique pour la production	0,044	0,013	0,044	0,032	0,91
Part de froid négatif	30 %	20 %	0 %	40 %	0 %

Dans le cas des patinoires, une charge moyenne est prise en compte. Une décroissance est prise en compte sur l'historique de façon à prendre en compte la tendance au systèmes indirects et la pénétration des patinoires mobiles, pour atteindre environ 300kg par installation. La figure suivante montre l'évolution du ratio de charge (kg/kW) dans le cas de l'industrie laitière et la correction apportée à la suite de l'enquête auprès des fédérations de l'industrie laitière en 2021. Une surestimation de la charge avait été prise en compte jusqu'à présent, l'enquête n'ayant pas été mise à jour depuis plusieurs années. La correction apportée a conduit à diviser par 3 le niveau du ratio de charge en 2020.

Figure 16 : Ratio de charge équivalent – Exemple de l'industrie laitière et de l'industrie de la viande

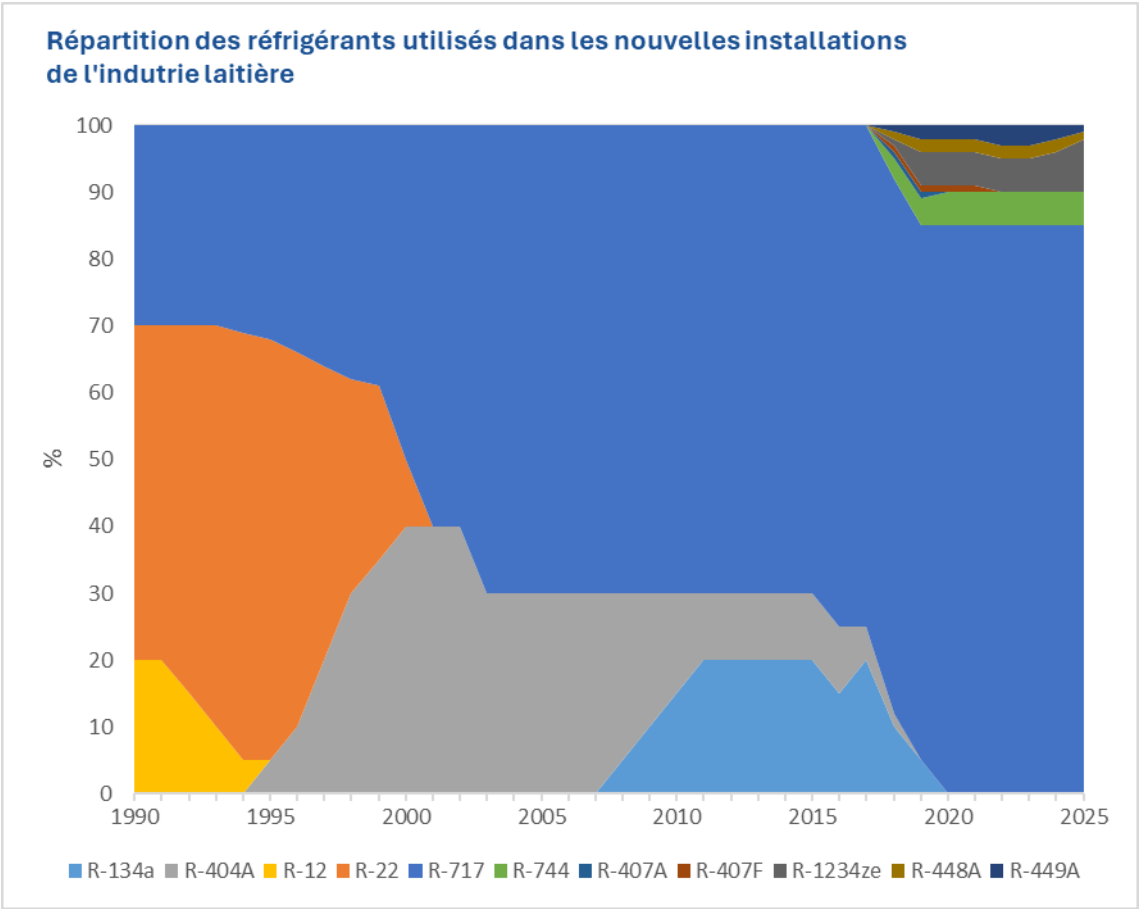


Réfrigérants

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

Pour les tanks à lait, le R-404A a été progressivement remplacé par le R-448A et R-449A depuis 2016. Dans les patinoires, le R-134a reste majoritaire devant l'ammoniac, le R-448A, R-449A et CO₂ sont progressivement utilisés.

Figure 17 : Répartition des fluides frigorigènes utilisés en agroalimentaire – exemple de l’industrie du lait



Facteurs d’émission

A la charge

Les facteurs d’émissions sont issus des Lignes directrices du GIEC de 1996 [1118] et de 2006 [1095]. Pour les années antérieures à 1996 et les années après 2006, ils sont considérés constants.

Tableau 25 : Facteur d’émission à la charge des installations de froid industriel

En 2024	Toutes applications
Facteur d’émission à la charge	1,5 %

Fugitif

Tableau 26 : Facteurs d’émission lors de la durée de vie des installations de froid industriel

En 2024	Agroalimen taire	Entrepôts	Industrie chimique	Industrie pharmaceu tique	Industrie caoutchouc	Tank à lait	Patinoires
Facteur d’émission fugitif	6 à 8 %	13 %	10 %	10 %	15 %	8 %	8 %

Industrie agroalimentaire et entrepôts

Sur la base des hypothèses des anciennes études d'inventaires [207], 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, significative depuis 2010. Ils varient selon les secteurs, en fonction notamment de la part des systèmes indirects.

Procédés industriels

Excepté dans le cas de l'industrie du caoutchouc où les quantités utilisées pour la maintenance ont été régulièrement communiquées [207] et les taux d'émissions élevés (jusqu'à 100 % en 2005), les taux d'émissions fugitives sont supposés de l'ordre de 15 % jusqu'en 2010 puis en décroissance selon une courbe en S, faute de communication plus précise, et en légère décroissance depuis 2009.

Fin de vie

Tableau 27 : Facteurs d'émission lors du démantèlement des installations de froid industriel

En 2024	Agroalimentaire	Entrepôts	Industrie chimique	Industrie pharmaceutique	Industrie caoutchouc	Patinoires	Tanks à lait
Facteur d'émission de fin de vie	5 %	10 %	5 %	5 %	10 %	20 %	30 %

Industrie agroalimentaire

Sur la base des hypothèses des anciennes études d'inventaires [207], le début de la récupération en fin de vie est pris en compte à partir de 1993, pour atteindre 80 % en 2005 et 95 % en 2013, en considérant que la majorité des installations sont classées ICPE (Installations Classées Pour l'Environnement).

Entrepôts

Sur la base des hypothèses des anciennes études d'inventaires [207], le début de la récupération en fin de vie est pris en compte à partir de 1993, pour atteindre 70 % en 2005 et 80 % en 2013, et 90 % en 2020.

Procédés industriels

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

Patinoires et tanks à lait

Dans ces secteurs, il est considéré qu'une part du parc d'installations n'est pas entretenu, ce qui pénalise le facteur moyen d'émission en fin de vie des équipements.

Climatisation stationnaire et chauffage

Structure du secteur

La structure de ce secteur est basée sur celle des données statistiques disponibles. La structure donnée par Uniclimate [1129] qui fournit les données de marchés par type d'équipement, est utilisée dans l'inventaire. Le nom du secteur inclut désormais la notion de chauffage, la plupart des splits ou pompes à chaleur air/air étant réversibles et principalement installés pour répondre à un besoin en chauffage.

Dans le rapportage des inventaires des émissions de GES au titre du Protocole de Kyoto, la climatisation à air est contenue dans le code « *Stationary air-conditioning* » avec les pompes à chaleur et un tiers des émissions des chillers.

Climatisation à air

Les équipements de climatisation à air peuvent se classer en deux sous-secteurs, distincts par leurs niveaux de puissance : celui de la climatisation individuelle (< 17,5 kW) et celui de la climatisation autonome (>17,5kW).

Ce secteur est composé de neuf sous-secteurs :

Climatisation individuelle

- Climatiseur mobile (mobile) ;
- Climatiseur fenêtre (window) ;
- Mono-split (small split) ou pompe à chaleur air/air ;
- Multi-split ;

Climatisation autonome

- Armoires verticales (consoles) ;
- DRV (Débit Réfrigérant Variable) ;
- Systèmes splits centralisés (large split system) ;
- Roof tops ;
- Armoires spéciales (cabinets).

Chillers

Le secteur est décomposé en quatre types de groupes refroidisseurs d'eau, distincts par leurs technologies de compresseurs et niveaux de puissance. Il existe d'une part les compresseurs centrifuges et, d'autre part, les compresseurs volumétriques qui sont divisés en trois sous-groupes en fonction de la puissance :

- A compresseurs volumétriques
 - De petite puissance (< 50 kW) ;
 - De moyenne puissance (50 < P < 350 kW) ;
 - De forte puissance (> 350 kW) ;
- A compresseurs centrifuges

Pompes à chaleur (PAC) résidentielles

Ce secteur est composé de cinq sous-secteurs :

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

Généralités

Modes de charge

Les équipements de climatisation peuvent être chargés en usine (lieux de production) ou sur site (lieux d'installation). Certains équipements, tels que les multi-splits ou les DRV, nécessitent un complément de charge lors de l'installation sur site. Le tableau ci-dessous dresse un état des lieux des différents modes de charges de ce secteur :

Tableau 28 : Récapitulatif des modes de charge des équipements de la climatisation stationnaire

Secteur	Sous-secteur	chargé d'usine (dit pré-chargé)	chargé sur site	Complément de charge
CHILLERS	Centrifugal compressors	X		
	Small chillers	X		
	Mid-size chillers	X		
	Large chillers	X		
AIR-TO-AIR AIR CONDITIONERS	Small splits	X		
	Multi-splits	X		50%
	Large split systems (Central AC)	X		30%
	Roof-top units			
	DRV	X		80%
	Mobiles	X		
	Windows	X		
	Consoles		X	
	Cabinets		X	
HEAT PUMPS	Air-to-water heat pumps	X		
	Water-to-water heat pumps	X		
	Ground-to-water heat pumps	X		
	Ground-to-ground heat pumps	X		
	Heat pump water heaters	X		

Modes de maintenance

Au même titre que la charge, la maintenance nécessaire pendant la durée de vie des climatisations dépend du type d'équipement mis en place. Il n'y a pas de maintenance annuelle pour ces équipements qui subissent une opération de maintenance dès lors que la quantité de fluide réfrigérant contenue est en deçà d'un certain seuil. Par ailleurs, ces équipements ne nécessitent pas de décharge 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 [1130] par équipement sont listées ci-dessous :

Tableau 29 : Récapitulatif des modes de maintenance des équipements de la climatisation stationnaire

Sector	Subsectors	Rythme de maintenance	Seuil
CHILLERS	Centrifugal compressors	selon seuil	95%
	Small chillers	selon seuil	90%
	Mid-size chillers	selon seuil	90%
	Large chillers	selon seuil	90%
AIR-TO-AIR AIR CONDITIONERS	Small splits	selon seuil	90%
	Multi-splits	selon seuil	90%
	Large split systems (Central AC)	selon seuil	90%
	Roof-top units	selon seuil	80%
	DRV	selon seuil	80%
	Mobiles	selon seuil	10%
	Windows	selon seuil	70%
	Consoles	selon seuil	70%
	Cabinets	selon seuil	70%
HEAT PUMPS	Air-to-water heat pumps	selon seuil	90%
	Water-to-water heat pumps	selon seuil	90%
	Ground-to-water heat pumps	selon seuil	90%
	Ground-to-ground heat pumps	selon seuil	90%
	Heat pump water heaters	selon seuil	10%

Durée de vie moyenne

La durée de vie moyenne des équipements provient des rapports d'inventaire d'émissions de fluides frigorigènes [207]. Celle-ci va influencer sur le profil de la courbe de durée de vie. Le tableau ci-dessous en récapitule les valeurs :

Tableau 30 : Durées de vie moyennes des équipements de la climatisation stationnaire

Sous-secteur	Durée de vie (ans)
Climatiseurs mobiles	10
Climatisation de fenêtre	10
Mono split	15
Multi split	15
Armoires verticales	15
DRV (Débit Réfrigérant Variable)	15
Large split	15
Roof top	20
Armoires spéciales	15
Chillers P < 50 kW	15
Chillers 50 < P < 350 kW	15
Chillers P > 350 kW	20
Compresseur centrifuge	25
PAC Air/Eau	15
PAC Eau/Eau	15
PAC Sol/Eau	15
PAC Sol/Sol	15
CET	15

Données d'activités

Marchés

Climatisation à air

Pour la plupart des équipements, les marchés détaillés par gamme de puissance et par type de fluide frigorigène utilisé sont transmis par la fédération de fabricants Uniclimate au Citepa, de façon confidentielle, chaque année depuis 2018 [1410]. Pour cette raison les valeurs ne sont pas communiquées dans le rapport.

Les marchés historiques (avant 2000) ont été reconstitués à partir :

- Des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes (édition 1999 notamment) pour la période 1993 – 1999 [207] ;
- D'hypothèses sur les taux de croissance par équipement avant 1993 ;
- D'informations des fabricants sur le début de mise sur le marché en France de certains équipements (notamment DRV et Rooftop) [1402].

Les données de marchés par équipements ont été communiquées par Uniclimate [1129] pour les années les plus récentes (à partir de 2000 pour la majorité des équipements). La représentativité des adhérents d'Uniclimate a donc été estimée à 92% à l'exception du sous-secteur des rooftops pour lesquels le marché national a été estimé directement. Pour ces derniers, les adhérents d'Uniclimate ne sont pas assez représentatifs de ce sous-secteur (moins de la moitié du marché estimé) et les marchés français sont transmis par le fabricant Lennox à partir de 2015 [1402]. Avant 2015, pour estimer le marché total français, le niveau de marché de 2015 de Lennox est utilisé avec les variations interannuelles des marchés Uniclimate.

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

Dans le cadre l'inventaire 2022, l'évolution du marché des climatiseurs mobiles a été revue depuis 2010, sur la base de la donnée confidentielle du marché 2022 transmise par le Gifam [1410]. Cela conduit à une augmentation du marché 2020

d'un facteur 6. Cela aura cependant peu d'impact sur les émissions étant donné les faibles charges de ces équipements et le passage aux hydrocarbures, progressivement de 2016 à 2020.

Chillers (ou groupes refroidisseurs à eau)

Chaque année, Uniclimate communique au Citepa, de façon confidentielle, les marchés des chillers à compresseur volumétrique (condensation à eau, condensation à air et condensation par ventilateur centrifuge) par gamme de puissance ($P < 7 \text{ kW}$; $7 < P < 17,5 \text{ kW}$; $17,5 < P < 50 \text{ kW}$; $51 < P < 100 \text{ kW}$; $101 < P < 200 \text{ kW}$; $201 < P < 350 \text{ kW}$; $351 < P < 500 \text{ kW}$; $501 < P < 700 \text{ kW}$; $701 < P < 900 \text{ kW}$; $P > 900 \text{ kW}$) et par type de fluide frigorigène [1402], ce qui permet d'avoir des informations fines sur ce parc d'équipements en France.

Historique (avant 2002) :

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) [207] ;
- Du rapport RTOC 2002 pour l'année 1999 [1405] ;
- 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 [207] et d'une estimation du taux d'accroissement pour les années antérieures (basée sur l'évolution des marchés entre 2001 et 2002).

Les données de marchés par type de chillers ont été communiquées par Uniclimate [1129] pour les années les plus récentes (à partir de 2002). Celui-ci a été corrigé de 8% pour tenir compte du fait que tous les acteurs du marché ne sont pas adhérents à la fédération. La représentativité des adhérents d'Uniclimate a donc été estimée à 92%, comme pour les équipements de climatisation à air.

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 ($P < 7 \text{ kW}$; $7 < P < 17,5 \text{ kW}$; $17,5 < P < 50 \text{ kW}$; $51 < P < 100 \text{ kW}$; $101 < P < 200 \text{ kW}$; $201 < P < 350 \text{ kW}$; $351 < P < 500 \text{ kW}$; $501 < P < 700 \text{ kW}$; $701 < P < 900 \text{ kW}$; $P > 900 \text{ kW}$) permettant d'avoir des informations fines sur ce parc d'équipements en France.

Les marchés des compresseurs centrifuges proviennent des anciens rapports d'inventaires de fluides frigorigènes de Mines-ParisTech [207]. Celui-ci se situe autour des 50 unités par an depuis le début des années 2000.

Pompes à chaleur résidentielles

Il est supposé que le marché des PAC a démarré en 1996. Les marchés historiques, avant 2002, proviennent de deux sources :

- De l'association française pour la pompe à chaleur AFPAC [1131] ;
- Des rapports d'inventaires de fluides frigorigènes [207] ;

Avant 2002, l'AFPAC communique les marchés agrégés des PAC Air/Eau et géothermie. La répartition de 2002 entre PAC Air/Eau et PAC géothermique a été utilisée pour estimer ces marchés. Cette répartition est d'environ un tiers de PAC Air/Eau et deux tiers de PAC géothermique. A l'intérieur de la catégorie PAC géothermique, la répartition des marchés entre PAC Sol/Eau, PAC Eau/Eau et PAC Sol/Sol a été estimée sur la base des informations indiquées dans les rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [207].

A partir de 2002, l'AFPAC distingue les marchés des PAC Air/Eau des marchés des PAC géothermiques.

Les marchés totaux des PAC Air/Eau proviennent donc directement des données de l'AFPAC jusqu'en 2013 où les marchés sont communiqués par Uniclimate [1129] pour différentes gammes de puissance (les données de marché total entre Uniclimate et l'AFPAC sont cohérentes). Aucun facteur correctif n'est appliqué sur les marchés AFPAC, il est supposé être représentatif du marché français.

Les marchés par type de PAC géothermiques ont été reconstitués en utilisant les rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [207] jusqu'en 2007 puis les données Uniclimate à partir de 2008, les données de l'AFPAC servant à reboucler sur le marché total des PAC géothermiques.

Les données de marchés des chauffe-eaux thermodynamique sont également issues de l'AFPAC [1131] et d'Uniclimate [1129]. Ce marché a démarré en 2008.

Productions

Climatisation à air

Les modes de charge des différents équipements de la climatisation à air déterminent le type de données d'activités à utiliser pour le calcul des émissions à la charge des équipements. En effet, pour les équipements chargés d'usine, les **productions d'équipements** seront utilisées en données d'entrées tandis que pour les équipements chargés sur site, la connaissance du **marché** permettra d'évaluer la demande en fluides frigorigènes pour les équipements neufs. De manière générale, les équipements de grandes puissances sont chargés sur site ou avec un complément de charge sur site et ceux de petites puissances en usine.

Le tableau suivant récapitule les modes de charge pour chaque équipement :

Tableau 31 : Récapitulatif des modes de charge des équipements de la climatisation à air

Sous-secteur	Niveau de puissance	Mode de charge
Climatiseurs mobiles	1 kW < P < 2 kW	Chargé en usine
Climatisation de fenêtre	2 kW < P < 3 kW	Chargé en usine
Mono split	P < 17,5 kW	Chargé en usine
Multi split	P < 17,5 kW	Chargé sur site + complément de charge sur site
Armoires verticales	P > 17,5 kW	Chargé sur site
DRV (Débit Réfrigérant Variable)	P > 17,5 kW	Chargé en usine + complément de charge sur site
Large split	P > 17,5 kW	Chargé en usine + complément de charge sur site
Roof top	P > 17,5 kW	Chargé en usine
Armoires spéciales	P > 17,5 kW	Chargé sur site

Les productions annuelles en France par type d'équipement ne sont pas collectées par une fédération. Par conséquent, ces valeurs sont estimées sur la base de certaines hypothèses :

- Ratios de production d'équipements par rapport au marché (les valeurs sont extraites dans les rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [207], ces ratios sont calculés sur l'année 2004 : 6% du marché pour les climatisations mobiles, 23% pour les climatisations fenêtres, 6% pour les mono-split, 10% pour les multi-split et entre 127% et 170% pour les Rooftop suivant la période) ;
- Communications de certains fabricants d'équipements (les DRV n'ont pas été fabriqués en France mais sont importés, les climatisations mobiles et fenêtres ne sont plus produites en France, hypothèse prise à 2010 pour les climatisations mobiles et 2017 pour les climatisations fenêtres).

Chillers

Les chillers sont chargés en usine. La donnée d'activité à prendre en compte est donc le nombre d'équipements produits par an, en distinguant les différents types de chillers (compresseur volumétrique vs compresseur centrifuge) ainsi que la puissance.

Le tableau suivant récapitule les modes de charge pour chaque équipement :

Tableau 32 : Modes de charge des chillers

Sous-secteur	Niveau de puissance	Mode de charge
Chiller basse puissance	50 kW < P	Chargé en usine
Chiller moyenne puissance	50 kW < P < 350 kW	Chargé en usine
Chiller forte puissance	P > 350 kW	Chargé en usine
Compresseur centrifuge		Chargé en usine

Les productions annuelles par gamme de puissance en France ne sont pas collectées par une fédération. Par conséquent, ces valeurs sont estimées comme suit à partir de ratios de production d'équipements par rapport au marché et dépend de la période considérée et de la puissance des équipements.

Pompes à chaleur

A l'instar de certaines climatisations à air et des chillers, les PAC sont chargées d'usine. La donnée d'activité à prendre en compte est donc le nombre d'équipements fabriqués en France par an, en distinguant les différents types de PAC.

Le tableau suivant récapitule les modes de charge pour chaque équipement :

Tableau 33 : Modes de charge des pompes à chaleur résidentielles

Sous-secteur	Mode de charge
PAC Air/Eau	Chargé en usine
PAC Eau/Eau	Chargé en usine
PAC Sol/Eau	Chargé en usine
PAC Sol/Sol	Chargé en usine
CET	Chargé en usine

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 [207] qui stipule que la production de PAC est équivalente à 10% du marché excepté pour les PAC Air/Eau où elle est estimée à 30% du marché (le taux initial de 60% indiqué dans le rapport a été revu à la baisse).

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

Charge

On distingue trois cas dans l'inventaire pour estimer les quantités de réfrigérants dans les équipements :

1. Directement à partir de la charge moyenne :

La charge moyenne représente la quantité de fluides frigorigènes présente dans un équipement de climatisation. Cette quantité dépend du type d'équipement mais peut également dépendre du réfrigérant utilisé. Les équipements appartenant à cette catégorie sont les armoires spéciales (cabinets), les armoires verticales (consoles), les large splits, les climatisations mobiles, les climatisations fenêtres et les pompes à chaleur. Cette quantité est généralement considérée constante au cours du temps excepté pour les large splits dont la charge est supposée avoir progressivement diminué à partir de 2002 suivant le modèle d'une courbe en S.

A noter qu'il serait possible d'affiner cette charge moyenne en utilisant les marchés par gamme de puissance pour les PAC Air/Eau. En effet, Uniclimate communique annuellement ces marchés pour 5 gammes de puissance depuis 2007 [1410]. En croisant ces données avec des ratios de charge pour ces mêmes gammes de puissance, il sera possible de faire varier annuellement la puissance moyenne des équipements.

Les valeurs utilisées de la charge moyenne dans les divers équipements sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 34 : Niveaux de charge moyenne (kg) des équipements de climatisation stationnaire en 2024

Sous-secteur	Charge moyenne (kg)
Climatiseurs mobiles	0,5
Climatisation de fenêtre	0,6
Armoires verticales	2,8
Large split	de 9 en 2001 à 5 en 2016
Armoires spéciales	18
PAC Air/Eau	3,5
PAC Eau/Eau	2,5
PAC Sol/Eau	15
PAC Sol/Sol	15
CET	0,5

Ces valeurs proviennent d'enquêtes auprès de fabricants et sont listées dans les rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [207].

Remarque : les charges moyennes estimées sont incluses dans l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 (entre 0,5 kg et 100 kg) [1411].

2. A partir de ratio de charge :

Quand le marché d'équipements est connu par gamme de puissance, il peut être plus précis d'utiliser un ratio de charge. Le ratio de charge représente la quantité de fluides frigorigènes (kg) par unité de puissance dans un équipement de climatisation. Ces ratios de charge ont été communiqués par les fabricants d'équipements, parfois par fluide. Connaissant les marchés d'équipements par gamme de puissance, il a été possible de calculer finement une charge moyenne pour les mono-split, multi-split, DRV et rooftop. La charge moyenne des chillers à compresseur volumétrique est calculée en fonction des marchés par gamme de puissance et des ratios de charges transmis par les fabricants d'équipements pour certaines gammes de puissance. La charge moyenne des réfrigérants pour les compresseurs centrifuge est issue des rapports d'inventaires de fluides frigorigènes [207] à partir de 2008 (0,3 kg/kW). Elle est supposée constante pour les années suivantes. Avant 2008, on utilise le ratio indiqué dans le RTOC 2002 [1405] (0,40 kg/kW).

La formule ci-dessous est donc utilisée pour les différentes gammes de puissances disponibles.

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

Les marchés disponibles par gamme de puissance utilisés pour les différents équipements sont communiqués par Uniclimate [1410] et sont les suivants :

Tableau 35 : Gammes de puissance des équipements de la climatisation stationnaire (en kW)

Sous-secteur	Gamme de puissance (kW)					
Mono-split	< 2,7	2,7 < P < 5	5 < P < 7	7 < P < 12	12 < P < 17,5	
Multi-split	< 2,7	2,7 < P < 5	5 < P < 17,5			
Rooftop	< 17	17 < P < 29	29 < P < 72	72 < P < 120	> 120	
VRV	0 à 5 CV	6 à 10 CV	11 à 20 CV	21 à 30 CV	31 à 40 CV	41 à 48 CV
Chiller basse puissance	< 7	7 < P < 17,5	17,5 < P < 50			
Chiller moyenne puissance	50 < P < 100	101 < P < 200	201 < P < 350			
Chiller forte puissance	351 < P < 500	501 < P < 700	701 < P < 900	> 900		

Le ratio de charge moyen est calculé annuellement à partir de 2000 pour les mono-splits et multi-splits, 2001 pour les rooftop et 2004 pour les VRV. Avant ces dates, la répartition des marchés par gamme de puissance n'est pas connue, la dernière répartition calculée est donc utilisée pour les années antérieures.

A noter que cette charge peut varier en fonction du type de réfrigérant, c'est le cas pour les rooftop. Par exemple, selon un fabricant d'équipement, la charge moyenne de R-410A dans un rooftop est de 17 kg alors qu'elle est de 26 kg pour le R-407C. De même, ce ratio continue à diminuer avec le R-32 (environ 15 kg). Cette particularité a été prise en compte dans les calculs en utilisant la part des réfrigérants installés dans les nouveaux équipements au cours du temps.

3. Avec complément de charge :

Certains équipements chargés d'usines nécessitent un complément de charge sur site. C'est notamment le cas des large-splits, des multi-splits et des VRV.

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

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

Réfrigérants

La réglementation (UE) N°517/2014 impose par ailleurs une interdiction de mise sur le marché des équipements de type splits dont le PRG > 750 à partir de 2025 et une interdiction des « portables » dont le PRG > 150 à partir de 2020.

Climatisation à air

Les transitions CFC vers HCFC puis HCFC vers HFC ont été prises en compte en fonction des réglementations. Les informations sur la répartition des réfrigérants entre 1970 et 1990 sont issues d'avis d'expert : une répartition 50%/50% est considérée en 1970 entre le R-12 et le R-22, 20%/80% en 1980 respectivement pour le R-12 et le R-22, et l'intégralité du marché des nouveaux équipements au R-22 est considérée à partir de 1990 ;

Le rapport RTOC (édition 2002) indique que presque tous les équipements de climatisations à air utilisaient du R-22 avant 2000. Ainsi, entre 1990 et 1999, il est considéré dans l'inventaire que 100% des équipements mis sur le marché ont utilisé du R-22. Le RTOC (édition 2002) indique par ailleurs qu'en Europe le R-407C a été utilisé au début principalement comme substitut du R-22, puis le R-410A. Ainsi, pour la majorité des équipements, l'hypothèse faite dans les inventaires, est un arrêt total du R-22 dans les nouveaux équipements à partir de 2002 avec un démarrage du R-407C en 2001.

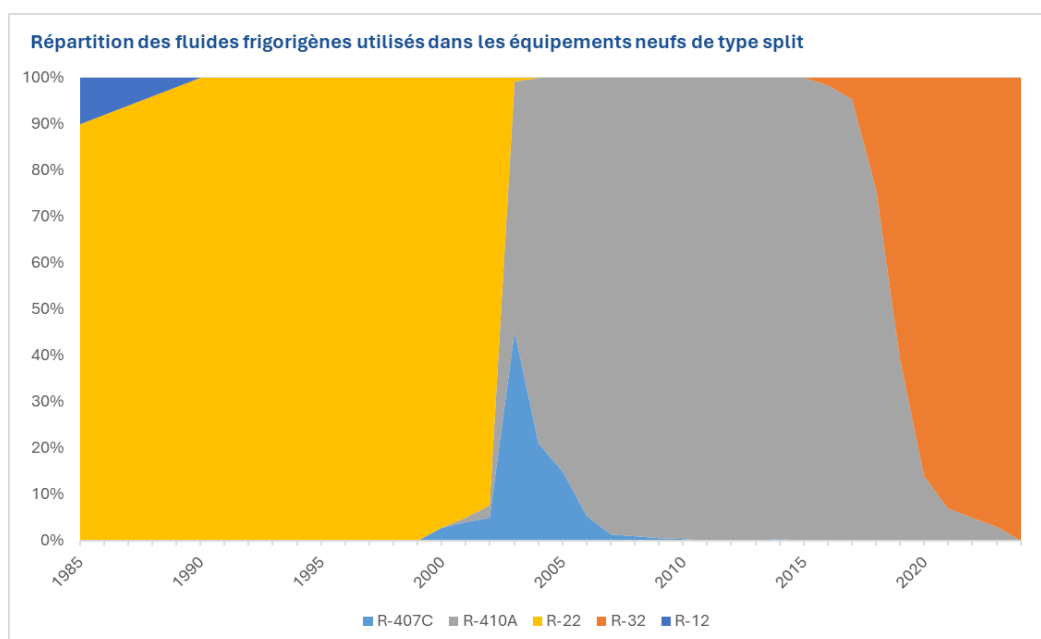
- Pour les années récentes, les données de réfrigérant ont été communiquées par Uniclimate [1129] (à partir de 2000 pour la majorité des équipements). Ces données annuelles ont été transmises pour les équipements suivants :
- Mono-split ;
- Multi-split ;
- Large split ;
- Rooftop ;
- VRV.

Pour les autres équipements, faute d'information disponible, les réfrigérants utilisés sont récupérés dans les différents rapports d'inventaire de fluides frigorigènes (de 1999 à 2016) [207] et sont linéarisés en cas de manque d'information. A partir de 2017, les données sont estimées sur la base des tendances des années précédentes.

Tableau 36 – principaux fluides frigorigènes utilisés sur le marché neufs des équipements en 2024

Sous-secteurs	Fluides frigorigènes en 2024
Mobiles	100% R-290
Windows	20% R-32 80% R-410A
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 R1234yf/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

Figure 18 – Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les systèmes splits



Chillers

Pour les chillers à compresseur volumétrique forte puissance ($P > 350$ kW), les informations sur la répartition des réfrigérants proviennent du rapport RTOC 1998 [1107] qui indique que la part du R-134a est équivalente à celle du R-22. Il a été supposé que l'année du démarrage du R-134a est 1995. Pour les chillers à compresseur volumétrique de faible et moyenne puissance, les données entre 1970 et 1990 sont issues d'avis d'expert : une répartition moitié/moitié est considérée en 1970 entre le R-12 et le R-22, 20%/80% en 1980 respectivement pour le R-12 et le R-22, et l'intégralité du marché des nouveaux équipements au R-22 est considérée à partir de 1990. Pour les compresseurs centrifuge, les données sont tirées des anciennes études d'inventaires de fluides frigorigènes [207] (répartition 70%/30% respectivement entre le R-12 et le R-11 de 1970 à 1985 puis apparition du R-22 toutefois mineure à environ 10%).

L'arrêt d'utilisation du R-22 dans les équipements de climatisation est lié à la réglementation européenne 2037/2000 qui, selon la puissance frigorifique des équipements de climatisation/chillers et pompes à chaleur, prévoit un arrêt de

production des équipements aux HCFC entre 2000 et 2004. Ainsi, pour les chillers de forte puissance, il a été supposé une production nulle des nouveaux équipements mis sur le marché avec du R-22 à partir de 2000, et 2003 pour les chillers de faible et moyenne puissance. Les réfrigérants de remplacement dans la gamme des petites et moyenne puissance ont été le R-407C et le R-410A, alors que le R-134a a été utilisé pour les chillers de forte puissance en plus du R-407C. La répartition entre le R-407C et le R-410A et leur année de démarrage a été faite en fonction des informations récupérées dans les rapports RTOC [1106], [1107], [1108], [1109] et à l'aide des données Uniclimate [1410] (faisant apparaître beaucoup plus de R-407C que de R-410A en 2002).

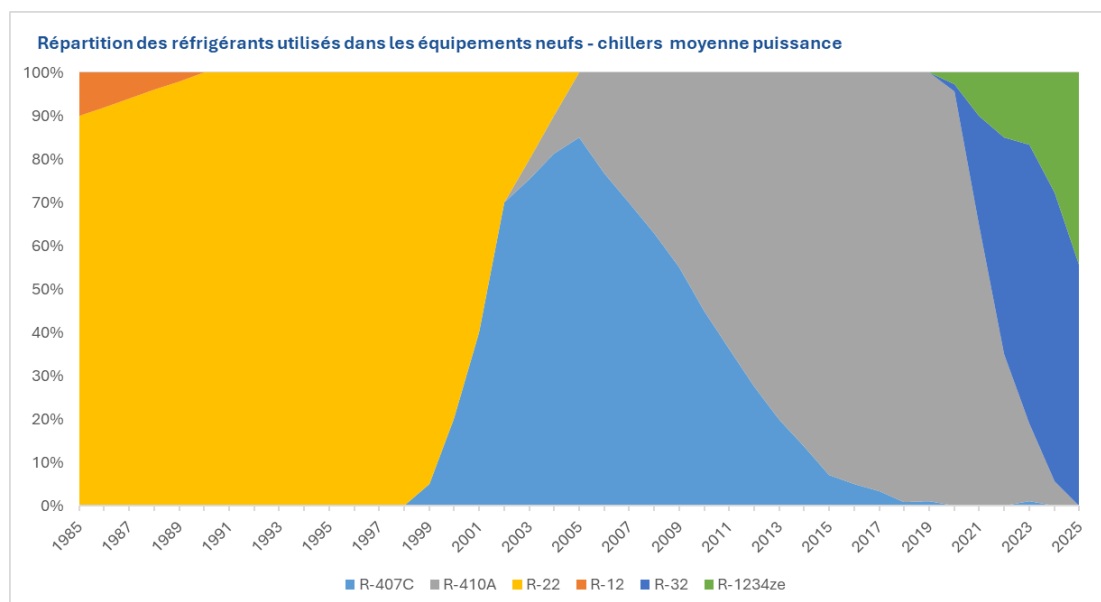
Pour les années récentes, pour les compresseurs centrifuge, les données sont tirées des anciennes études inventaires de fluides frigorigènes [207] (augmentation progressive du R-134a à partir de 1992 pour atteindre 100% du marché des nouveaux équipements en 1999).

Pour les chillers à compresseur volumétrique, les données de réfrigérant ont été communiquées par Uniclimate [1410] pour les années les plus récentes (à partir de 2002). Toutefois ces données ont nécessité un post-traitement car elles étaient représentatives des types de chillers à condensation (eau vs air) et non des gammes de puissance (format de restitution utilisé dans les inventaires). La méthode et les hypothèses utilisées pour passer d'un format à un autre est décrite ci-dessous :

- Le R-134a est utilisé uniquement dans les chillers de forte puissance (d'après les rapports d'inventaire des fluides frigorigènes) ;
- Une répartition identique des réfrigérants est utilisée pour les chillers de faible puissance et pour les chillers de moyenne puissance ;
- En 2018, l'apparition de nouveaux fluides à bas PRG s'est accrue, il a été considéré qu'ils sont utilisés dans les chillers de forte puissance, à répartition égale entre le R-32 (PRG = 750) et le R-1234ze (PRG = 1).

Pour les compresseurs de type centrifuge, les hypothèses concernant les réfrigérants utilisés sont issues des différents rapports d'inventaire de fluides frigorigènes.

Figure 19 – Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les chillers de type volumétrique de moyenne puissance

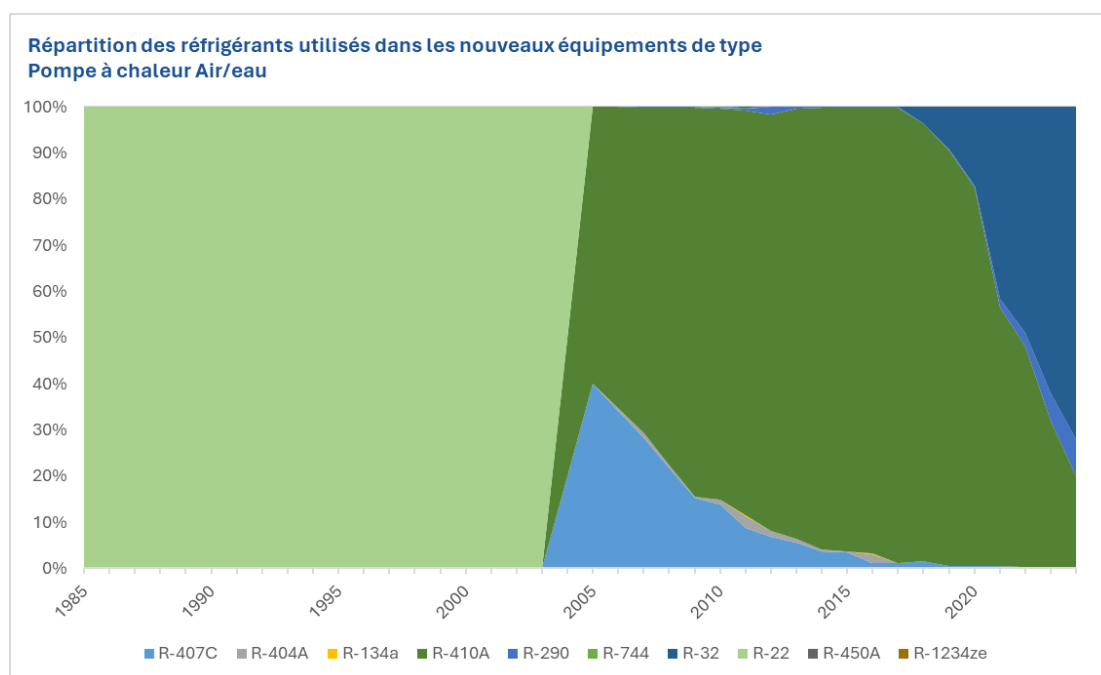


Pompes à chaleur

Le R-22 a été exclusivement utilisé dans les pompes à chaleur avant les années 2000. La réglementation n°2037/2000 interdit la production d'équipement au R-22 à partir du 1er janvier 2004 pour les PAC. Pour toutes les PAC, il a été supposé un arrêt sur deux ans à partir de 2002 et que le R-22 n'est plus utilisé depuis 2004 dans les nouveaux équipements mis sur le marché.

Pour les années récentes, les données sur les réfrigérants utilisés montrent la progression du R-32 et le début d'utilisation du propane (R-290), elles proviennent d'Uniclima [1410] à partir de 2006 pour les PAC Air/Eau et à partir de 2008 pour les PAC à géothermie. Avant ces dates, les données proviennent des anciens rapports d'inventaire de fluides frigorigènes de Mines-ParisTech [207].

Figure 20 – Evolution des fluides frigorigènes utilisés dans les pompes à chaleur air/eau



Le R-134a a été le principal fluide frigorigène utilisé dans les chauffe-eau thermodynamiques (CET), jusqu'en 2018. Depuis le R-290 et le R-32 et, plus récemment le R-513A, ont été progressivement introduits sur le marché et remplacent le R-134a dans les nouvelles installations.

Facteurs d'émission

A la charge

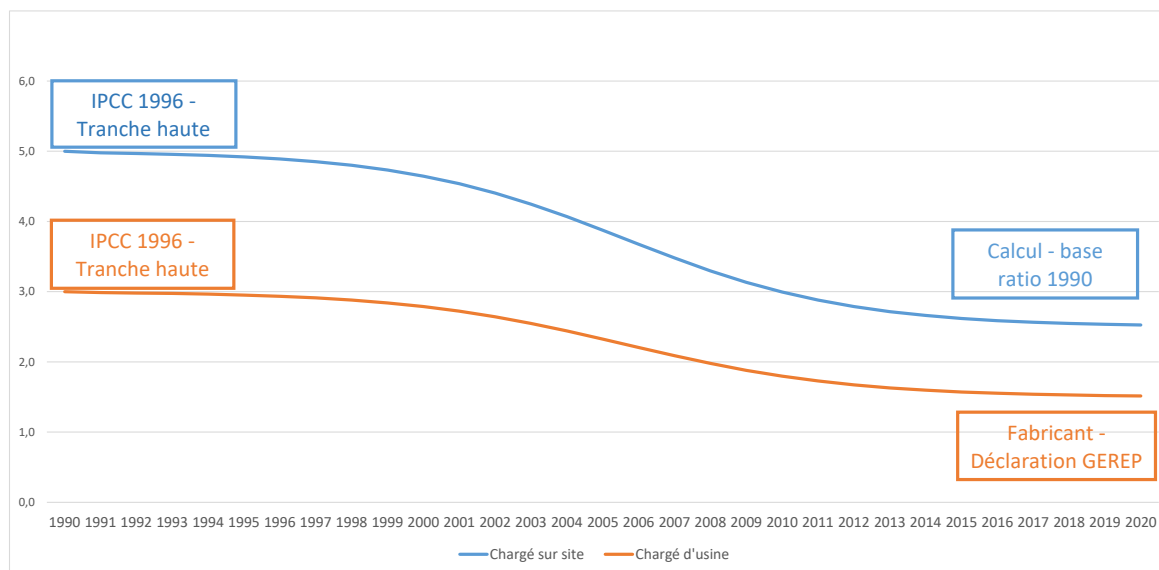
Pour estimer les facteurs d'émission à la charge, on distingue si les équipements sont chargés d'usine ou sont chargés sur site.

Les facteurs d'émission à la charge sont supposés évoluer selon une courbe en S. Celle-ci a été modélisée pour les deux modes de charges à partir d'une valeur seuil à atteindre à l'horizon 2015 afin de prendre en compte l'amélioration continue des pratiques et maîtrises des charges d'équipements. La valeur asymptotique estimée pour l'année 2015 a été calculée à partir des données d'un producteur d'équipements en France (équipement chargé d'usine). Le taux de perte calculé est de l'ordre de 1,5%. Pour estimer le facteur d'émission des équipements chargés sur site en 2015, on utilise un ratio similaire entre les facteurs d'émission des équipements chargés sur site et chargés d'usine de 1990. Le taux de perte calculé est ainsi d'environ 2,5%. Ces courbes ont été consolidées pour l'inventaire 2020 et sont prolongées tendanciellement chaque année.

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

Remarque : les facteurs d'émission calculés montrent des valeurs supérieures à l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 [1411] (entre 0,2% et 1%).

Figure 21 : Facteur d'émission à la charge (en %)



Fugitif

Les taux d'émission pendant le fonctionnement de l'équipement sont également supposés évoluer selon une courbe en S basée sur un niveau de référence de 1990 et sur un niveau asymptotique atteint vers 2016.

Climatisation à air

Pour la majorité des équipements de climatisation, le facteur d'émission utilisé en 1990 provient de la tranche haute des Lignes directrices du GIEC 2006 [1411] (10%). Cette valeur est également utilisée pour les années antérieures à 1990. Les valeurs utilisées pour l'année 2016 varient en fonction du type d'équipement et sont extraites du rapport d'inventaire des fluides frigorigènes. A noter que le facteur d'émission de certains équipements commence sa décroissance à partir de 2001 (multi-split, console, cabinet).

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

Remarque : les hypothèses concernant les facteurs d'émission appartiennent bien à l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 [1411] (entre 1% et 10%).

Chillers

Pour tous les équipements, le facteur d'émission utilisé en 1990 provient de la tranche haute des Lignes directrices du GIEC 2006 [1411] (15%). Cette valeur est également utilisée pour les années antérieures à 1990. Les valeurs utilisées pour l'année 2016 varient en fonction du type d'équipement et sont extraites du rapport d'inventaire des fluides frigorigènes [207]. 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.

Remarque : les facteurs d'émission estimés pour les années récentes sont inclus dans l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 [1411] (entre 2% et 15%).

Pompes à chaleur

Pour tous les équipements, le facteur d'émission utilisé en 1990 provient de la tranche haute des Lignes directrices du GIEC 2006 (10%)[1411]. Cette valeur est également utilisée pour les années antérieures à 1990. Les valeurs utilisées pour l'année 2016 varient en fonction du type d'équipement et sont extraites du rapport d'inventaire des fluides frigorigènes [207]. Ces courbes d'évolution ont été établies sur la période 1990-2016 et la tendance est prolongée à chaque inventaire.

Remarque : les facteurs d'émission estimés pour les années récentes sont inclus dans l'intervalle proposé dans les Lignes directrices du GIEC 2006 [1411] (entre 1% et 10%) à l'exception des CET pour qui le même facteur d'émission que les équipements de réfrigération domestique est appliqué (0,01%).

Figure 22 : Facteur d'émission pendant la durée de vie – climatisation fixe (en %)

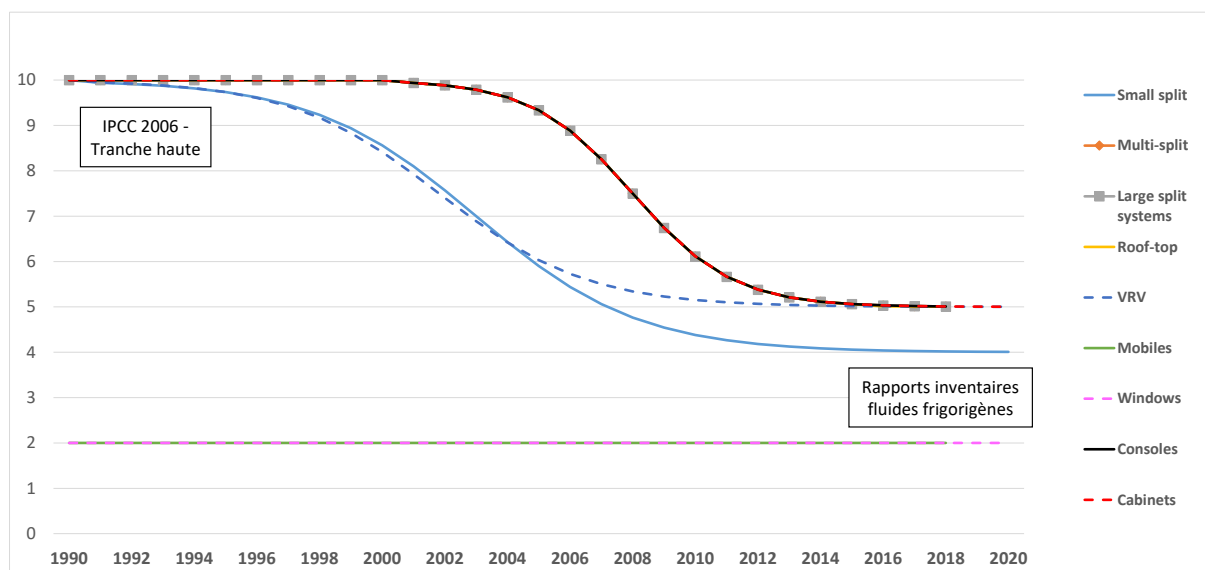


Figure 23 : Facteur d'émission pendant la durée de vie – chillers (en %)

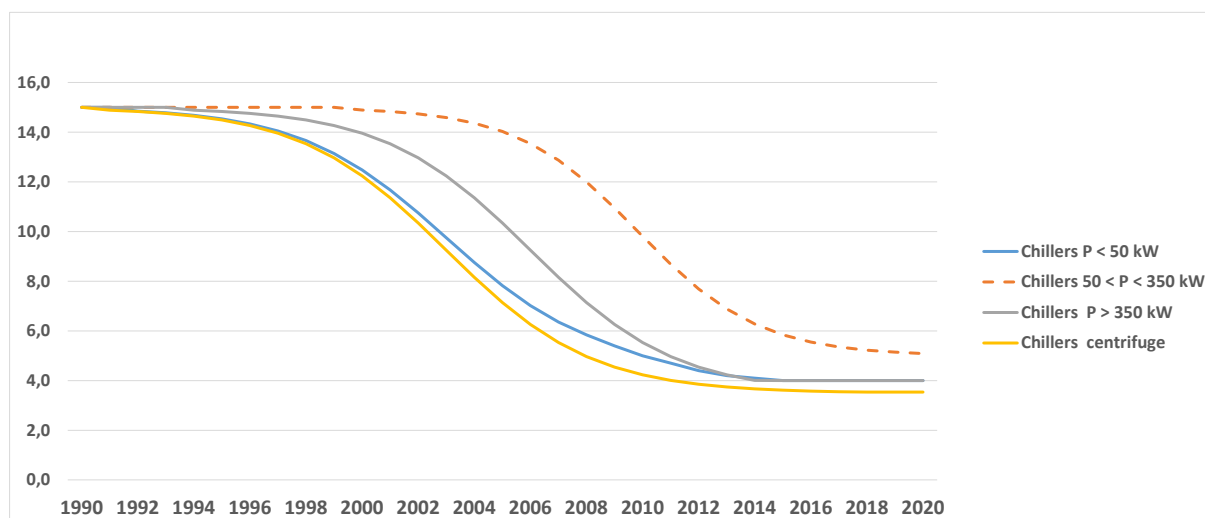
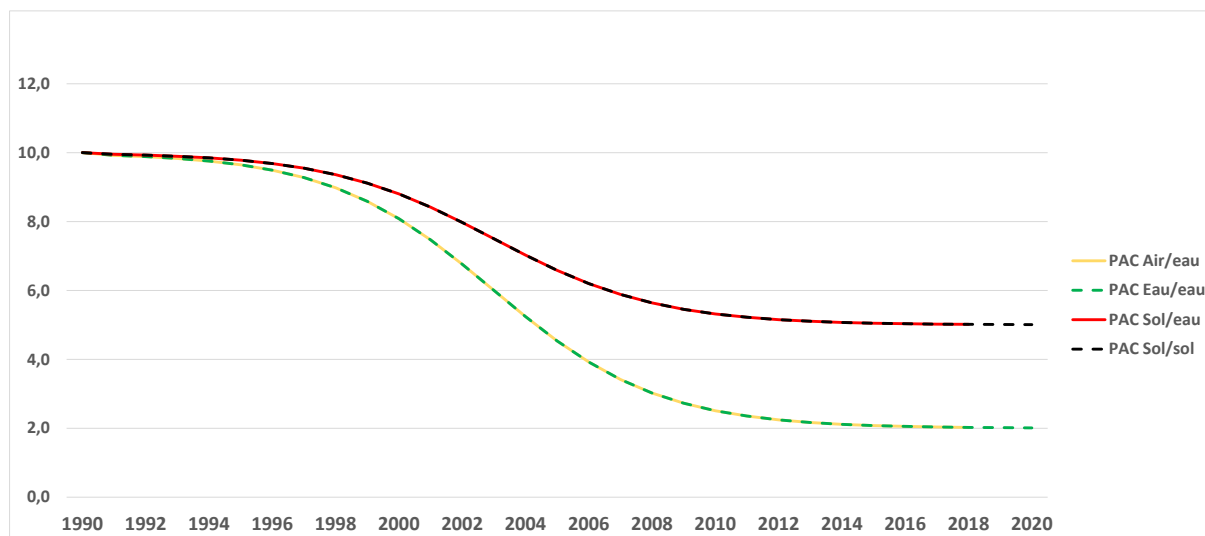


Figure 24 : Facteur d'émission pendant la durée de vie – pompe à chaleur (en %)



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. A noter, dans le cadre de l'amélioration de la méthode de calcul, 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, la charge de fin de vie tenant compte des émissions fugitives d'étant produites les années précédentes.

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

Modèle 1 :

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

Hypothèses de ce modèle :

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

Modèle 2 :

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

Hypothèses de ce modèle :

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

Modèle 3 :

Ce modèle est représentatif des grosses climatisations utilisées dans le tertiaire et pour lesquelles les interventions sont faites par les industriels. Les équipements concernés par ce modèle sont les climatisations de type VRV, rooftop et large split. Les chillers basse, moyenne et haute puissance sont également supposés suivre ce modèle.

Hypothèses de ce modèle :

- Année de démarrage : 1992 (correspond aux accords signés par la filière du froid avec le ministère et l'ADEME pour la récupération des fluides des équipements en fin de vie.) ;
- Taux de récupération estimé en 2030 : 90%.

Modèle 4 :

Ce modèle est représentatif des équipements utilisés dans les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Les équipements concernés par ce modèle sont les compresseurs centrifuge.

Hypothèses de ce modèle :

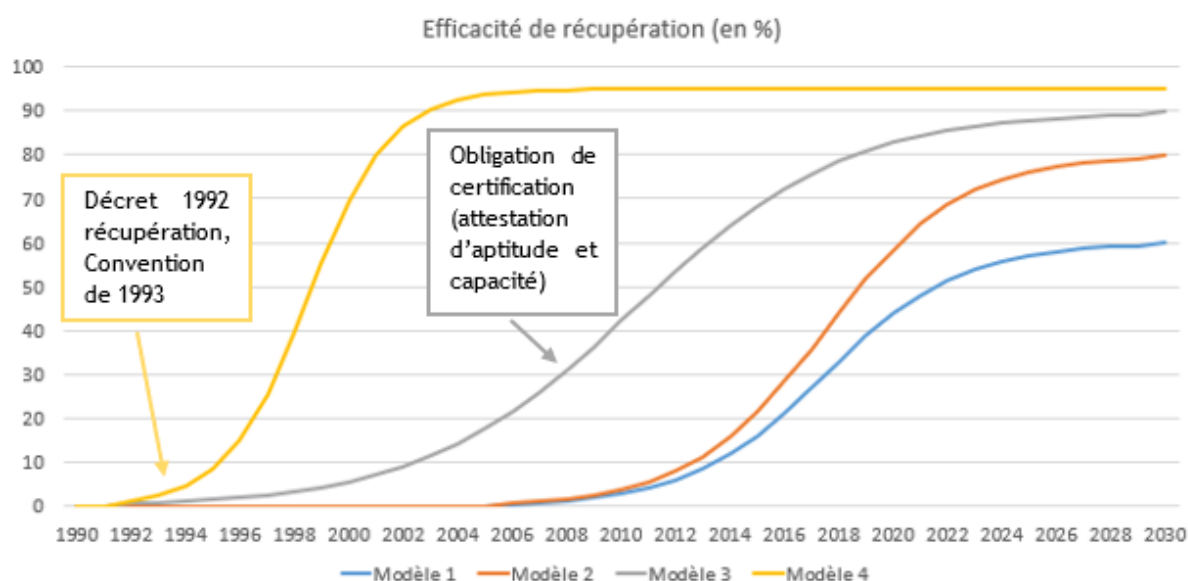
- Année de démarrage : 1992 (correspond aux accords signés par la filière du froid avec le ministère et l'ADEME pour la récupération des fluides des équipements en fin de vie.) ;
- Taux de récupération estimé en 2030 : 98%.

Le tableau ci-dessous résume les différentes caractéristiques des modèles :

Tableau 37 – Application des modèles de facteurs d'émission par type d'équipement

Modele	1	2	3	4
Année démarrage récupération	2006	2006	1992	1992
Estimation part de récupération horizon 2030	60%	80%	90%	98%
Equipements considérés	Mobiles Windows PAC	Consoles Cabinets Small split Multi-split	Chillers VRV Roof-top Large split system	Compresseur centrifuge

Figure 25 : Efficacité de récupération (en %)



Froid commercial

Structure du secteur

Le secteur du froid commercial est scindé en quatre sous-secteurs. Chacun de ces sous-secteurs regroupent des commerces dotés d'équipements de taille et de structure d'installations différentes.

- Le sous-secteur des hypermarchés regroupe les commerces de détail non spécialisés à prédominance alimentaire en magasin d'une surface de vente égale ou supérieure à 2 500 m².
- Les supermarchés regroupent les commerces de détail non spécialisés à prédominance alimentaire en magasin d'une surface de vente comprises entre 400 m² à 2 500 m².
- Le sous-secteur des groupes de condensation, système frigorifique de certains équipements (ex : chambre froide) des petits commerces.
- Les groupes hermétiques équipant certains équipements (ex : armoire réfrigérée) des petits commerces incluant les distributeurs automatiques.

Dans les années 60, au début des implantations des supermarchés, chaque poste de froid était équipé de son propre groupe frigorifique. Avec le succès croissant de ces commerces, l'implantation des grandes surfaces s'accéléra et la recherche de rentabilité fit apparaître le concept de « production frigorifique centralisée ». Ce type d'installation consiste à regrouper, dans une même salle de machines, plusieurs compresseurs raccordés sur un collecteur commun d'aspiration et un collecteur commun de refoulement. On trouve dans cette salle de machines, deux séries de centrales frigorifiques, l'une dit de froid positif (entre -10°C et -15°C) pour la conservation des produits frais et l'autre dit de froid négatif (aux environs de -35°C à -38°C) pour les produits surgelés. Il est à noter que 80% de la puissance frigorifique et 75% des charges de fluides se trouvent dans les centrales de froid positif.

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. Compte tenu de la similarité des équipements utilisés dans les bars, les hôtels et restaurants et les stations-services, ceux-ci sont rattachés aux petits commerces. Les distributeurs automatiques de boissons réfrigérées sont également pris en compte. Les magasins de type « Drive » sont également considérés dans l'inventaire. Enfin, concernant les maxi-discomptes dont les surfaces de vente réfrigérées sont nettement inférieures à celles des supermarchés, leurs installations frigorifiques s'apparentent à celles des supérettes.

Tableau 38 : Groupes de petits commerces par niveau de charge de réfrigérant

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

Généralités

Modes de charge

Les équipements de production de froid dans les commerces alimentaires de détail sont principalement chargés sur site sauf en ce qui concerne les groupes hermétiques qui sont chargés dans les usines de production des armoires et vitrines frigorifiques. Faute de données, on estime que la production des groupes hermétiques sur le territoire national est équivalente au marché.

Modes de maintenance

Etant donné les contraintes réglementaires impactant les équipements de plus de 300kg, il est pris en compte au moins une maintenance annuelle pour les supermarchés et les hypermarchés. En revanche pour les petits commerces, on considère que la maintenance intervient dès lors que la quantité de fluide réfrigérant contenu est en deçà d'un certain seuil, excepté pour les groupes hermétiques pour lesquels il est considéré qu'il n'y a pas de maintenance, le taux d'émissions étant quasi nul. Par ailleurs, ces équipements ne nécessitent pas de décharge complète du fluide mais généralement un complément de charge au cours de l'opération de maintenance. Ces pratiques sont prises en compte dans les hypothèses de calcul des émissions liées à la maintenance des équipements. Les différentes hypothèses retenues par équipement sont listées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 39 : Modes de maintenance des installations de froid commercial

Sous-secteur	Rythme de maintenance	Seuil	Décharge complète lors de la maintenance ?
Hypermarchés	annuelle	-	Non
Supermarchés	annuelle	-	Non
Groupes de condensation	selon seuil	70%	Non
Groupes hermétiques	selon seuil	5%	Non

Durée de vie moyenne

L'hypothèse de durée de vie moyenne des équipements est estimée sur la base des rapports d'inventaire de fluides frigorigènes [207] et les lignes directrices de 2006 du GIEC [1095]. Celle-ci va influencer sur le profil de la courbe de durée de vie. Pour tous les sous-secteurs du froid commercial, le renouvellement des installations des magasins est pris en compte en considérant une durée de vie des équipements de 15 ans.

Données d'activités

Marchés

Hypermarchés

Les quantités de fluides utilisées dans les hypermarchés sont estimées en fonction du parc de magasins. On fait l'hypothèse d'un ratio moyen de charge en fluide en kg/m^2 que l'on associe aux nouvelles surfaces d'hypermarchés en France en considérant un renouvellement de 15 ans des équipements.

Afin de reconstituer l'évolution du parc depuis 1970, plusieurs sources de données ont été considérées. Entre 1970 et 1980, diverses sources sont prises en compte et notamment une communication du groupe Nielsen [1119]. Entre 1980 et 2004 le parc utilisé dans l'inventaire reflète les données publiées par l'INSEE [1120], [1121], [1122], [1123]. Pour les données plus récentes (depuis 2007), le parc d'hypermarchés est construit à partir de la base de données de l'ACOSS, la caisse nationale des URSSAF recensant entre autres les différents types de commerces alimentaires de détail par code NAF [1124]. Les années manquantes pour lesquelles les informations sont indisponibles, sont estimées par interpolation.

Supermarchés

La méthode de calcul des quantités de fluides utilisés dans les supermarchés et similaire à celle présentée pour les hypermarchés.

Entre 1970 et 1992, le parc est reconstitué à l'aide des mêmes sources. Entre 1994 et 2016, les inventaires des Mines sont utilisés comme référence [207]. Enfin, le parc de supermarchés considéré en 2018 est issu d'une communication avec le LSA [1125], et celui de 2019 est issu d'une communication avec Perifem [1126].

Groupes de condensation

La banque de fluide frigorigènes dans les groupes de condensation des « petits commerces » est calculée en fonction des charges moyennes par type d'équipement et l'évolution du parc de magasins. Une charge moyenne par type de magasin (supérettes, drives, etc.) est estimée selon les résultats d'études de terrain réalisées par l'Ecole des Mines et dont les résultats sont détaillés dans les rapports d'inventaires [207].

Le parc de petits commerces, de supérettes, de magasins drive et de distributeurs est reconstitué, entre autres, à partir des rapports des Mines [207], de la base de données de l'ACOSS [1124], de sites retraçant l'évolution de divers secteurs du commerce alimentaire de détail et des bases de données de l'INSEE [1120], [1121], [1122], [1123].

Groupes hermétiques

La même méthode que pour les groupes de condensation est appliquée aux groupes hermétiques. La charge moyenne par type de magasin (supérettes, drives, etc.) est estimée sur la base d'études de terrain réalisés par l'Ecole des Mines et dont les résultats sont détaillés dans les rapports d'inventaires [207].

Productions

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

Charge

Pour les hypermarchés et supermarchés, la charge de fluide est exprimée en quantité par unité de surface (kg/m^2). Ces ratios ont été estimés à partir d'enquêtes de terrain et d'avis d'experts, incluant progressivement la réduction des charges via notamment l'introduction des systèmes indirects [207]. La courbe a été lissée, sur l'historique, avec un modèle de courbe en S

Figure 26 : Hypothèses d'évolution des ratios de charge surfaciques en super et hypermarchés

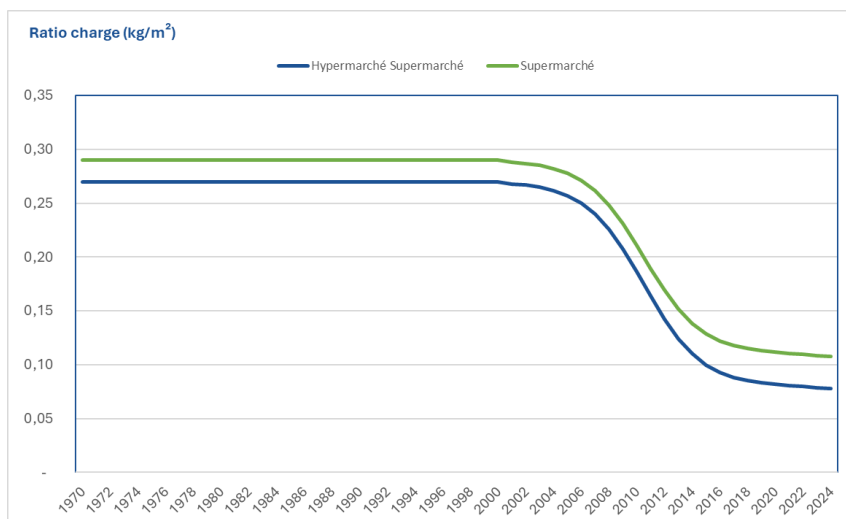


Tableau 40 – Ratios de charge surfaciques pour les sous-secteurs des supermarchés et hypermarchés

Charge de référence (kg/m ²)	Avant 2000	2024
Hypermarchés	0,27	0,08
Supermarchés	0,29	0,11

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

Tableau 41 – Charges moyennes par type de magasin pour les petits commerces

Charge de référence (kg)	Avant 2000	2024
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
Drives - Groupes de condensation	0	0
Drives - Groupes hermétiques	0,3	0,3
Distributeurs automatiques - Groupes de condensation	200	200
Distributeurs automatiques - Groupes hermétiques	0	0

Réfrigérants

Au cours du temps, plusieurs réfrigérants ont été utilisés dans les commerces alimentaires de détail : les substances appauvrissant la couche d'ozone (CFC et HCFC) ont été progressivement remplacées par les HFC. Ces derniers ayant des valeurs de PRG élevées, ils sont amenés à être remplacés par les HFO, des HFC à plus bas PRG, ou par d'autres fluides frigorigènes non fluorés ayant un faible impact sur le climat.

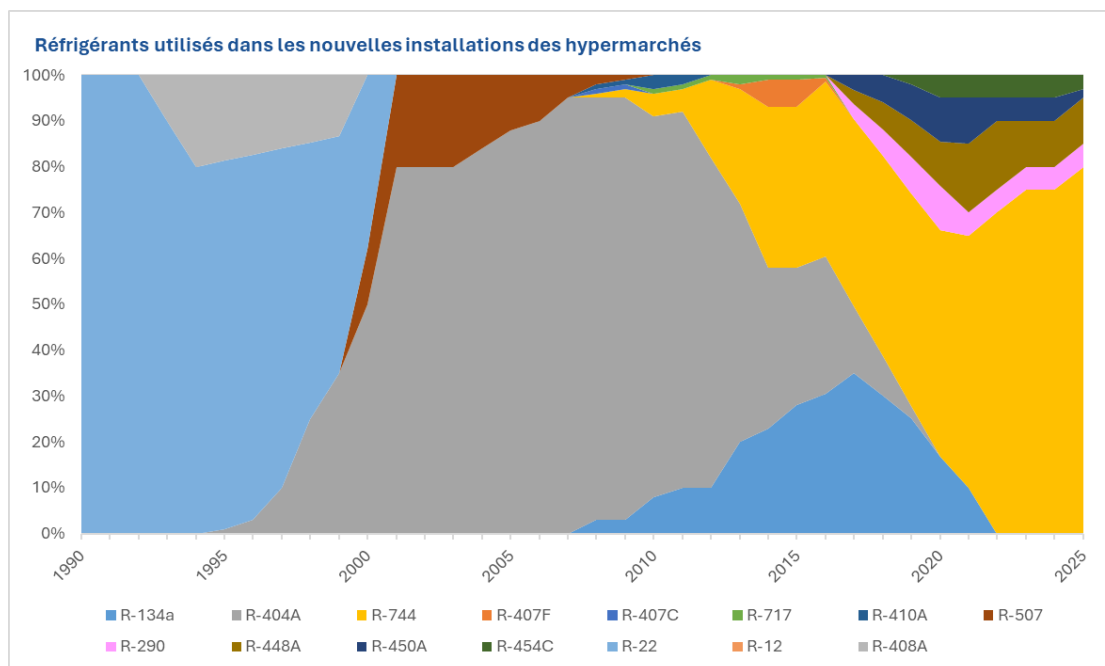
Hypermarchés

Entre 1970 et 1978, l'hypothèse est faite que les installations frigorifiques centralisées des hypermarchés utilisaient principalement le R-22 (entre 70% et 80%) et le R-12 (entre 20% et 30%). A partir du début des années 90, on considère que le R-22 constituait l'unique fluide utilisé dans les installations frigorifiques des hypermarchés. On estime qu'à partir du Plan Climat Européen de 1992, la part du HCFC-22 diminue au profit de mélanges de transition tels que le R-408A, puis majoritairement vers les HFC à fort PRG, le R-404A et le R-507 (qui restera minoritaire, pour des questions principalement commerciales). A partir de 2008 et le début de l'introduction des systèmes de type cascade, notamment R-134a/CO₂, la part du R-404A diminue. A partir de 2015, du fait de la nouvelle réglementation F-Gas et de l'interdiction programmée

d'utilisation du R-404A dans les équipements neufs à partir de 2022, de nouveaux fluides frigorigènes commencent à être introduits sur le marché, à plus bas PRG. Il est considéré que la part du R-404A diminue progressivement pour être nulle en 2020 au profit d'autres fluides : le R-744 principalement ainsi que le R-134a, R-448A, R-449A, R-450A et R-454C dans des proportions variables à partir de 2017. Une enquête réalisée auprès de l'AFCE a montré que les hypothèses de décroissance d'usage et de retrofits d'installations au R-404A avait été trop optimistes et que la banque résiduelle de R-404A en 2024-2025 était entre 30 et 50% de la banque des installations de super et hypermarchés. Les hypothèses ont été corrigées de façon à se rapprocher de résultats (figures 27 et 28).

Ces hypothèses ont été formulées en considérant les rapports d'inventaire des Mines [207], une communication de l'European Partnership for Energy and the Environment [1116] et l'évolution de la réglementation européenne ((EU) 517/2014).

Figure 27 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés en hypermarchés



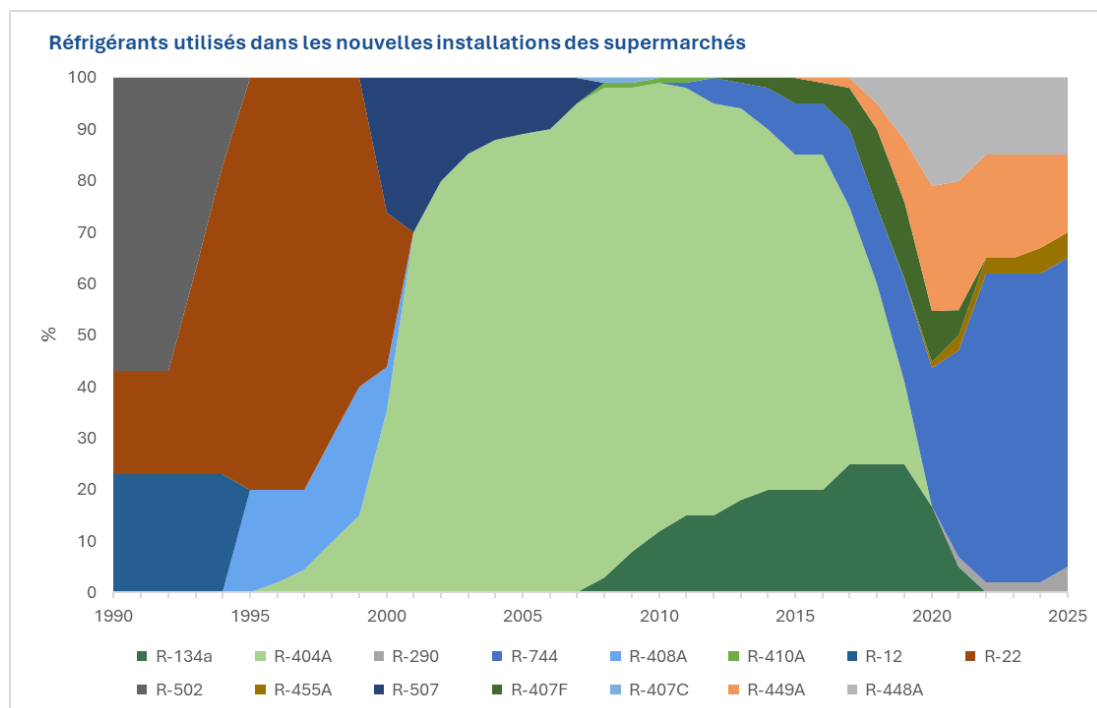
Supermarchés

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

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

Ces hypothèses ont été formulées en considérant les rapports d'inventaire de Mines-ParisTech [207], une communication de l'European Partnership for Energy and the Environment [1116] et l'évolution de la réglementation européenne.

Figure 28 : Evolution des fluides frigorigènes utilisés en supermarchés



Groupes de condensation

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

Entre 2000 et 2016, on considère une utilisation majoritaire du R-404A (plus de 95% en 2000 et 50% en 2016) et du R-134a (jusqu'à 50% en 2000), puis une diminution marquée jusqu'en 2021 du fait de l'utilisation progressive d'autres fluides à plus bas PRG le R-744, le R-407A, le R-448A, le R-450A et le R-454C.

Ces hypothèses ont été formulées en considérant les rapports d'inventaire des Mines [207], une communication de l'European Partnership for Energy and the Environment [1116], le rapport RTOC de 1998 [1107] et l'évolution de la réglementation européenne F-Gas.

Groupes hermétiques

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

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

Ces hypothèses ont été formulées en considérant les rapports d'inventaire des Mines [207], une communication de l'European Partnership for Energy and the Environment [1116] et l'évolution de la réglementation européenne F-Gas.

Facteurs d'émission

Le règlement F-Gas et la mise en place du phasedown imposant des quantités limitées de HFC, en tonnes de CO₂ équivalentes sur le marché européen, ont conduit à une pénurie des HFC de PRG élevé tels que le R-404A fortement utilisé en froid commercial. Cela a conduit à une surveillance accrue des fuites et à une amélioration de la récupération à la maintenance et en fin de vie des équipements car une partie des réfrigérants récupérés est utilisée en recyclage direct par

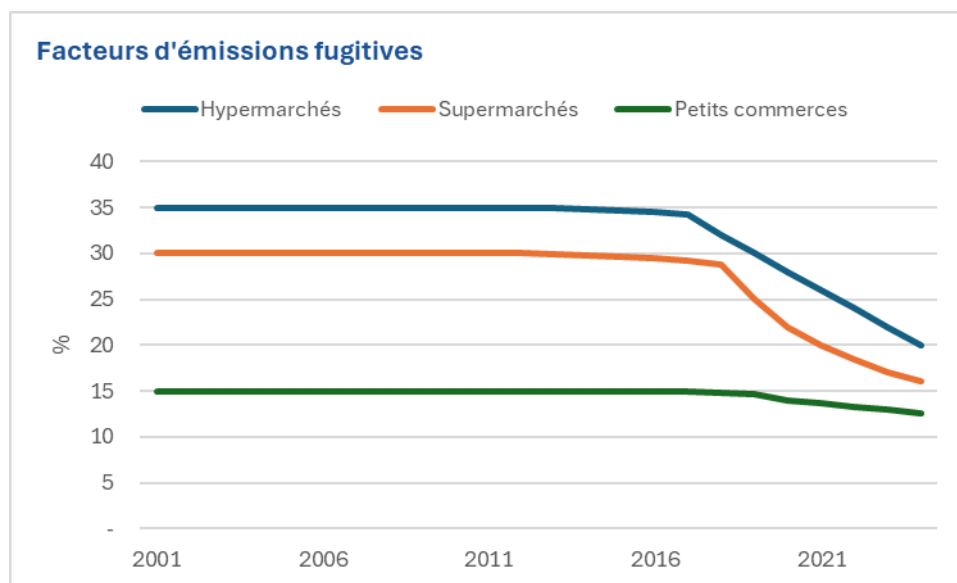
les opérateurs. Par conséquent, la diminution des taux d'émissions s'accroît depuis quelques années, en particulier dans le secteur du froid commercial qui a été marqué par les limitations d'usage du R-404A aux échéances 2020 et 2022.

A la charge

Pour estimer les facteurs d'émission à la charge, on distingue si les équipements sont chargés d'usine (groupes hermétiques) ou sont chargés sur site (hypermarchés, supermarchés et groupes de condensation). Les facteurs d'émissions utilisés sont issus des Lignes directrices du GIEC de 1996 [1118] et de 2006 [1095]. Pour les années antérieures à 1996 et les années après 2006, ils sont considérés constants.

Fugitif

Figure 29 : Evolution des facteurs d'émissions fugitives en froid commercial



Hypermarchés

A la suite de données issues d'enquête de terrains et de contrôles réalisés par le ministère de l'Environnement [207], des niveaux moyens ont pu être établis, régulièrement, sur un échantillon de magasins lors des études inventaires précédentes (2013-2016). Pour les années antérieures à 2013, on estime un taux d'émission fugitif constant de 35 %. Au-delà, on considère l'hypothèse d'une diminution de ce taux d'émission à hauteur de 20 % en 2024 [1127]. Concernant les années intermédiaires, on estime ce taux par interpolation. L'obligation de formation et de certification des personnels assurant la maintenance des installations a permis d'améliorer les pertes lors des opérations de maintenance et est ainsi prise en compte dans les hypothèses.

Supermarchés

La méthode de construction de la courbe des taux d'émission fugitifs pour le sous-secteur des supermarchés est similaire à celle des hypermarchés. Avant 2013, on estime un taux constant de 30%. Au-delà, on considère une diminution de ce taux d'émission à hauteur de 16% en 2024 [1127]. Concernant les années intermédiaires, on estime ce taux par interpolation.

Groupes hermétiques

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

Groupes de condensation

Pour les années antérieures à 2017, on considère un taux d'émission fugitif constant de 15%. Au-delà on construit une courbe de réduction en S qui pose l'hypothèse d'une diminution de ce taux à 10% en 2035. Le niveau 2024 est ainsi estimé à 12%.

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. A noter, dans le cadre de l'amélioration de la méthode de calcul, 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, la charge de fin de vie tenant compte des émissions fugitives d'étant produites les années précédentes.

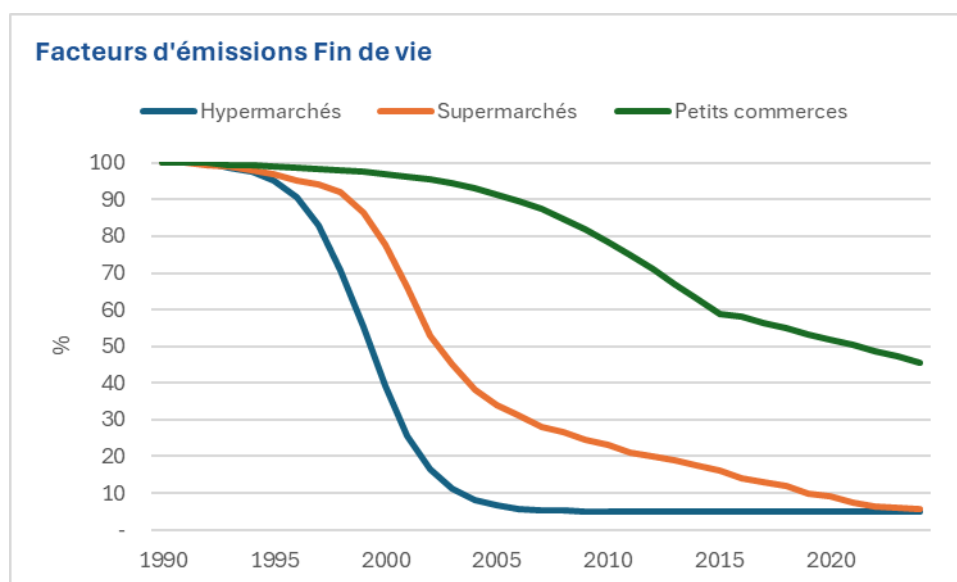
Concernant le secteur du froid commercial, ces facteurs ont été estimés avec un modèle de courbe en S comportant une année de démarrage de la récupération et une année asymptotique projetée en 2035.

Pour les hypermarchés et supermarchés, on considère une récupération nulle jusqu'en 1992 et un maximum d'efficacité supposé en 2035 à hauteur de 95% (soit un facteur d'émission de 5%). En 2024, on estime ce taux à plus de 94%.

Concernant les groupes de condensation, on considère une récupération nulle jusqu'en 1992 et un maximum supposé en 2035 à hauteur de 70%. En 2024, on estime le taux à de 54%.

Enfin, pour les groupes hermétiques, on estime une récupération nulle jusqu'en 2000 et un maximum supposé en 2035 à hauteur de 40%. En 2024, on estime le taux de récupération à près de 35%.

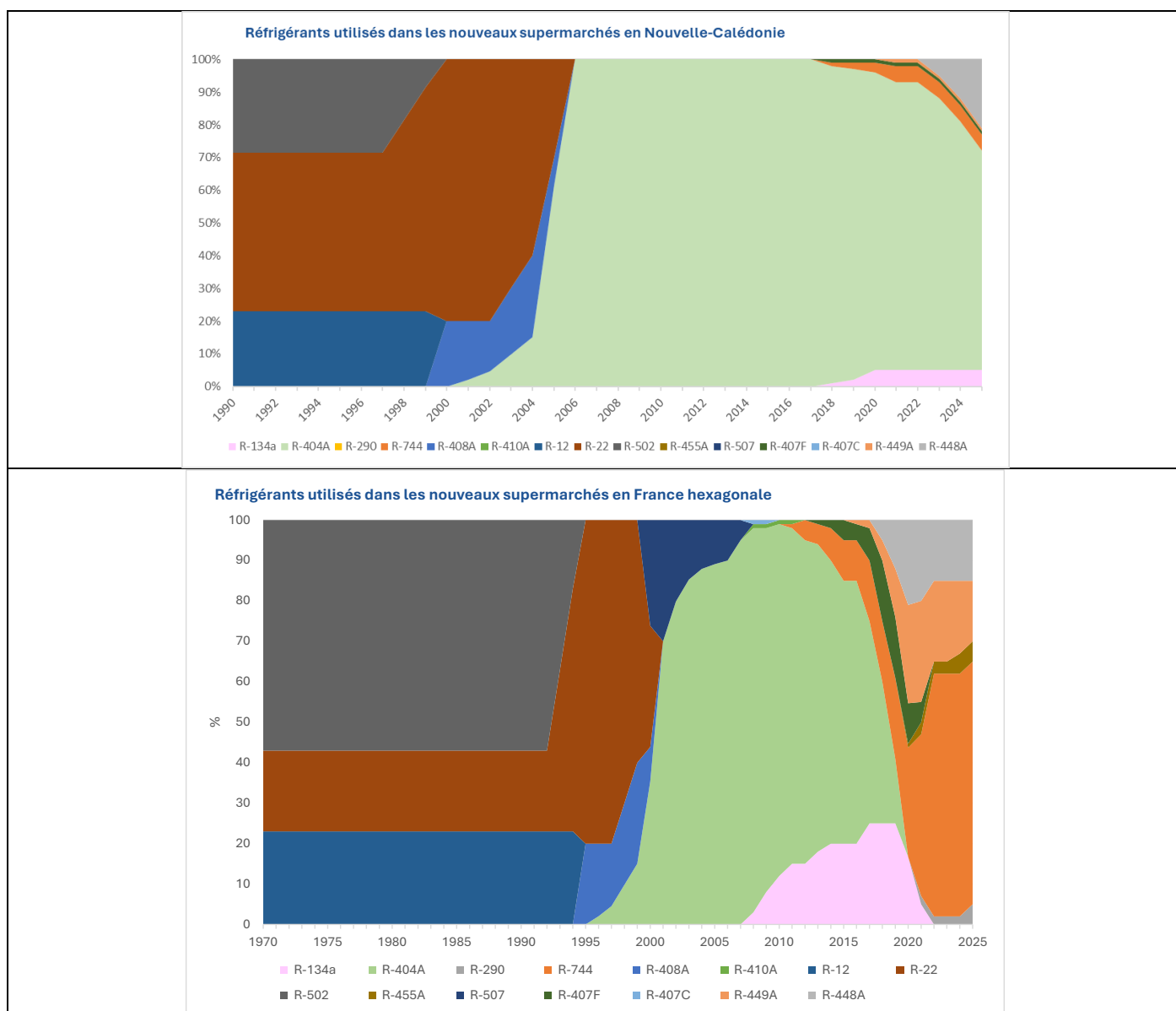
Figure 30 : Facteurs d'émissions en fin de vie des équipements du froid commercial



Cas des territoires d'outre-mer

Les hypothèses présentées dans les parties précédentes concernaient la France hexagonale. Dans le cas des territoires d'outre-mer, il s'agit de la même méthode de calcul mais certaines parties sont agrégées et certaines hypothèses sont estimées en fonction de celles de la France hexagonale.

Pour des questions de temps de calcul et de construction de bases de données, une première approche a consisté à construire une base de données commune aux territoires d'outre-mer hors UE, une autre pour les territoires dans l'UE, de réaliser un calcul avec la méthode présentée ci-avant et de décomposer les résultats par territoire au prorata des populations de chaque groupe. Les hypothèses de chaque base de données ont été consolidées à partir des statistiques disponibles et, pour l'évolution des fluides frigorigènes et des facteurs d'émissions, en prenant un décalage temporel de 15 ans avec la France hexagonale (exemples sur les figures ci-dessous).



Cette approche a été utilisée dans les études d’inventaire réalisées par Mines-ParisTech [207] jusqu’en 2017. A partir de 2018, les émissions des années suivantes ont été estimées par territoire, tendancielllement, en fonction de la tendance historique et en tenant compte des évolutions réglementaires et des transitions d’utilisation de fluides frigorigènes.

Depuis l’inventaire 2023, des bases de données sont progressivement construites par territoire de façon à calculer les émissions de chaque territoire avec le même outil que celui utilisé pour la France hexagonale. Pour l’inventaire 2023, les émissions calculées avec l’outil sont :

- Celles de la nouvelle Calédonie à la suite d’une étude réalisée en partenariat avec la DIMENC [1412]. La base de données a été renseignée pour l’ensemble des sous-secteurs, avec dans la plupart des cas des données d’activité disponibles. Les évolutions des fluides frigorigènes par secteur ont été estimées à partir de celles de la France hexagonale avec un décalage temporel de 10 ans, ou adaptée dans le cas de données disponibles. De même l’évolution des facteurs d’émission a été basée sur celle de la France hexagonale avec un décalage temporel.
- Celles des autres territoires d’outre mer hors UE ont été, à partir de cet inventaire, établies à partir des résultats de la Nouvelle-Calédonie au prorata de la population, étant donné la mise à jour réalisée pour ce territoire. Dans le cas de la Polynésie, pour laquelle une étude dédiée avait été réalisée en 2020, les résultats obtenus sur la période 2010-2017 ont été conservés.

- Celles de la Guadeloupe à la suite d'un premier cas test dans lequel la base de la Nouvelle-Calédonie a été dupliquée et les données de marchés établies au prorata des populations des deux territoires. Les secteurs de la climatisation automobile et des bus ont été calculées avec des données du territoire, celles-ci étant disponibles sur le site du CCFA [1413], ainsi que celles des super et hypermarchés, après des recherches spécifiques au territoire.
- Les émissions du secteur de la climatisation automobile pour chacun des territoires d'outre-mer dans l'UE étant donné que les immatriculations sont disponibles sur le site du CCFA et que les autres paramètres sont communs à tous les territoires : l'évolution des fluides frigorigènes utilisés dans les véhicules neufs dépendant de la réglementation et de choix des constructeurs automobiles au niveau mondial ; les charges nominales étant normalisées au niveau mondial. La prise en compte des véhicules d'occasion reste à étudier et les émissions de ce secteur pourraient être plus élevées.
- Pour les autres secteurs et territoires, les émissions sont toujours calculées à partir des résultats de l'inventaire 2018 et présentent une forte incertitude. Les améliorations seront poursuivies au cours des prochains inventaires ou à l'occasion d'études dédiées.

Date de mise à jour	Responsable	Date de validation	Vérificateur
15/01/2026	LG	02/02/2026	CV

Agents d'expansion des mousses

Des HFC sont utilisés en tant qu'agent d'expansion dans les mousses d'isolation pour diverses applications.

Correspondance dans divers référentiels :

CCNUCC / CRT	2.F.2
CEE-NU / NFR	Hors champs
SNAPc (extension Citepa)	06.05.04
CE / directive IED	Hors champs
CE / E-PRTR	Hors champs
CE / directive GIC	Hors champs

Approche méthodologique :

Activité	Facteurs d'émission
Production et consommation nationale estimée par secteur	Spécifique au pays et provenant des lignes directrices du GIEC 2006

Niveau de méthode :

Rang 2a.

Références utilisées :

- [19] Base de données du registre des émissions polluantes (BDREP) – Déclarations annuelles des émissions de polluants
- [520] EReI – Inventaires d'émissions de gaz fluorés dans le secteur d'activité des mousses d'isolation – décembre 2012
- [689] Etude isOlafrance sur la production de polyuréthane projeté
- [690] BASF - Communication confidentielle annuelle
- [691] Lignes directrices du GIEC 2006 – Volume 3 – Chapitre 7 – Tableaux 7.6 et 7.7
- [692] GIFAM - Communication confidentielle annuelle

Caractéristiques de la catégorie :

Les HFC se sont substitués aux HCFC au début des années 2000 à la suite de l'interdiction de l'usage de ces derniers. Les applications principales sont les suivantes :

- Chauffe-eau,
- Isolation des bâtiments,
- Transport frigorifique.

Il existe deux familles de mousses :

- les mousses à alvéoles fermées
 - Parmi les mousses à alvéoles fermées, deux types sont considérées :
 - Les mousses alvéolaires de type polyuréthane PU (panneau continu ou discontinu, polyuréthane projeté – Spray Polyurethane Foam ou SPF –, etc.)
 - Les mousses alvéolaires de type polystyrène extrudé (XPS).
- les mousses à alvéoles ouvertes
 - En France, deux types de mousses à alvéoles ouvertes ont été ou sont utilisées :
 - Les mousses à composant unique OCF
 - Les mousses à peau intégrée PU mises en œuvre notamment dans le secteur automobile pour la production de pièces moulées en polyuréthane tels que les volants ou les boîtes de vitesse).

Différents types de HFC sont utilisés en fonction du secteur d'application et de la famille de mousse. Le tableau suivant récapitule les agents d'expansion par secteur en France, les bâtiments incluant les mousses alvéolaires de type polystyrène extrudé et polyuréthane (SPF et panneau sandwich) :

Tableau 42 : Répartition des HFC en fonction de leurs secteurs d'application

Agent d'expansion	Chauffe-eau	Bâtiment	Transport frigorifique	OCF	Automobile	Production de systèmes polyuréthane
HFC-134a		x		X		x
HFC-227ea		x	x		x	x
HFC-365mfc		x	x		x	x
HFC-152a		x				
HFC-245fa	x	x	x			x
HC	x	x	x	x	x	
HFO-1233zd						x
HFO-1234ze	x	x				
HFO-1336mzz						x
CO ₂		x				

Les émissions de HFC ont lieu lors de la fabrication, pendant la durée de vie des équipements et en fin de vie. Les émissions en fin de vie sont apparues depuis 2015 dans le secteur des chauffe-eaux.

A partir de 2009, il n'y a plus d'émission de HFC associée aux mousses OCF après l'interdiction de mise sur le marché des HFC dans ce type d'application par le règlement n° 842/2006/CE relatif aux gaz fluorés.

Les émissions de HFC des formulateurs de systèmes polyuréthane sont également prises en compte.

Des fluides de 4ème génération, appelés HFC à bas PRG ou HFO, sont utilisés depuis peu dans ce secteur en remplacement des HFC. Les ventes de HFC à fort PRG (HFC-245fa et mélange HFC-365mfc/HFC-227ea) utilisés dans les applications autres que les mousses en polystyrène extrudé (XPS) sont en baisse depuis 2018, engendrées par la prochaine interdiction de mise sur le marché en 2023 des mousses contenant des HFC dont le PRG est supérieur ou égal à 150 par la réglementation F-gas n° 517/2014. De même, l'interdiction de mise sur le marché des HFC d'un PRG supérieur ou égal à 150 utilisés dans les mousses en polystyrène extrudé depuis le 1er janvier 2020 explique l'arrêt de l'utilisation du HFC-134a dans cette application en France depuis 2018.

Méthode d'estimation des émissions de gaz à effet de serre (NID) :

Emissions de Gaz fluorés

Les émissions sont estimées par application en différenciant les émissions à la production, pendant la durée de vie de l'équipement et en fin de vie.

Les mousses d'isolation ont des propriétés différentes selon qu'elles sont à cellules ouvertes ou à cellules fermées et selon le procédé de mise en œuvre.

Mousses à alvéoles fermées

Dans ce type de mousse, les HFC sont émis à la production, à l'usage et en fin de vie.

➔ SPF

La production de polyuréthane projeté (SPF) en France provient du Syndicat Français des techniques du polyuréthane Projeté (SFTPP) [689] pour 2013. Les projections faites à l'horizon 2018 ont été utilisées pour estimer les productions après 2013 et l'année 2019 en fonction de la tendance entre 2017 et 2018. Les HFC ont été consommés à partir du milieu des années 2000. La répartition des ventes par type de HFC est estimée à partir de données d'un formulateur de mousse de PU [690]. Les productions pour les années antérieures à 2013 ont été calculées à partir des tendances de ventes de HFC de ce même formulateur pour cette application.

Les émissions de HFC sont calculées, par type de HFC, en tenant compte de la masse des HFC contenus dans la production totale de polyuréthane projeté et à l'aide des facteurs d'émission des lignes directrices du GIEC 2006 pour la charge et pendant la durée de vie [691].

➔ Chauffe-eaux

Du HFC-245fa est utilisé dans les chauffe-eaux depuis 2000. Ce HFC n'est pratiquement plus utilisé depuis 2016, remplacé par le pentane et à un degré moindre par le HFO-1234ze. Le GIFAM (Groupement Interprofessionnel des Fabricants d'Appareils d'équipements Ménager) recense les ventes de chauffe-eaux en France. La majorité des produits vendus en France est fabriquée en France et il est considéré que les importations compensent les exportations. Le GIFAM a réalisé une enquête auprès de ses membres pour connaître le type d'agent d'expansion utilisé ainsi que la quantité de HFC par appareil depuis 2000 [692]. Les quantités de HFC consommés par les fabricants sont calculées en fonction du nombre de chauffe-eaux vendus, du type d'agent d'expansion et de la quantité de HFC injecté par appareil. Les émissions de fin de vie apparaissent à partir de 2015 où il est considéré que les HFC contenu dans les mousses des équipements ne sont pas récupérés.

Les émissions à la charge, pendant la durée de vie et en fin de vie, sont ensuite estimées à l'aide des facteurs d'émission des lignes directrices du GIEC 2006 [691].

➔ Bâtiments

Les panneaux de mousse de polyuréthane rigide pour l'isolation thermique des bâtiments, dont les principaux producteurs en France sont représentés au sein du Syndicat National des Polyuréthanes (SNPU) ne consomment pas de HFC comme agent gonflant.

Les mousses XPS utilisent du HFC-134a et du HFC-152a. Elles sont utilisées comme isolant thermique dans le bâtiment. Il existe en France deux sites de production de XPS expansé au HFC-134a et HFC-152a. Les facteurs d'émission associés sont spécifiques à ces entreprises et les émissions proviennent des déclarations annuelles des producteurs [19].

Le marché national des mousses a été estimé par le Citepa à l'aide des données des fabricants de XPS en France. Les importations de XPS en France contenant des gaz fluorés sont également prises en compte dans les calculs. Les facteurs d'émission, pendant la durée de vie des XPS, sont tirés des lignes directrices du GIEC 2006 [691].

→ Transport frigorifique

Les productions nationales ne sont pas connues précisément. Elles sont estimées à partir des ventes des producteurs de chaque HFC en France. La France est un grand exportateur de véhicules frigorifiques, il est considéré que 75% des productions sont exportées [520]. Les facteurs d'émission des lignes directrices du GIEC 2006 à la charge et pendant la durée de vie de l'équipement sont utilisés pour estimer les émissions [691].

Mousses à alvéoles ouvertes

L'intégralité des émissions de HFC utilisés se produit pendant le procédé de fabrication (mousse à peau intégrée PU) ou l'utilisation (OCF). Ainsi, le facteur d'émission utilisé est de 100%.

→ Mousse à peau intégrée

Les consommations et les émissions de HFC sont obtenues à partir des déclarations annuelles des producteurs [19].

→ OCF

Les ventes de boîtiers OCF en France sont issues d'un rapport réalisé par EReIE en 2012 sur l'utilisation des HFC dans l'application des mousses d'isolation [520]. Cette étude donne également la masse des HFC dans la masse totale du boîtier, une quantité de 70 g de HFC par boîtier est ainsi utilisée. Les émissions obtenues sont calculées en multipliant les ventes de boîtiers OCF en France, par la part de HFC utilisé en tant qu'agent d'expansion (50% entre 2000 et 2008 [520]) et par la quantité de HFC contenus dans un boîtier.

Formulateurs

Il existe quelques formulateurs de systèmes de polyuréthane en France dont les émissions et les consommations sont directement communiquées par les exploitants. Les facteurs d'émission induits sont donc spécifiques à la France et varient chaque année.

Emissions de CO₂

Il n'y a pas d'émission attendue pour ce secteur.

Emissions de CH₄

Il n'y a pas d'émission attendue pour ce secteur.

Emissions de N₂O

Il n'y a pas d'émission attendue pour ce secteur.

Date de mise à jour	Responsable	Date de validation	Vérificateur
15/01/2026	LG	02/02/2026	CV

Extincteurs d'incendie

Dans les équipements utilisés pour la protection contre les incendies sont mis en œuvre des gaz fluorés dont des émissions sont observées tout au long du cycle de vie de ces équipements.

Correspondance dans divers référentiels :

CCNUCC / CRT	2.F.3
CEE-NU / NFR	Hors champs
SNAPc (extension Citepa)	06.05.05
CE / directive IED	Hors champs
CE / E-PRTR	Hors champs
CE / directive GIC	Hors champs

Approche méthodologique :

Activité	Facteurs d'émission
Vente annuelle et banque cumulée	National

Niveau de méthode :

Rang 1a avec FE spécifiques au pays.

Références utilisées :

- [209] GIFEX – communication de données internes
- [688] ADEME - Observatoire des Fluides Frigorigènes
- [693] Siemens – informations sur le taux d'émission de HFC lors du recyclage

Caractéristiques de la catégorie :

Les HFC sont utilisés depuis le milieu des années 1990 en remplacement des CFC et HCFC qui ont été interdits. Deux types de HFC sont consommés : le HFC-227ea en très grande majorité et le HFC-23. Les quantités de HFC vendus dans cette application sont en diminution depuis le milieu des années 2000. Trois sources d'émissions sont à considérer :

- Les émissions à la production correspondant aux pertes à la charge de l'extincteur,
- Les émissions pendant la durée de vie comprenant les émissions sur feux et les émissions intempestives,
- Les émissions en fin de vie des équipements comprenant le recyclage.

Méthode d'estimation des émissions de gaz à effet de serre (NID) :

Emissions de Gaz fluorés

Les émissions sont estimées en différenciant les émissions à la production, pendant la durée de vie de l'équipement et en fin de vie. Les sociétés de vente et d'installations d'extincteurs ont mis en place depuis 2000 un programme d'amélioration ayant pour objectif de réduire les taux d'émissions. Les HFC utilisés sont le HFC-227ea en grande majorité (96%) et le HFC-23 à hauteur de 4% [209]. Le HFC-23 n'est plus mis sur le marché depuis le 1er janvier 2016 à la suite de l'application du règlement n°517/2014. Néanmoins, le HFC-23 a pu être récupéré sur des équipements en fin de vie ou en maintenance, puis être recyclé avant réintégration dans de nouveaux équipements. Ainsi, il apparaissait encore une (très faible) part de nouveaux équipements contenant du HFC-23 jusqu'en 2018 [688]. Toutefois, plus aucun nouvel équipement mis en service ne consomme ce gaz depuis 2019 [688].

Emissions à la production

Les ventes nationales sont transmises par le GIFEX (Groupement des fabricants installateurs de systèmes d'extinction automatiques fixes) jusqu'en 2010. A partir de 2013, les données proviennent de l'Observatoire des Fluides Frigorigènes de l'ADEME (OFF) [688] qui recense les quantités de HFC acquises et mises sur le marché par type de HFC. Les années 2011 et 2012 ont été déduites par linéarisation des ventes de 2010 et 2013. Le facteur d'émission national [209] évolue de 2000 à 2010 pour tenir compte du programme d'amélioration des installateurs de réduire les taux d'émissions.

Emissions pendant la durée de vie des équipements

Les ventes nationales sont transmises par le GIFEX (Groupement des fabricants installateurs de systèmes d'extinction automatiques fixes) jusqu'en 2010. A partir de 2013, les données proviennent de l'Observatoire des Fluides Frigorigènes de l'ADEME (OFF) [688] qui recense les quantités de HFC acquises et mises sur le marché par type de HFC. Le facteur d'émission national [209], correspondant à un taux de fuite accidentelle et un taux d'émission à la suite à des départs de feux, évolue de 2000 à 2010 pour tenir compte du programme d'amélioration des sociétés de vente et installateurs de réduire les taux d'émissions (amélioration sur les émissions intempestives).

Emissions à la fin de vie des équipements

Les émissions en fin de vie sont calculées en fonction de la banque et de la durée de vie des équipements. Il est considéré que la durée de vie des équipements est de 10 ans [209]. Le facteur d'émission national [693] correspond au taux d'émission de HFC au moment du recyclage des équipements en fin de vie. Ce taux est fourni par la principale entreprise qui recycle les HFC provenant des équipements d'extinction incendie et varie chaque année.

Les émissions des territoires d'Outre-mer sont estimées en fonction des émissions de l'hexagone et d'un ratio basé sur le nombre d'emploi.

Emissions de CO₂

Il n'y a pas d'émission attendue pour ce secteur.

Emissions de CH₄

Il n'y a pas d'émission attendue pour ce secteur.

Emissions de N₂O

Il n'y a pas d'émission attendue pour ce secteur.

Date de mise à jour	Responsable	Date de validation	Vérificateur
15/01/2026	LG	02/02/2026	CV

Aérosols

Les HFC peuvent être utilisés comme agent propulseur dans les aérosols.

Correspondance dans divers référentiels :

CCNUCC / CRT	2.F.4
CEE-NU / NFR	Hors champs
SNAPc (extension Citepa)	06.05.06
CE / directive IED	Hors champs
CE / E-PRTR	Hors champs
CE / directive GIC	Hors champs

Approche méthodologique :

Activité	Facteurs d'émission
Production et vente annuelle	Facteur d'émission national pour la production et usage totalement émissif

Niveau de méthode :

Rang 2a.

Références utilisées :

- [19] Base de données du registre des émissions polluantes (BDREP) – Déclarations annuelles des émissions de polluants
- [210] CFA – Comité Français des Aérosols – communication annuelle de données internes
- [521] GSK – GlaxoSmithKline – communication annuelle de données internes
- [1021] Inventec – communication téléphonique du 02/10/2019

Caractéristiques de la catégorie :

Deux catégories d'aérosols propulsés aux HFC sont distinguées :

- Les aérosols dits « techniques » : cette catégorie comprend diverses applications singulières où, pour des raisons techniques et de sécurité, les HFC sont utilisés dans les aérosols. Il s'agit par exemple des dépolluants informatiques, insecticides, graisses, etc.,
- Les aérosols pharmaceutiques (MDI – Metered Dose Inhaler).

Les HFC ont remplacé, dans le milieu des années 1990, les CFC utilisés avant leur interdiction. Les HFC utilisés sont le HFC-134a et HFC-152a pour les aérosols techniques et le HFC-134a et HFC-227ea pour les aérosols pharmaceutiques.

Trois sources d'émissions potentielles sont à considérer :

- Les émissions à la charge en usine lors du conditionnement. Il existe en France un grand nombre de petits producteurs et conditionneurs pour les aérosols techniques et peu de sites producteurs de MDI,
- Les émissions à l'usage,
- Les émissions en fin de vie.

Méthode d'estimation des émissions de gaz à effet de serre (NID) :

Emissions de Gaz fluorés

Les émissions sont estimées par type d'aérosols, les aérosols techniques d'un côté et les aérosols pharmaceutiques de l'autre.

Aérosols techniques

Les émissions à la charge sont estimées à partir des quantités totales de HFC consommés et conditionnés en France pour ce type d'aérosols et d'un facteur d'émission provenant d'un important conditionneur français [19]. Les ventes en France sont transmises par le CFA (Comité Français des Aérosols) [210].

Dans le calcul des émissions à l'usage des aérosols techniques, afin de tenir compte du fait que les importations d'aérosols techniques sont plus importantes que les exportations, un facteur de 15% appelé « estimation du solde des importations » est appliqué à la consommation française [210]. L'intégralité du HFC contenu dans l'aérosol est supposée être émise au bout de deux ans.

Les émissions en fin de vie sont nulles car elles sont supposées avoir lieu en totalité pendant la durée de fonctionnement de l'aérosol.

Le HFC-134a n'est plus mis sur le marché depuis le 1^{er} janvier 2018 suite à l'application du règlement n°517/2014. Néanmoins, des ventes d'aérosols techniques avec ce gaz propulseur subsistent en 2018 en raison d'un effet de stock. Le HFC-134a a été substitué en majorité par le butane/propane en raison de son prix moins élevé que celui du HFC-1234ze bien que les consommations de ce dernier ne soient pas négligeables [1021].

Aérosols pharmaceutiques

Les émissions à la charge sont estimées à partir des déclarations des producteurs d'aérosols pharmaceutiques en France [19]. Un facteur d'émission national est utilisé et déduit à l'aide des quantités de HFC consommés et émises par les divers producteurs.

Le marché des aérosols pharmaceutiques en France hexagonale est estimé annuellement par le plus important producteur français d'aérosols pharmaceutiques [521]. Les émissions sont calculées en fonction des ventes et de la charge de HFC par unité d'aérosols, estimé à 12 g de HFC/boîtier [521]. Jusqu'en 2002 seul le HFC-134a est utilisé. A partir de 2003, le HFC-227ea est également employé comme propulseur (en quantité moindre) et la répartition de la consommation entre ces deux HFC est estimée en fonction de la production française.

A l'instar des aérosols techniques, l'usage des aérosols pharmaceutiques est totalement émissif et l'intégralité des HFC contenus dans les boîtiers est émis en deux ans. Ces émissions, réparties sur deux ans, peuvent engendrer des pics sur le

facteur d'émission en cas de variation trop importante de la donnée d'activité entre deux années. C'est le cas par exemple en 2005 où le facteur d'émission du HFC-227ea est deux fois plus élevés qu'en 2004 car la consommation en 2005 était presque trois fois moins importante qu'en 2004 tandis que les émissions sont lissées sur ces deux années.

Les émissions en fin de vie sont nulles car elles sont supposées avoir lieu en totalité pendant la durée de fonctionnement de l'aérosol.

Pour les deux types d'aérosol, les émissions des territoires d'Outre-mer sont estimées en fonction des émissions de l'hexagone et d'un ratio basé sur la population.

Emissions de CO₂

Il n'y a pas d'émission attendue pour ce secteur.

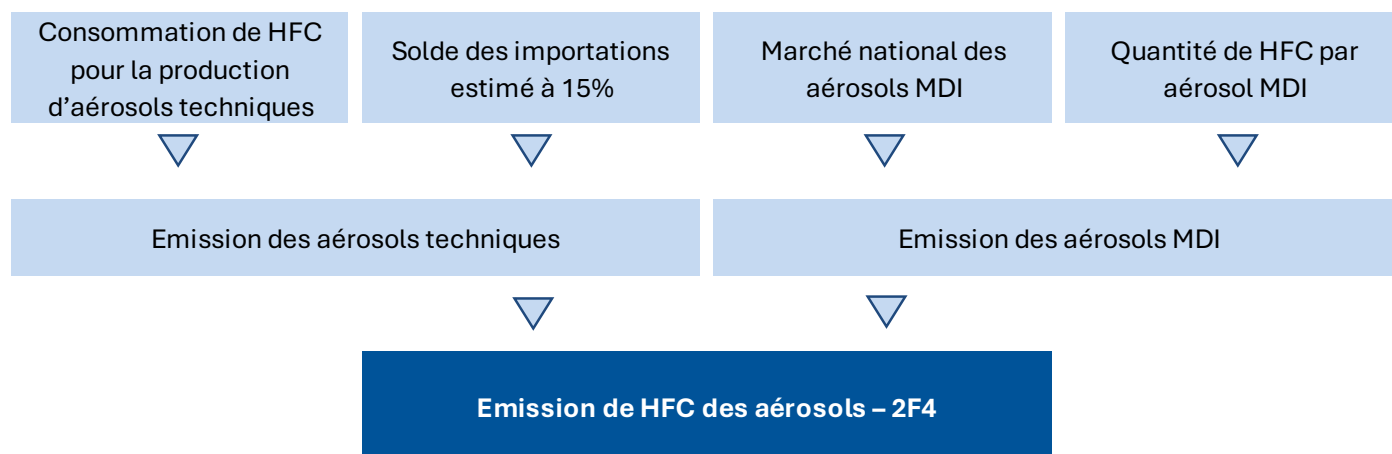
Emissions de CH₄

Il n'y a pas d'émission attendue pour ce secteur.

Emissions de N₂O

Il n'y a pas d'émission attendue pour ce secteur.

Figure 31 : Logigramme du processus d'estimation des émissions.



Date de mise à jour	Responsable	Date de validation	Vérificateur
15/01/2026	LG	02/02/2026	CV

Solvants

Des HFC peuvent être utilisés pour des applications spécifiques comme solvant.

Correspondance dans divers référentiels :

CCNUCC / CRT	2.F.5 et 2.G.2
CEE-NU / NFR	Hors champs
SNAPc (extension Citepa)	06.05.08 (partiel)
CE / directive IED	6.7
CE / E-PRTR	Hors champs
CE / directive GIC	Hors champs

Approche méthodologique :

Activité	Facteurs d'émission
Vente annuelle	GIEC 2006

Niveau de méthode :

Rang 1a.

Références utilisées :

- [212] Promosol – Communication de données internes
- [648] F2 Chemicals – Communication de données internes
- [688] ADEME - Observatoire des Fluides Frigorigènes
- [694] DuPont – Communication annuelle de données internes
- [695] Solvay – Communication annuelle de données internes

Caractéristiques de la catégorie :

Les solvants fluorés sont utilisés dans les applications suivantes :

- Construction aéronautique,
- Assemblage électronique,
- Fabrication de matériel médical, etc.

Les HFC ont remplacé, dans le début des années 1990, les HCFC utilisés avant leur interdiction. Les HFC utilisés sont le HFC-4310mee, HFC-365mfc et, à degré bien moindre, le HFC-245fa. Un PFC, le C₆F₁₄, est également utilisé pour dissoudre les huiles et graisses fluorées.

Méthode d'estimation des émissions de gaz à effet de serre (NID) :

Emissions de Gaz fluorés

Les émissions sont estimées à partir des ventes annuelles qui ont été communiquées par les producteurs de gaz fluorés :

- Les ventes de HFC-4310mee ont été transmises par DuPont [694] pour les années récentes et par Promosol (distributeur) [212] pour certaines années anciennes,
- Les ventes de HFC-365mfc ont été transmises par Solvay [695] et certaines années ont été estimées,
- Les ventes de HFC-245fa ont été estimées à partir des déclarations à l'Observatoire des Fluides Frigorigènes (OFF) de l'ADEME [688] et d'hypothèses,
- Les ventes de C₆F₁₄ ont été transmises par F2 Chemicals [648].

En outre, de petites quantités de HFC vendues en France sont réexportées. Ce taux a été fourni par un producteur et appliqué aux autres producteurs. Ces quantités sont soustraites des consommations nationales.

Les émissions sont calculées en considérant que l'intégralité des HFC est utilisée et émise à l'atmosphère au bout de deux ans.

Emissions de CO₂

Il n'y a pas d'émission attendue pour ce secteur.

Emissions de CH₄

Il n'y a pas d'émission attendue pour ce secteur.

Emissions de N₂O

Il n'y a pas d'émission attendue pour ce secteur.

Crédit des illustrations

Consommation d'halocarbures et de SF₆ | Introduction (de gauche à droite et de haut en bas)

@ Dan / Unsplash

@ Dave PULLIS / Unsplash

@ Andrei SLOBTSOV / Unsplash

