



Image libre de droit

WP 4.2 – LIVRABLE 159727

SYSTEMES DE REFRIGERATION ET DE CLIMATISATION :

RECENSEMENT DES USAGES ET DES METHODOLOGIES CALCULANT LES EMISSIONS DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES ET DE GAZ A EFFET DE SERRE

Référence du livrable :

ALP'AERA – Ref. CTE 159727

Auteurs du document : Sonia Oppo

Version du document : 1.1

Date de réalisation de la version finale du document : 10/07/2025

FINANCEMENT

Cette étude a été rendue possible grâce à l'aide financière particulière des membres suivants :



France – Italia ALCOTRA

SOMMAIRE

1	Contexte.....	5
2	Définitions.....	6
3	Méthodologie de calcul d'émissions directes	10
3.1	GIEC.....	10
3.2	CITEPA	12
3.3	ISPRA	12
4	Inventaire nationaux	13
4.1	HFC totaux en France.....	13
4.2	HFC totaux en Italie.....	13
4.3	HFC totaux en Europe	14
5	Usages et Perspectives.....	16
5.1	Utilisation des HCFC.....	16
5.2	Utilisation des HFC.....	16
5.3	Utilisation des systèmes de climatisation (domestique et tertiaire).....	17
5.4	Consommation d'énergie des Datacenters	21
5.5	Conséquences sur l'îlot de chaleur urbain	21
	Conclusions.....	22
	Revue de presse.....	24
	Bibliographie.....	24

1 Contexte

Cette note est une étude bibliographique produite dans le cadre du projet européen ALP'AERA. Ce projet, financé par le programme Interreg VI-A France-Italia ALCOTRA 2021-2027, vise à proposer une aide à la gouvernance pour s'adapter aux conséquences du changement climatique dans les vallées alpines franco-italiennes.

Un Work Package est dédié à l'état des lieux des émissions de polluants et des gaz à effet de serre en France et en Italie. Un focus est notamment fait sur les émissions biogéniques mais également du secteur résidentiel qui sont deux sources de pollution amenées à évoluer avec le changement climatique.

La présente étude bibliographique s'attache à évaluer l'impact sur le climat de l'utilisation de la climatisation en France et en Italie mais également à l'échelle mondiale. Pour cela, il recense les inventaires d'émissions sur le sujet mais également les perspectives de ce secteur clé dans les années à venir.

2 Définitions

Les systèmes de réfrigération et d'air conditionné (**Figure 1**) sont classés en 6 catégories [1] :

- Réfrigération domestique pour les ménages ;
- Réfrigération commerciale comprenant différents types d'équipements : des distributeurs automatiques aux systèmes de réfrigération centralisés des supermarchés ;
- Procédés industriels incluant groupes frigorifiques (chillers), entrepôts frigorifiques et pompes à chaleur industrielles utilisés dans l'agro-alimentaire, la pétrochimie et d'autres secteurs ;
- Réfrigération de transport couvrant les équipements et systèmes embarqués dans les camions frigorifiques, conteneurs, unités « reefer » et wagons ;
- Climatisation stationnaire, y compris les systèmes air-air, les pompes à chaleur et les chillers pour les bâtiments tertiaires et résidentiels ;
- Climatisation mobile des voitures particulières, cabines de camions, autobus et trains.

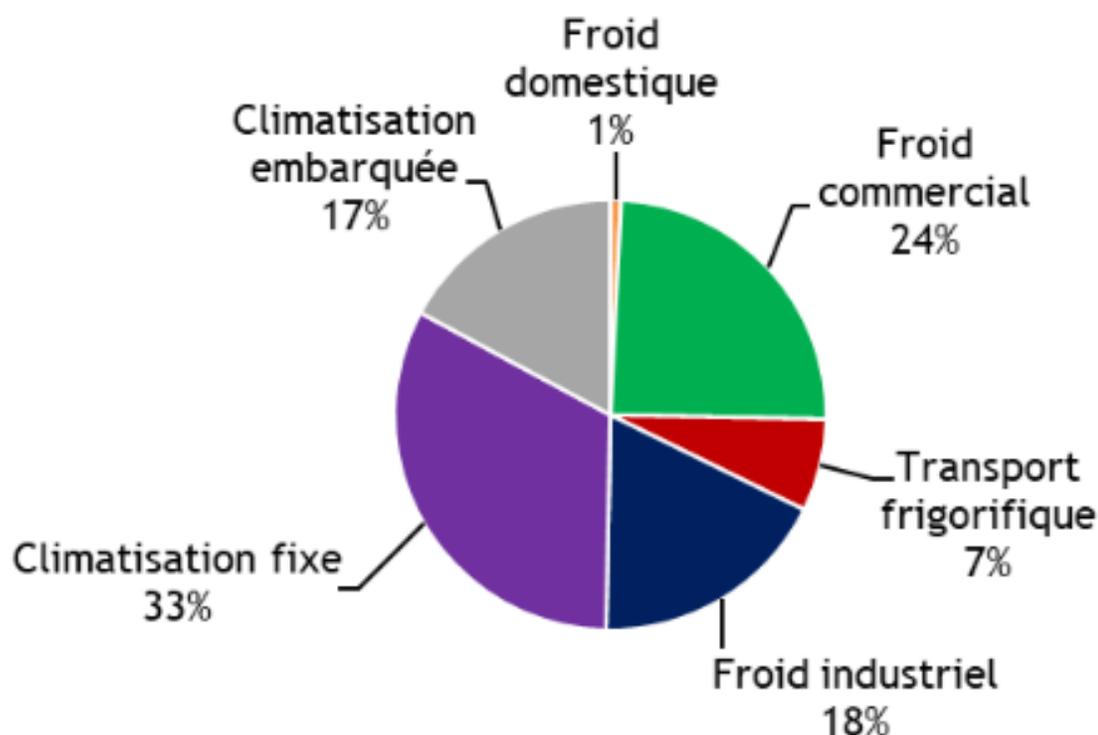


Figure 1 : Contribution des secteurs aux émissions de HFC en CO₂ équivalent en 2022 en France (source : CITEPA, mars2024)

Ces systèmes de réfrigérations émettent des émissions directes lors de leur usage en cas de fuites et lors des interventions de maintenance. Les polluants émis directement par ces systèmes utilisant des fluides frigorigènes (**Figure 2**) sont les suivants :

- **HydroChloroFluoroCarbures (HCFC) et Chlorofluorocarbures (CFC)** : Ce sont des familles de fluides frigorigènes qui ont été largement utilisés pendant des décennies dans la réfrigération, la climatisation et comme agents propulseurs dans les aérosols. En raison de leur impact environnemental, les CFC ont été interdits dès les années 1990 dans les pays développés, puis progressivement dans le monde entier, en application du Protocole de Montréal (1987). Les HCFC, moins nocifs pour l'ozone mais toujours problématiques, font aussi l'objet d'un calendrier de suppression progressive : dans l'Union européenne, leur usage neuf est interdit depuis 2015, et leur élimination complète est prévue d'ici 2030.
 - **Les CFC**, comme le R-12 ou le R-502, ont été parmi les premiers fluides utilisés. Ils sont très stables chimiquement, ce qui leur permettait d'être efficaces et durables dans les équipements. Cependant, cette stabilité est aussi la raison de leur grande persistance dans l'atmosphère, où ils montent jusqu'à la stratosphère et détruisent la couche d'ozone, un effet dramatique pour la protection contre les rayons ultraviolets du soleil.
 - **Les HCFC**, comme le R-22, ont été développés comme des substituts « moins nocifs » aux CFC. Ils contiennent toujours du chlore, donc ils participent aussi à la destruction de la couche d'ozone, mais à un degré moindre. Ils ont aussi un potentiel de réchauffement global (PRG) important, souvent entre 1 000 et 2 500, ce qui en fait aussi des gaz à effet de serre puissants. Les PRG des différents fluides frigorifiques sont en **ANNEXE 1 - Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) des différentes substances utilisés en réfrigération et climatisation**.
- **HydroFluoroCarbures (HFC)** : Ce sont des composés chimiques constitués d'hydrogène (H), de fluor (F) et de carbone (C) qui sont utilisés comme fluides frigorigènes (réfrigérants) dans la climatisation, la réfrigération et certaines mousses isolantes. Ils n'appauvrissent pas la couche d'ozone (contrairement aux CFC/HCFC) mais possèdent généralement un potentiel de réchauffement global (PRG) très élevé, ce qui en fait des gaz à effet de serre puissants lorsqu'ils fuient dans l'atmosphère. Ces GES figurent dans le protocole de Kyoto.
- **HydroFluoroOléfines (HFO)** : Ce sont des molécules insaturées (double liaison C=C) composées d'hydrogène, de fluor et de carbone. Ils forment une nouvelle génération de fluides frigorigènes mais, contrairement aux hydrofluorocarbures (HFC), leurs molécules possèdent une double liaison carbone-carbone qui les rend très réactives dans l'atmosphère. Cette instabilité les fait se dégrader en quelques jours, si bien que leur potentiel de réchauffement global (PRG) est extrêmement bas — souvent inférieur à 10 — sans effet destructeur sur la couche d'ozone. Enfin, si les HFO coûtent encore deux à quatre fois plus cher que les HFC classiques, leurs prix baissent rapidement à mesure que les industriels augmentent leurs capacités de production
- **Réfrigérants « naturels » / « alternatifs »** : Ils constituent une bonne solution pour réduire l'impact environnemental des systèmes de climatisation et réfrigération. Leur utilisation se développe rapidement dans l'industrie et le commercial, et commence à être adoptée dans des applications résidentielles, à condition de maîtriser les risques liés à leurs propriétés physiques (toxicité, inflammabilité et risque d'explosion). Les principaux réfrigérants sont l'ammoniac, le CO₂, le propane et l'isobutane. Leur utilisation n'appauvrit pas la couche d'ozone et impacte plus faiblement le climat.

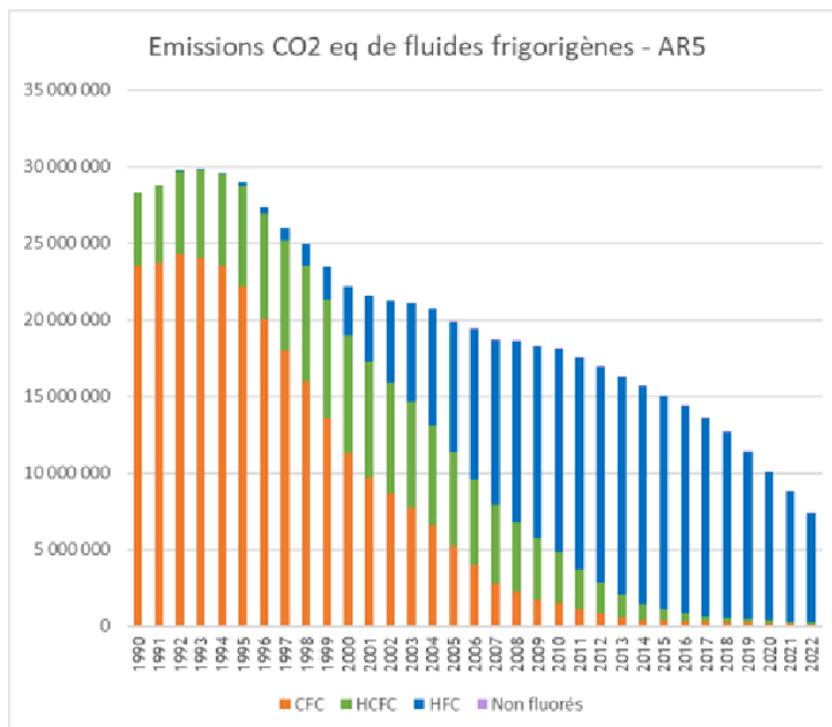


Figure 2 : Émissions mondiales de CO₂ équivalent des fluides frigorigènes entre 1990 et 2022 (Source : GIEC)

Les émissions de CFC et de HCFC ne doivent pas être rapportées dans les inventaires de GES car l'arrêt progressif de leur utilisation a été acté par le protocole de Montréal et ainsi ils n'ont pas été inclus dans le périmètre du protocole de Kyoto. Idem pour les HFO, qui ne sont pas couverts par les obligations de rapportage de la CCNUCC en raison de leur PRG bas. L'ensemble des différents traités et amendements légiférant les gaz fluorés est présent en **ANNEXE 2- Réglementation liée aux gaz fluorés**.

Les émissions directes de GES et de polluants atmosphériques liées à l'utilisation de systèmes réfrigérés sont liées à des fuites lors du fonctionnement, lors des opérations de maintenance et en fin de vie si le fluide n'est pas récupéré correctement. Ces émissions sont principalement des GES mais des polluants atmosphériques comme l'ammoniac ou des hydrocarbures peuvent également être émis en cas d'utilisation de réfrigérants naturels. Seuls les HFC, encore en utilisation, ont un impact significatif sur le climat et doivent être pris en compte dans un bilan d'émission.

Les GES et polluants atmosphériques émis indirectement sont liés à l'utilisation d'électricité pour faire fonctionner les climatiseurs. Les émissions indirectes liées à l'électricité dépendent du mix énergétique de chaque pays i.e. la part des centrales nucléaires, à charbon, à gaz et des énergies renouvelables dans la production d'électricité disponible dans le réseau.

3 Méthodologie de calcul d'émissions directes

3.1 GIEC

Le GIEC (IPCC en anglais), a publié en 2006 un rapport méthodologique pour l'inventaire des émissions nationales de GES [2]. Une révision de ce rapport a été proposée en 2019 et notamment le chapitre 7 du Volume 3 traitant des émissions des gaz fluorés pour substituer aux substances appauvrissant la couche d'ozone.

Ce rapport propose deux types de méthodes en fonction de la précision des données disponibles (Tier 1 et Tier 2). Pour savoir quelle méthode peut s'appliquer à notre besoin, on doit se référer à l'arbre des décisions disponibles dans le rapport (Figure 3).

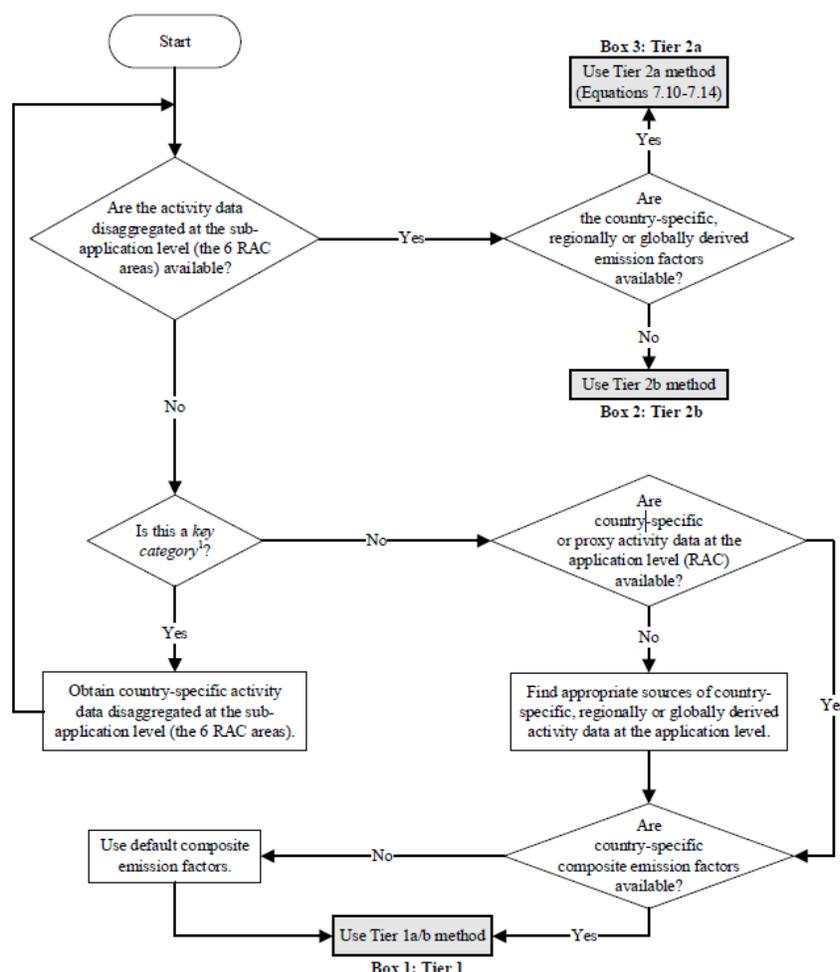


Figure 3 : Arbre des décisions pour le choix de la méthodologie de calcul des émissions liées à la réfrigération et à l'air conditionné

Une fois la méthode identifiée, il est possible d'utiliser des fichiers Excel contenant des cas d'usage pour le calcul de ces émissions :

- Tier 1 : https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/3_Volume3/XLS/V3_An1_Calculation_example_for_2F1.xls
- Tier 2 : Fichier « Calculation example for 2F1 (Tier 2) » disponible dans le répertoire du Volume 3 (révision 2019)

Dans le fichier du Tier 1, les facteurs d'émissions (FE) sont déjà saisis et il n'est pas recommandé de les changer. Dans le fichier du Tier 2, il est possible d'adapter les FE en fonction des activités considérées (**Figure 4**).

TABLE 7.9 (UPDATED) DEFAULT ESTIMATES ¹ FOR CHARGE, LIFETIME AND EMISSION FACTORS FOR REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING SYSTEMS						
Sub-application	Charge (kg)	Lifetimes (years) ²	Emission Factors (% of initial charge/year) ³		End-of-Life Emission (%)	
Factor in Equation	(M)	(d)	(k)	(x)	($\eta_{rec,d}$)	(p)
			At Time of Charge	Annual loss, Operating Lifetime	Recovery Efficiency ⁴	Initial Charge Remaining
Domestic Refrigeration	$0.05 \leq M \leq 0.5$	$12 \leq d \leq 20$	$0.2 \leq k \leq 1$	$0.1 \leq x \leq 0.5$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 80$
Stand-alone Commercial Applications	$0.2 \leq M \leq 6$	$10 \leq d \leq 15$	$0.5 \leq k \leq 3$	$1 \leq x \leq 15$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 80$
Medium & Large Commercial Refrigeration	$50 \leq M \leq 2000$	$7 \leq d \leq 15$	$0.5 \leq k \leq 3$	$10 \leq x \leq 35$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$50 < p < 100$
Transport Refrigeration	$3 \leq M \leq 8$	$6 \leq d \leq 9$	$0.2 \leq k \leq 1$	$15 \leq x \leq 50$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 50$
Industrial Refrigeration including Food Processing and Cold Storage	$10 \leq M \leq 10,000$	$15 \leq d \leq 30$	$0.5 \leq k \leq 3$	$7 \leq x \leq 25$	$0 < \eta_{rec,d} < 90$	$50 < p < 100$
Chillers	$10 \leq M \leq 2000$	$15 \leq d \leq 30$	$0.2 \leq k \leq 1$	$2 \leq x \leq 15$	$0 < \eta_{rec,d} < 95$	$80 < p < 100$
Residential and Commercial A/C, including Heat Pumps	$0.5 \leq M \leq 100$	$10 \leq d \leq 20$	$0.2 \leq k \leq 1$	$1 \leq x \leq 10$	$0 < \eta_{rec,d} < 80$	$0 < p < 80$
Mobile A/C	$5 \leq M \leq 6500$ (maritime) $10 \leq M \leq 30$ (railway) $4 \leq M \leq 18$ (busses) $0.5 \leq M \leq 2$ (other MAC)	$9 \leq d \leq 16$	$0.2 \leq k \leq 0.5$	$20 \leq x \leq 40$ (maritime) $5 \leq x \leq 20$ (railway) $10 \leq x \leq 20$ (other MAC)	$0 < \eta_{rec,d} < 50$	$0 < p < 50$

Source:
¹ UNEP RTOC Reports (UNEP-RTOC, 1999; UNEP-RTOC, 2003), Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (2009), Gallagher et al (2014), Umweltbundesamt (2015). For information on mobile A/C charge and mobile A/C emission factors for annual loss during operating lifetime: Schwarz and Rhiemeier (2007) and Gallagher et al (2014).
² Lower value for developed countries and higher value for developing countries.
⁴ The lower threshold (0%) highlights that there is no recovery in some countries.

Figure 4 : Table répertoriant la charge, le temps de vie et les facteurs d'émissions de HFC pour les systèmes de réfrigération et d'air conditionné

3.2 CITEPA

Le CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique) est l'organisme français chargé de produire les inventaires d'émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre, en appui aux politiques publiques environnementales.

Il utilise la méthode détaillée « Tier2a » recommandée par le GIEC pour le calcul des émissions des secteurs du froid et de la climatisation.

Un rapport **[3]** détaillé est disponible en ligne en français pour appliquer la méthodologie sur l'ensemble des fluides frigorigènes et pas seulement ceux réglementés.

3.3 ISPRA

L'Institut Supérieur pour la Protection et la Recherche Environnementale est un organisme italien en charge de la mise à jour annuelle des émissions atmosphériques en Italie (gaz à effet de serre et polluants atmosphériques). Ils utilisent aussi la méthodologie décrite par le GIEC, « Tier 2a ».

Un rapport récent **[4]** détaille l'application de la méthodologie mais également les résultats depuis quelques années.

4 Inventaire nationaux

4.1 HFC totaux en France

Le CITEPA met à disposition les données de HFC totaux par année et par secteur. On peut voir que les émissions de HFC liés à l'utilisation d'air conditionné dans les bâtiments (tertiaires ou résidentiels) a atteint un pic au début des années 2010 mais a sensiblement diminué depuis 2018 (**Figure 5**).

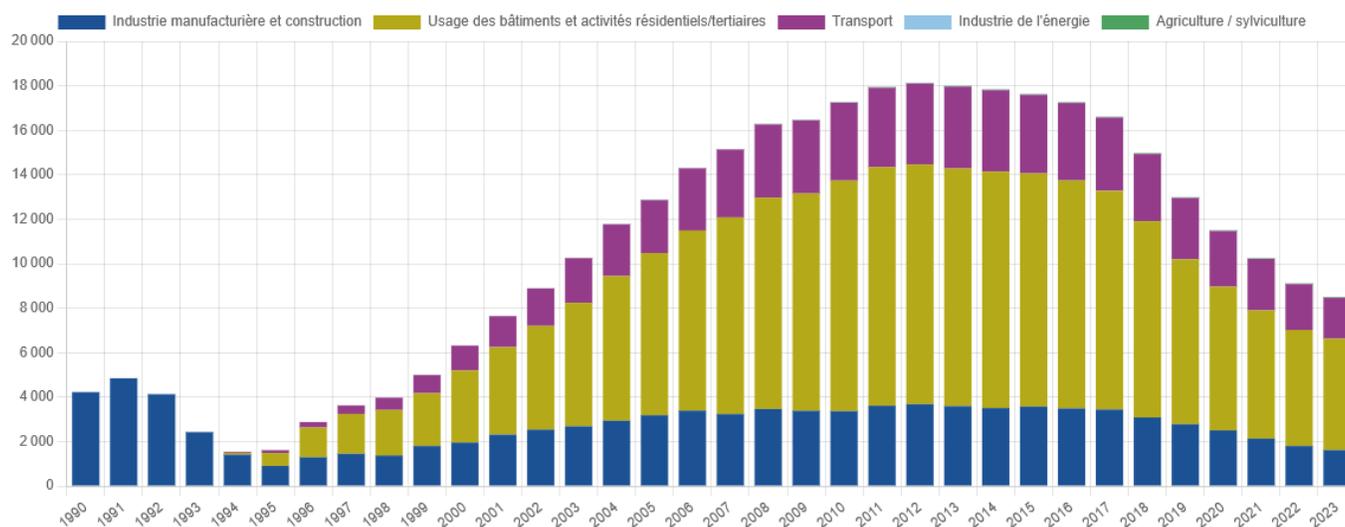


Figure 5 : Évolution des émissions de HFC en kt de CO₂ équivalent entre 1990 et 2023 en France par secteur (Source : CITEPA, 2024)

4.2 HFC totaux en Italie

En Italie, les émissions de HFC ont atteint un maximum entre 2010 et 2015 (**Figure 6**), constat visible également en France. Rapporté en CO₂ équivalent, les émissions de HFC sont pour le moment marginales face aux émissions de CO₂ directs ou encore de méthane.

GHG emissions	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
	<i>kt CO₂ equivalent</i>									
CO ₂ excluding net CO ₂ from LULUCF	438,208	448,596	469,598	501,365	435,672	361,244	302,600	335,930	340,115	312,291
CO ₂ including net CO ₂ from LULUCF	432,937	424,242	448,286	466,925	395,390	318,933	262,124	296,666	299,836	257,900
CH ₄ excluding CH ₄ from LULUCF	55,017	57,097	57,786	54,867	52,932	49,397	47,419	47,044	45,716	45,161
CH ₄ including CH ₄ from LULUCF	55,744	57,269	58,184	55,035	53,126	49,535	47,594	47,540	46,091	45,355
N ₂ O excluding N ₂ O from LULUCF	24,757	26,715	27,456	26,605	18,661	17,365	17,902	17,779	16,032	16,987
N ₂ O including N ₂ O from LULUCF	25,668	27,512	28,144	27,193	19,062	17,694	18,412	18,491	16,702	17,596
HFCs	372	1,100	3,748	9,669	12,805	12,503	10,347	9,786	9,350	8,736
PFCs	2,615	1,351	1,363	1,759	1,377	1,540	516	413	462	297
Unspecified mix of HFCs and PFCs	NA,NO	24	24	24	24	24	22	25	22	29
SF ₆	421	700	621	565	405	483	252	282	405	367
NF ₃	NA,NO	77	13	33	20	28	16	15	20	20
Indirect CO ₂	1,391	1,296	1,187	1,167	996	830	890	876	807	855
Total (excluding LULUCF, with CO₂ indirect)	522,781	536,955	561,797	596,055	522,892	443,414	379,963	412,152	412,928	384,742
Total (including LULUCF, with CO₂ indirect)	519,148	513,570	541,571	562,371	483,205	401,572	340,172	374,095	373,694	331,153

Figure 6 : Émissions de gaz à effet de serre en Italie entre 1990 et 2023 (source : ISPRA, 2025)

4.3 HFC totaux en Europe

Les inventaires européens rapportés par l'EEA [5] montrent également une majorité de gaz fluorés émis par les systèmes de réfrigération (Figure 7). La part de chaque système de réfrigération dans ce total d'émissions est détaillée à l'ANNEXE 3- Répartition de l'usage des gaz fluorés en Europe dans les systèmes réfrigérants.

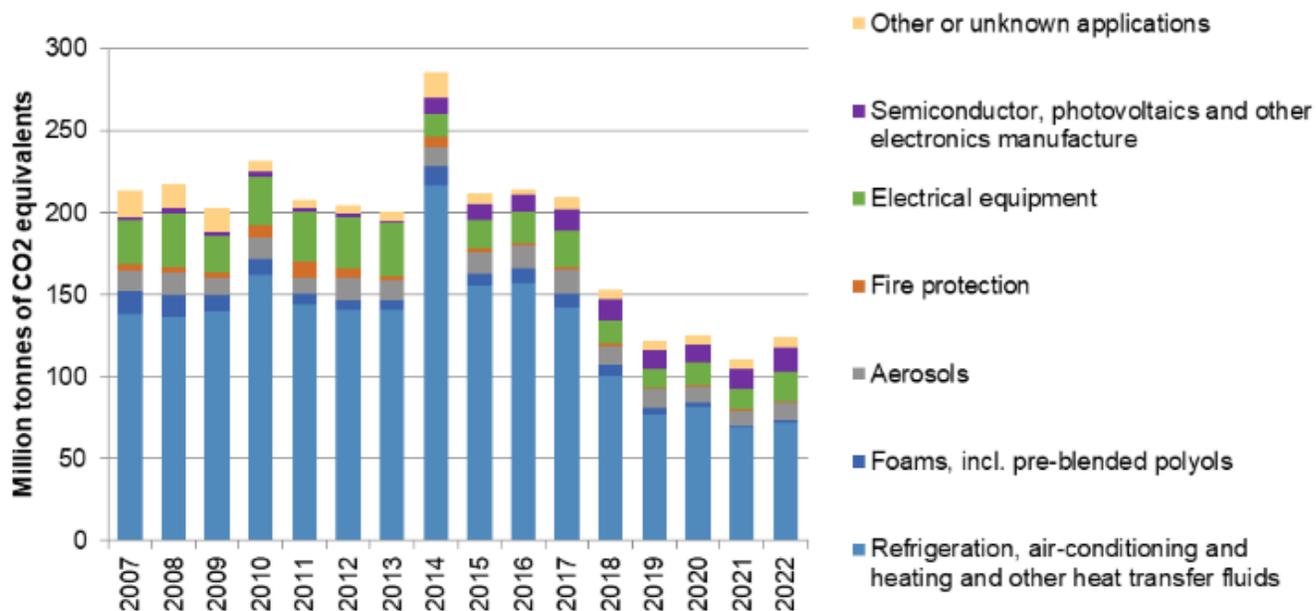


Figure 7 : Évolution des catégories d’approvisionnement en gaz fluorés (en équivalent CO₂) en UE par type d’activité en UE (Source : EAA, 2023)

5 Usages et Perspectives

5.1 Utilisation des HCFC

Leur utilisation et notamment celle du HCFC-22 est interdite de mise en marché depuis 2015 en Europe [6]. L'Inde et la Chine, les deux plus grands producteurs mondiaux de HCFC-22, ont mis en place des politiques ambitieuses de réduction de ces émissions dès 2009 [7]. Néanmoins, un article scientifique de Nature publié en 2020 [8] remet en cause les efforts menés par la Chine et l'Inde et une autre source émet l'hypothèse d'un retard dans l'adoption des technologies d'atténuation en Asie de l'Est [9]. En effet, les auteurs estiment qu'il y a un trop grand écart entre les émissions calculées dans les inventaires nationaux (et intégrant les réductions d'émissions prévues par la Chine et l'Inde) et d'autre part les émissions calculées sur la base de données de mesures atmosphériques. Ils suggèrent qu'une importante quantité de HCFC-22 aient été produites sans être rapportées, dans des installations non déclarées ou non identifiées. Cette production non référencée aurait conduit à des émissions dans l'air du sous-produit HFC-23, équivalentes au total d'émissions de GES de l'Espagne en 2017 (302 Mt de CO₂ équivalent).

5.2 Utilisation des HFC

Depuis la publication des directives du GIEC en 2006, un changement majeur est intervenu dans le cadre réglementaire encadrant les HFC. Auparavant, les HFC, qui n'appauvrissent pas directement la couche d'ozone, n'étaient pas réglementés par le Protocole de Montréal [10]. Par la suite, lors de la 28^e Réunion des Parties (MOP28) tenue à Kigali (Rwanda) en octobre 2016, 197 pays ont adopté un amendement visant à réduire progressivement l'utilisation des HFC [11]. Cet engagement est fondamental pour le climat puisqu'il a été estimé que les émissions de HFC auraient pu représenter 9 à 19% des émissions mondiales de CO₂ équivalent en 2050 [12].

Les parties se sont engagées à réduire de plus de 80 % la production et la consommation de HFC, pondérées par leur PRG, d'ici les 30 prochaines années :

- Les pays développés ont commencé à réduire leur consommation de HFC en 2019.
- Les pays en développement suivront, avec un gel des niveaux de consommation entre 2024 et 2028.
- Un petit groupe de pays où le climat est particulièrement chaud (Inde, Pakistan, Iran, Arabie Saoudite, Koweït) gèlera leur consommation de HFC à partir de 2028.

Ces plafonds de production et de consommation devraient entraîner des modifications importantes dans la quantité et le type de HFC utilisés pour remplacer les substances appauvrissant la couche d’ozone.

Pour maintenir la précision des inventaires d’émissions de HFC, les responsables d’inventaire doivent se familiariser avec les plafonds applicables dans leur pays et prévoir de collecter des données sur l’évolution de l’utilisation et des émissions de HFC qui en découle.

Une projection à 2035 réalisée avec l’outil RIEP par Mines ParisTech [13] pour la France Métropolitaine montre un niveau d’émission réduit à 63% à l’horizon 2035 par rapport au niveau 2010 (**Figure 8**). Le froid commercial connaît une diminution de près de 70% grâce à la réglementation F-GasII qui interdit d’usage des HFC les plus polluants à partir de 2020 pour la maintenance des installations de réfrigération.

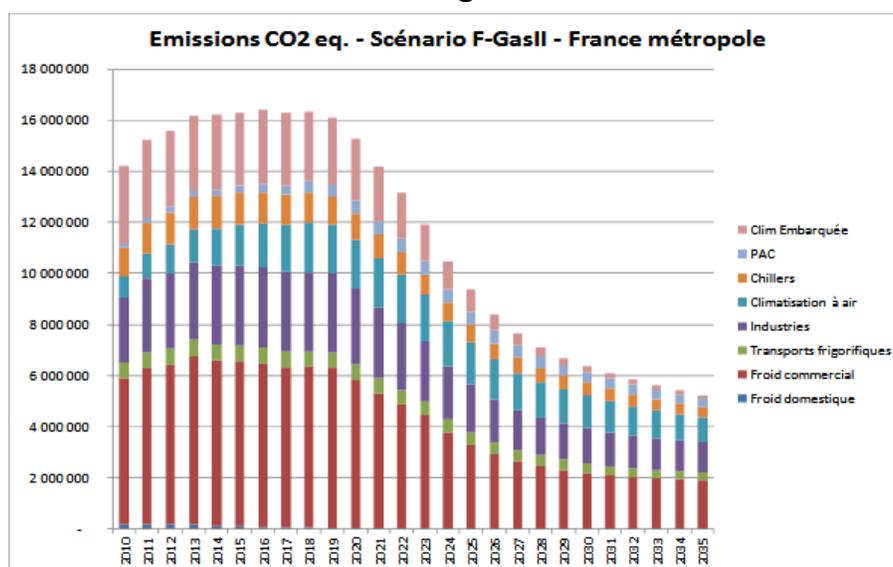


Figure 8 : Évolution des émissions de HFC en tonnes de CO₂ équivalent par secteur dans le cadre du scénario F-GasII en France (source : Mines ParisTech)

5.3 Utilisation des systèmes de climatisation (domestique et tertiaire)

En France, l’ADEME a mené une enquête [14] en 2020 et a estimé pour les ménages, un taux d’équipement de 25%. Sur les départements côtiers de la région Sud, ce taux atteint 47% et 28% pour les départements alpins français.

Dans le nord de l’Italie, ce taux atteint 49% [15] même si les disparités régionales sont fortes (**Figure 9**), moins de 5% des familles possèdent un système de climatisation en Vallée

d’Aoste. Une progression constante de la climatisation résidentielle est constatée depuis 2014, en lien avec la multiplication des épisodes caniculaires. De plus, le développement de la climatisation se nourrit de la réversibilité des systèmes. Les traditionnels convecteurs électriques sont substitués par des unités réversibles qui sont autant utilisés pour des fonctions de chauffages que de rafraîchissement.

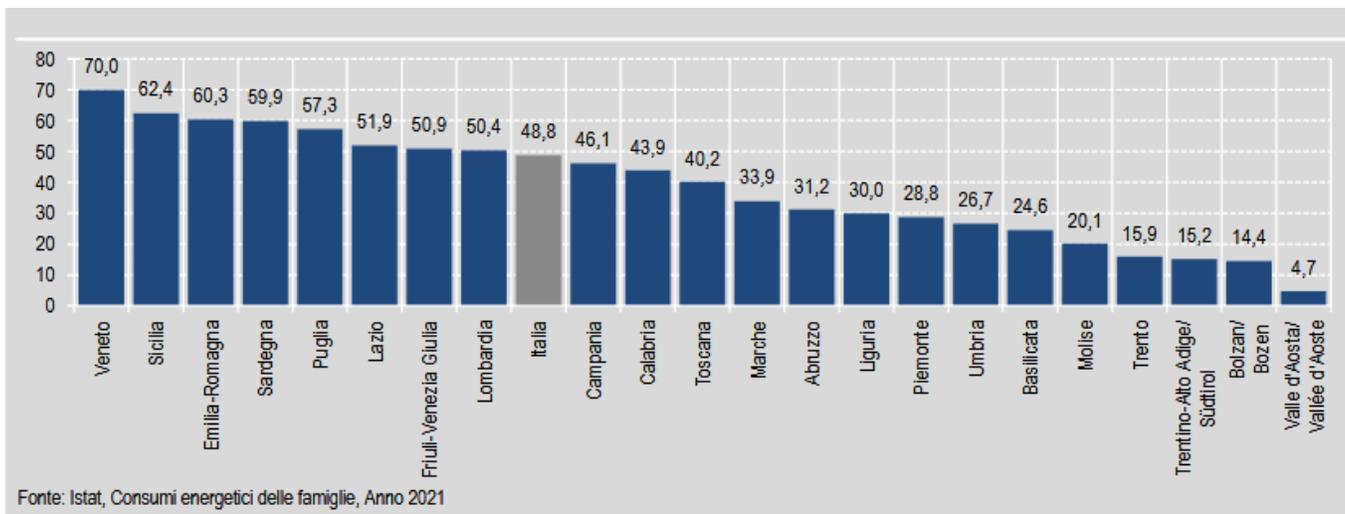


Figure 9 : Pourcentage de famille dotée de système de climatisation par région en Italie en 2021 (Source : ISTAT)

Dans le secteur tertiaire, la proportion des surfaces climatisées monte à 40% en France. En revanche, c’est la région francilienne et le bassin lyonnais qui abrite le plus de surfaces climatisées en raison du poids économique de ces territoires.

En France, l’usage de la climatisation dans le secteur tertiaire est dominé par les bureaux, puis le commerce et enfin la santé (Figure 10). Les besoins des Datacenters arrivent en dernier dans le classement. En Italie, l’ENEA [16] a estimé que la climatisation pesait pour 57% dans la consommation électrique des bâtiments tertiaires, loin devant les équipements électriques et l’éclairage (respectivement 25% et 17%).

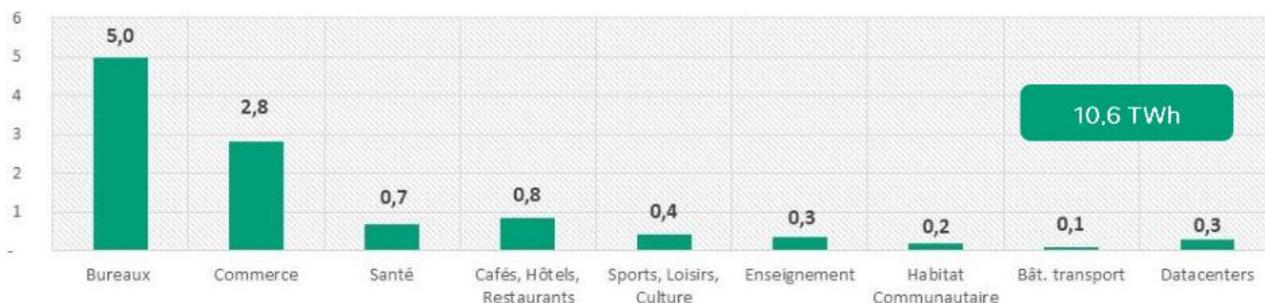


Figure 10 : Les consommations énergétiques des différents secteurs tertiaires en 2020 en France métropolitaine (en TWh) (Source : ADEME, 2021)

En 2050, les scénarios envisagés par l'ADEME amènent à des consommations énergétiques qui varient considérablement (Figure 11). En effet, le scénario tendanciel fil de l'eau (scénario 0) atteint 41 TWh en 2050 (contre 16.5 TWh en 2020) en lien avec la croissance du parc de logement (+0.3% par an), le recours croissant à la climatisation dans les logements mais aussi dans des secteurs peu climatisés comme les écoles et une croissance de 40% des surfaces commerciales. À noter que l'ADEME estime que 95% des surfaces tertiaires et résidentielles seront climatisés en 2050 dans ce scénario.

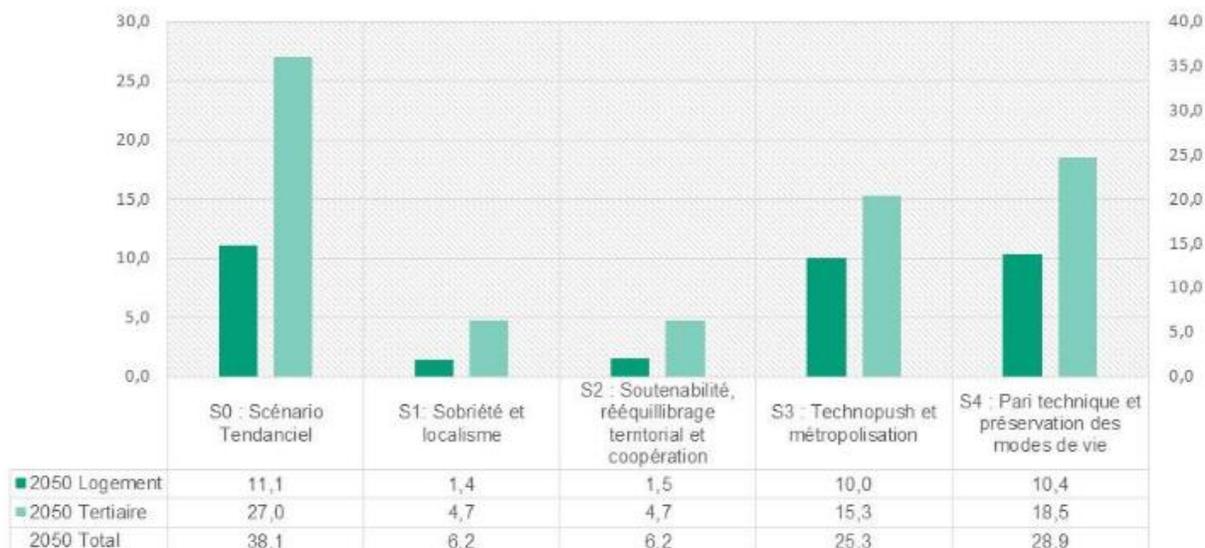


Figure 11 : Les consommations énergétiques totales associées à la climatisation à l'horizon 2050 selon les différents scénarios envisagés

L'étude prospective montre aussi que le recours à des technologies plus performantes ne permet pas de compenser l'accroissement des consommations. À l'inverse, les scénarios

S0 et S1 misent sur un changement notable des comportements des ménages et des utilisateurs qui convergent vers une baisse significative des consommations:

- Durée d'utilisation plus faible pendant les période de chaleur (8h vs. 12h dans le scénario S0)
- Température de consigne intérieure plus élevée (26°C vs. 22°C)

À l'échelle du globe, les ventes de climatiseurs ont triplé en trente ans. Le nombre de climatiseurs a atteint 1,5 milliard en 2021 et ce chiffre devrait tripler d'ici à 2050.

À noter que la part de l'Europe dans l'utilisation des systèmes de climatisation va tendre à être marginale dans les années à venir (**Figure 12**) en raison de l'utilisation croissante de l'Inde et de la Chine **[17]**.

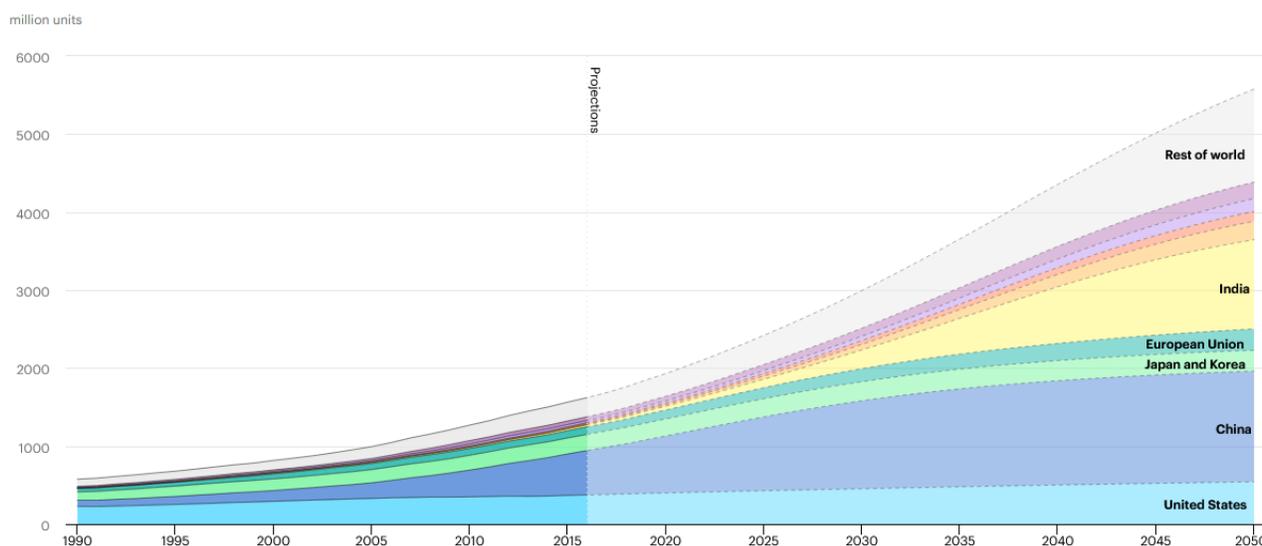


Figure 12 : Stock mondial d'unité de climatisation entre 1990 et 2050 (Source : IEA, 2018)

L'IEA estime que la demande mondiale d'énergie des climatiseurs devrait tripler d'ici 2050. L'utilisation de climatisation devrait être la deuxième source de croissance de la demande mondiale d'électricité après le secteur industriel d'ici 2050.

De plus, l'IEA a estimé qu'entre 2002-2004 et 2019-2021, le nombre annuel moyen de décès liés à la chaleur chez les personnes âgées de 65 ans ou plus a augmenté de 61 %, atteignant environ 300 000 décès ou plus **[18]**. Ainsi, l'accès à un refroidissement efficace a sauvé des dizaines de milliers de vies; au cours de la même période, le nombre annuel moyen de décès liés à la chaleur évité grâce aux systèmes de climatisation a été multiplié par 3, pour atteindre environ 190 000 vies sauvées par an au cours de la période 2019-2021.

5.4 Consommation d'énergie des Datacenters

En France, en 2020, l'ADEME a estimé¹ à 0.3 TWh de consommation énergétique liée au refroidissement des Datacenters, représentant environ 1% des consommations dans les services tertiaires (**Figure 13**). En 2050, même en considérant le scénario S0 le plus pessimiste, cette consommation resterait constante. En outre, une augmentation significative de l'usage de la climatisation dans les autres secteurs (santé, commerce, loisirs...) est également attendue.

	2020			2050														
	France Métro.	DOM	Total	F Métro. S0	F Métro. S1	F Métro. S2	F Métro. S3	F Métro. S4	DOM S0	DOM S1	DOM S2	DOM S3	DOM S4	Total S0	Total S1	Total S2	Total S3	Total S4
Consommation énergétique (TWh)																		
Tertiaire	10,6	1	11,6	27	4,7	4,7	15,3	18,5	1,7	0,3	0,3	0,8	1,0	28,7	5,0	5,0	16,1	19,5
Bureaux	5,0	0,8	5,8	5,6	1,2	1,2	2,9	3,3	0,9	0,2	0,2	0,5	0,5	6,5	1,4	1,4	3,4	3,8
Commerces	2,8	0,1	2,9	5,6	1	1	3,7	4	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	5,9	1,0	1,0	3,9	4,2
Santé	0,7	0,04	0,7	2,4	0,5	0,5	1,1	1,5	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	2,5	0,5	0,5	1,2	1,6
Cahore	0,8	0,02	0,8	1,6	0,3	0,3	0,8	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	0,3	0,3	0,8	1,1
Sports, Loisirs, Culture	0,4	0,01	0,4	3,2	0,4	0,4	1,4	2,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	3,3	0,4	0,4	1,4	2,3
Enseignement	0,3	0,01	0,4	5,4	0,9	0,9	3,9	4,3	0,2	0,0	0,0	0,1	0,1	5,6	0,9	0,9	4,0	4,4
Habitat Communautaire	0,2	0,01	0,2	2,4	0,4	0,4	1	1,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	0,4	0,4	1,0	1,6
Transport	0,1	0,00	0,1	0,5	0,1	0,1	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,1	0,1	0,3	0,3
Datacenters	0,3	0,03	0,3	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2
Résidentiel	4,9	0,4	5,3	11,1	1,4	1,5	10	10,4	1,3	0,1	0,1	1,2	1,2	12,4	1,5	1,6	11,2	11,6
Maisons individuelles	3,5	0,3	3,8	8,1	1,1	1,1	7,2	7,7	0,9	0,09	0,09	0,9	0,9	9,0	1,2	1,2	8,1	8,6
Logements collectifs	1,4	0,1	1,5	3	0,3	0,4	2,8	2,7	0,4	0,03	0,03	0,3	0,3	3,4	0,3	0,4	3,1	3,0
Résidences principales	4,2	0,38	4,6	9,3	1,3	1,4	8	8,3	1,2	0,1	0,1	1,1	1,1	10,5	1,4	1,5	9,1	9,4
Résidences secondaires	0,7	0,02	0,7	1,8	0,1	0,1	2	2,1	0,1	0,005	0,005	0,1	0,1	1,9	0,1	0,1	2,1	2,2
Emissions GES - Teq CO₂																		
Emissions de fluides (tonnes)	1856	176	2032	5092	3918	4246	4470	4618	408	287	313	388	353	5500	4205	4559	4858	4971
Emission MTeq CO ₂ - équipements	3,5	0,3	3,8	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0	0,32	0,32	0,33	0,21
Emission MTeq CO ₂ - Conso. Energie	0,9	0,1	1	2	0,5	0,5	1,5	1,7	0,2	0,03	0,03	0,13	0,13	2	0,53	0,53	1,63	1,83
Emissions totales MTeq CO₂	4,4	0,4	4,8	2,4	0,8	0,8	1,8	1,9	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	2,6	0,9	0,9	2,0	2,0

Figure 13 : Évaluation des consommations et émissions associées aux systèmes de climatisation et prospective 2050 en France en TWh

Ainsi, les émissions de gaz fluorés en lien avec l'activité des Datacenters devraient diminuer en France entre 2020 et 2050 en raison des progrès technologiques sur les systèmes de climatisation.

5.5 Conséquences sur l'îlot de chaleur urbain

En dehors des émissions directes (issues des fluides frigorigènes) et indirectes (consommation d'électricité), le recours à la climatisation impacte également significativement la température extérieure à cause de la chaleur relâchée par les différents systèmes à l'extérieur, ce qui est un problème dans les grandes villes et aggrave l'îlot de chaleur urbain. Des travaux scientifiques [19] ont estimé avec des outils de modélisations que lors de la canicule de 2003, si le taux d'équipement en climatisation avait atteint 50%, la température extérieure aurait augmentée de 2°C dans certains quartiers de Paris.

¹ Le calcul des émissions en équivalent CO₂ des consommations énergétiques a été réalisé en prenant en compte 60g CO₂ par kWh électrique.

Conclusions

La présente note met en lumière l'importance croissante des systèmes de réfrigération et de climatisation dans les bilans d'émissions de gaz à effet de serre (GES), en particulier à travers l'usage de fluides frigorigènes à fort potentiel de réchauffement global (PRG). Alors que les CFC et HCFC ont été progressivement éliminés en raison de leur impact sur la couche d'ozone, les HFC restent largement utilisés et constituent désormais une source non négligeable de gaz à effet de serre. Les méthodologies proposées par le GIEC permettent une évaluation rigoureuse et harmonisée de ces émissions à l'échelle mondiale, nationale voire locale.

Les inventaires montrent cependant une évolution contrastée selon les secteurs et les territoires, avec une diminution des émissions dans certains domaines, grâce aux politiques européennes telles que la F-Gas II, tandis que d'autres pays peinent encore à contenir leurs émissions. L'usage croissant de systèmes de climatisation, notamment dans les secteurs résidentiel et tertiaire, pose de nouveaux défis, tant en matière d'efficacité énergétique que de choix de fluides. La tendance à la hausse du parc de climatiseurs, exacerbée par le réchauffement climatique et les épisodes de chaleur extrême, laisse entrevoir une augmentation continue de la demande énergétique mondiale.

Dans ce contexte, le développement et la diffusion de réfrigérants dits « naturels » ou de nouvelle génération comme les HFO offrent des alternatives prometteuses. Cependant, leur adoption reste freinée par des enjeux technico-économiques, réglementaires et sécuritaires. En parallèle, les projections à 2050 montrent que les gains technologiques ne suffiront pas à eux seuls à compenser la hausse des usages, soulignant la nécessité d'actions sur les comportements et les pratiques. De nombreuses solutions existent ou attendent d'être investiguées comme les systèmes de refroidissement passifs (adiabatique direct et indirect) qui ont déjà fait leur preuve² ou encore pour limiter l'impact sur l'îlot de chaleur urbain, de relarguer en sous-sol ou dans l'eau la chaleur issue des systèmes de climatisation.

Ainsi, une réponse efficace au paradoxe de la climatisation — indispensable pour faire face à la chaleur, mais aggravant le réchauffement — repose sur une stratégie intégrée :

²<https://www.adaptaville.fr/rafraichissement-adiabatique-ou-bio-climatisation-une-alternative#:~:text=Le%20rafra%C3%A0Echissement%20adiabatique%20consiste%20%C3%A0,sont%20moins%20gourmands%20en%20%C3%A9nergie>

innovation technologique, cadre réglementaire strict, sobriété énergétique, et renforcement des dispositifs de contrôle et de suivi. L'enjeu est de taille, puisque le refroidissement durable est non seulement un levier de résilience face au changement climatique, mais aussi un impératif de santé publique dans de nombreuses régions du globe. À titre d'exemple, en France, le dispositif « MaPrimeRénov' » destiné à mieux isoler son logement et donc indirectement moins consommer de chauffage et de climatisation va être suspendue quelques mois et ses plafonds revus à la baisse.

Il est donc essentiel que les politiques publiques, les industriels et les utilisateurs s'emparent conjointement de cette problématique afin de concilier confort thermique, justice climatique et protection de l'environnement. Les méthodologies d'évaluation des émissions doivent continuer à évoluer pour refléter les nouvelles pratiques et substances utilisées. Enfin, seule une gouvernance internationale cohérente et ambitieuse, s'appuyant sur des données précises et transparentes, permettra de limiter les impacts climatiques de ces systèmes tout en répondant aux besoins croissants de refroidissement à l'échelle mondiale.

Revue de presse

- Article du CITEPA « Hausse inattendue des émissions de HCF-23 » : <https://www.citepa.org/hausse-inattendue-des-emissions-de-hfc-23/>
- Article de « Le Monde » : https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/08/20/le-paradoxe-de-la-climatisation-de-plus-en-plus-necessaire-elle-aggrave-le-rechauffement_6185979_3244.html
- Article de Ambiente&Energia “Climatizzazione è il 57% dei consumi di energia negli uffici” : https://www.ansa.it/canale_ambiente/notizie/energia/2019/06/13/climatizzazione-e-il-57-dei-consumi-di-energia-negli-uffici_51c788a9-30a3-49f4-b0a8-ef39837b0f42.html

Bibliographie

- [1] **Bjønness, K. L., Gustafsson, T., Ishikawa, J., & Maione, M. (2019).** Emissions of fluorinated substitutes for ozone depleting substances. In 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Vol. 3, pp. 7.1–7.47). Intergovernmental Panel on Climate Change.
https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/3_Volume3/19R_V3_Ch07_ODS_Substitutes.pdf
- [2] **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019).** 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC.
<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
- [3] **Alliance Froid Climatisation Environnement (AFCE). (2024).** Inventaire des émissions de fluides frigorigènes pour la France métropole – Résultats 2022 et estimation provisoire. AFCE.
<https://www.afce.asso.fr/rapport-fluides-frigorigenes-septembre-2024/afce.asso.fr+7>
- [4] **ISPRA (2025).** National Inventory Report 2025: Italy – Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol (Rapporto ISPRA 411/2025)
https://emissioni.sina.isprambiente.it/wp-content/uploads/2025/04/NID_2025_Italy_Rapporto_411_2025.pdf
- [5] **European Environment Agency. (2020).** Fluorinated greenhouse gases 2020 (EEA Report No 15/2020).
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/fluorinated-greenhouse-gases-2020>
- [6] **Union européenne. (2009).** Règlement (CE) n° 1005/2009 du Parlement européen et du Conseil du 16 septembre 2009 relatif à des substances qui appauvrissent la couche d’ozone. Journal officiel de l’Union européenne, L 286, 1–30
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32009R1005>
- [7] **World Bank. (2018).** China HCFC Phaseout Project Stage II (P156397).
<https://documents1.worldbank.org/curated/en/666591522341014010/pdf/ITM00194-P156397-03-29-2018-1522341008764.pdf>
- [8] **Stanley, K. M., Say, D., Mühle, J., Harth, C. M., Krummel, P. B., Young, D., O’Doherty, S. J., Salameh, P. K., Simmonds, P. G., Weiss, R. F., Prinn, R. G., Fraser, P. J., & Rigby, M. (2020).** Increase in global emissions of HFC-23 despite near-total

expected reductions. Nature Communications, 11, 397.

<https://doi.org/10.1038/s41467-019-13899-4>

[9] **Simmonds, P. G., Rigby, M., McCulloch, A., Vollmer, M. K., Henne, S., Mühle, J., O'Doherty, S., Manning, A. J., Krummel, P. B., Fraser, P. J., Young, D., Weiss, R. F., Salameh, P. K., Harth, C. M., Reimann, S., Trudinger, C. M., Steele, L. P., Wang, R. H. J., Ivy, D. J., Prinn, R. G., Mitrevski, B., and Etheridge, D. M. (2018).** Recent increases in the atmospheric growth rate and emissions of HFC-23 (CHF₃) and the link to HCFC-22 (CHClF₂) production, Atmos. Chem. Phys., 18, 4153–4169, <https://doi.org/10.5194/acp-18-4153-2018>

[10] **Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer. (1987).** Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer, adopted in Montreal on 16 September 1987. United Nations Treaty Collection. <https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%201522/volume-1522-I-26324-English.pdf>

[11] **United Nations Environment Programme. (2016).** Amendment to the Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer, Kigali, 15 October 2016 <https://ozone.unep.org/treaties/kigali-amendment>

[12] **Velders, G. J. M., Fahey, D. W., Daniel, J. S., McFarland, M. & Andersen, S. O., 2009.** The large contribution of projected HFC emissions to future climate forcing. Proc. Natl Acad. Sci. USA 106, 10949–10954

[13] **Barrault, S., & Nemer, M. (2015).** F-GAS II regulation and refrigerant emission forecasts in France. MINES ParisTech, Centre d'efficacité énergétique des systèmes. <https://www.ces.minesparis.psl.eu/Donnees/data10/1089-F-GasII-and-refrigerant-emissions-forecast-in-France.pdf>

[14] **ADEME & CODA STRATEGIES. (2021).** La climatisation dans le bâtiment : État des lieux et perspectives 2050. ADEME. <https://librairie.ademe.fr/batiment/5182-la-climatisation-dans-le-batiment.html>

[15] **ISTAT. (2022).** Consumi energetici delle famiglie – Anno 2021 <https://www.istat.it/it/files/2022/06/REPORT-CONSUMI-ENERGETICI-FAMIGLIE-2021-DEF.pdf>Wikipedia+7

[16] **De Pasquale, A., Santino, D., Martini, F., & Ferrari, S. (2019).** Benchmark di consumo energetico degli edifici per uffici in Italia [Rapport monographique]. ENEA. <https://www.media.enea.it/component/downloads/?task=download.send&id=307&Itemid=101>

[17] **International Energy Agency. (2018).** The future of cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>

[18] **International Energy Agency. (2023).** Sustainable, affordable cooling can save tens of thousands of lives each year. <https://www.iea.org/reports/sustainable-affordable-cooling-can-save-tens-of-thousands-of-lives-each-year>

[19] **Tréméac, B., Bousquet, P., de Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Marchadier, C., Merchat, M., Poef, P., & Meunier, F. (2012).** Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures. Applied Energy, 95, [numéros de page non précisés].

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.015>

ANNEXES

ANNEXE 1 Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) des différentes substances utilisés en réfrigération et climatisation

SUBSTANCE	FORMULE CHIMIQUE	PRG A HORIZON 100 ANS		
		2 ND RAPPORT (SAR)	4 ^E RAPPORT (AR4)	5 ^E RAPPORT (AR5)
Substances relatives au Protocole de Montréal				
CFC-11	CCl ₃ F	3 800	4 750	4 660
CFC-12	CCl ₂ F ₂	8 100	10 900	10 200
HCFC-22	CHClF ₂	1 500	1 810	1 760
Hydrofluorocarbures (HFC)				
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	1 300	1 430	1 300
HFC-143a	CH ₃ CF ₃	3 800	4 470	4 800
HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	140	124	138
HFC-125	CHF ₂ CF ₃	2 800	3 500	3 170
HFC-32	CH ₂ F ₂	650	675	677
HFC-23	CHF ₃	11 700	14 800	12 400

Figure 14 : Évolution des PRG des principaux CFC, HCFC et HFC utilisés en réfrigération et climatisation

ANNEXE 2 Réglementation liée aux gaz fluorés

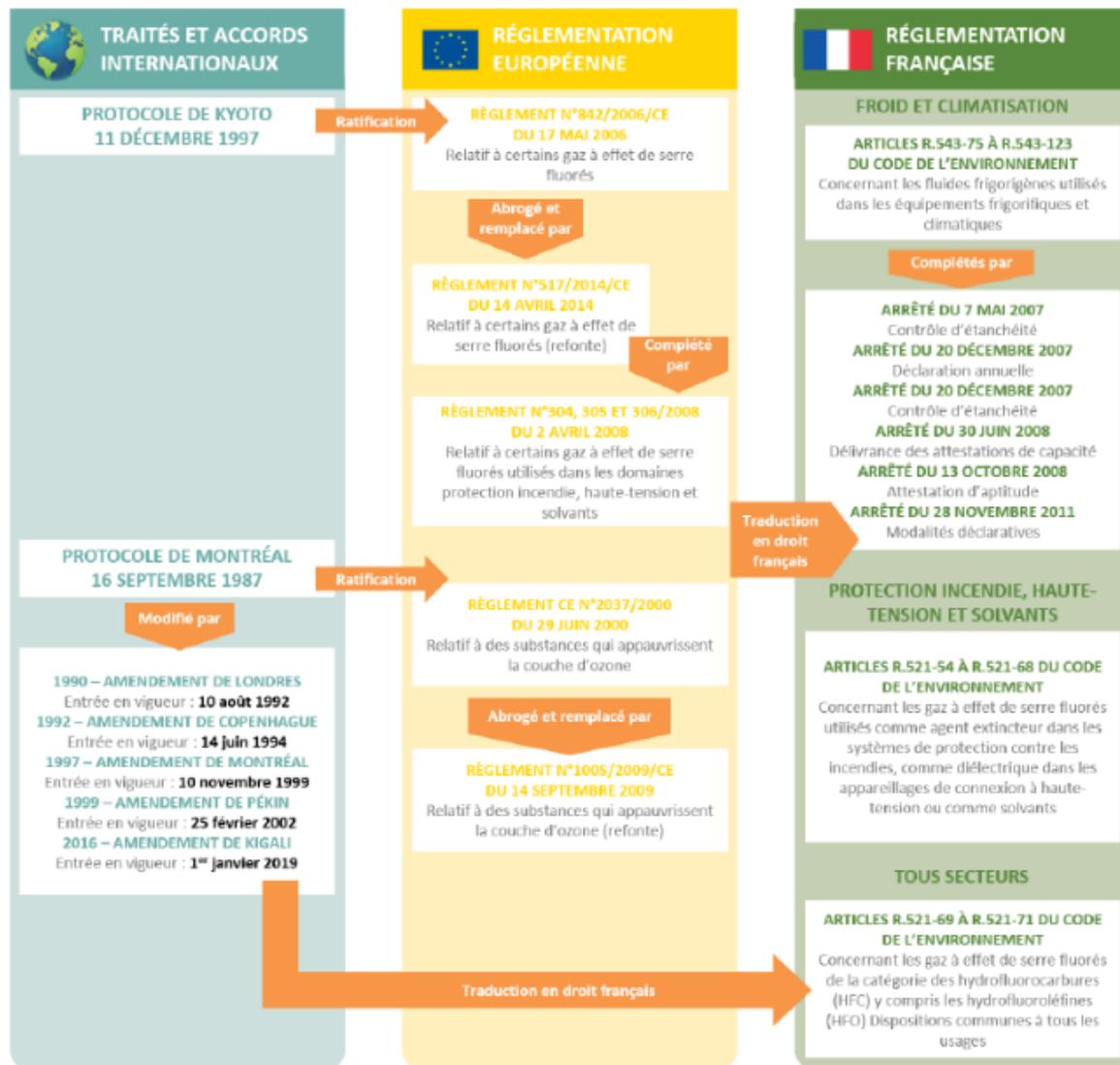


Figure 15 : Récapitulatif des traités, accords et réglementations en vigueur en matière de gaz fluorés (source : ADEME)

ANNEXE 3 Répartition de l'usage des gaz fluorés en Europe dans les systèmes réfrigérants

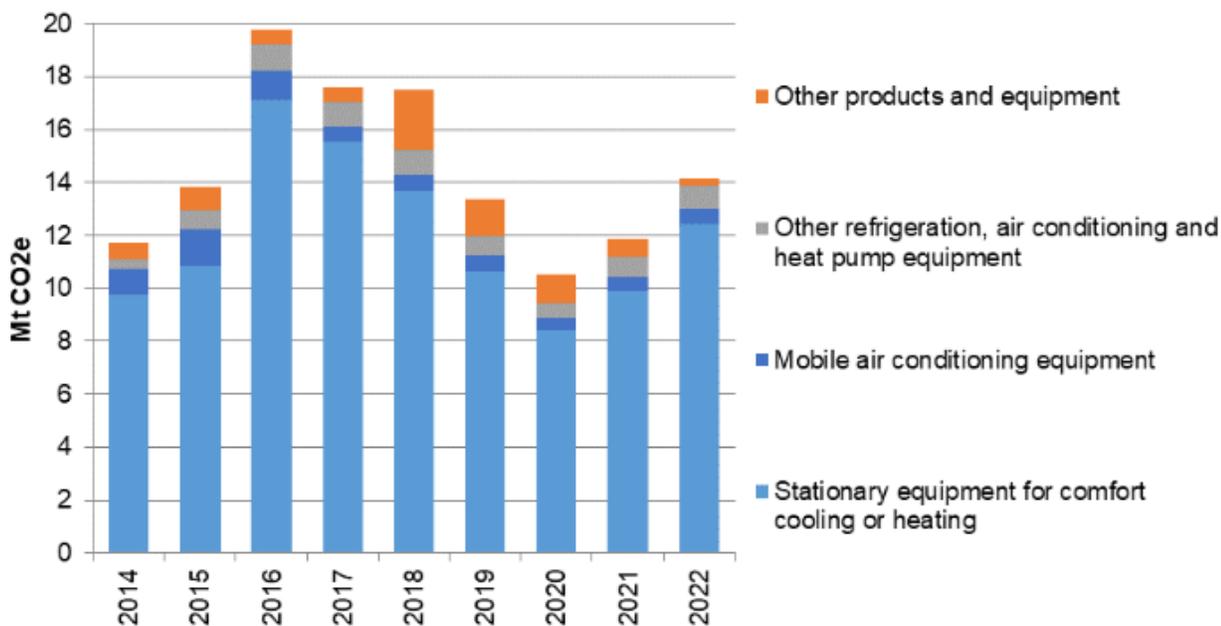


Figure 16 : Évolution des catégories d’approvisionnement en gaz fluorés contenus dans des produits et équipements réfrigérants (en équivalent CO₂) en UE (Source : EAA, 2023)