



Novembre 2017 / 35^e Note d'Information sur les technologies du froid

L'impact du secteur du froid sur le changement climatique

L'IIF publie régulièrement des Notes d'Information à l'intention des décideurs du monde entier. Ces notes présentent une synthèse des connaissances sur des thèmes clés liés aux technologies du froid et à ses applications. Chaque note propose des axes de développement prioritaires pour l'avenir et expose les recommandations de l'IIF en ce sens.

Comme le montre cette Note d'Information, le secteur du froid, conditionnement d'air, pompes à chaleur et cryogénie compris, représente 7,8 % des émissions globales de gaz à effet de serre (sur la base d'estimations de l'IIF pour l'année 2014). Parmi ces émissions, 37 % sont des émissions directes de CFC, HCFC et HFC et 63 % des émissions indirectes dues à la production et au transport de l'énergie utilisée par les systèmes de froid (émissions de CO₂ principalement). L'Amendement de Kigali au protocole de Montréal, adopté en octobre 2016, prévu pour diminuer progressivement la production et la consommation de HFC, devrait permettre d'éviter une hausse des températures moyennes entre 0,1 °C et 0,3 °C d'ici 2100.

Le secteur du froid étant amené à croître fortement dans les décennies à venir, l'IIF propose une série de recommandations pour que cette croissance soit durable, avec un impact limité sur le changement climatique.

Cette Note d'Information a été préparée par Didier Coulomb (Directeur général de l'IIF), Jean-Luc Dupont (Chef du Département d'Information Scientifique et Technique) et Valentin Morlet (rédacteur de Notes d'Information), et a été revue par plusieurs experts des commissions de l'IIF.



INTERNATIONAL INSTITUTE OF REFRIGERATION
INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID

www.iifir.org

iif-iir@iifir.org



[#refrigeration](https://twitter.com/refrigeration)

177, boulevard Malesherbes, 75017 PARIS – France

T: 33 (0) 1 42 27 32 35 – F: 33 (0) 1 47 63 17 98

Introduction

Le froid joue un rôle essentiel et croissant dans l'économie mondiale, avec des contributions très significatives dans le domaine de l'alimentation, de la santé, du confort, de l'énergie et de la protection de l'environnement.

Le secteur du froid regroupe l'ensemble des systèmes frigorifiques (y compris les systèmes cryogéniques), de conditionnement d'air et de pompes à chaleur, soit environ 3 milliards d'équipements en service dans le monde ^[1].

Ce secteur est amené à croître fortement dans les décennies à venir, notamment dans les pays en développement où la demande de froid est en forte augmentation. Cette croissance doit être durable, avec un impact limité sur l'environnement, et notamment sur le changement climatique.

Dans cette optique, cette Note d'Information de l'IIF vise à évaluer précisément l'impact du secteur du froid sur le changement climatique. Cette démarche est un préalable indispensable en vue de clarifier les enjeux climatiques liés au froid.

Cette note présente dans un premier temps une estimation des émissions de gaz à effet de serre (GES) liées au secteur du froid :

- les émissions directes de frigorigènes à effet de serre – essentiellement les CFC (chlorofluorocarbures), HCFC (hydrochlorofluorocarbures) et HFC (hydrofluorocarbures); celles-ci résultent principalement de fuites au niveau des systèmes frigorifiques ou d'élimination non contrôlée de ces systèmes ;
- les émissions indirectes de GES résultant de la production d'énergie nécessaire au fonctionnement de ces systèmes.

Il existe plusieurs indicateurs permettant d'intégrer à la fois les émissions directes et indirectes, tels que le TEWI (Total Equivalent Warming Impact - impact total équivalent sur le réchauffement) et le LCCP (indice de performance climatique sur le cycle de vie). Le LCCP ^[2], plus complet, est utilisé ici.

Cette Note d'Information comporte également des projections sur l'évolution future des émissions directes de GES liées au secteur du froid. Elle évalue en particulier les bénéfices potentiels de la mise en application du récent Amendement de Kigali prévoyant au niveau mondial une réduction progressive de la production et de la consommation de HFC (voir Tableau 1).

Les estimations présentées dans cette Note d'Information sont détaillées dans le document « Annexes à la 35^e Note » consultable sur le site web de l'IIF (<http://bit.ly/notesIIF>).

Méthode

1.1. Les émissions directes et indirectes

Les émissions de GES dans le secteur du froid peuvent être classifiées en deux groupes : les émissions directes et les émissions indirectes.

Les émissions directes surviennent lors des opérations de maintenance ou en fin de vie des appareils frigorifiques, mais sont également dues à des fuites au cours de leur fonctionnement. Cette note se consacre aux émissions de 3 types de frigorigènes : les CFC (chlorofluorocarbures), les HCFC (hydrochlorofluorocarbures) et les HFC (hydrofluorocarbures). Ce sont ceux qui participent le plus au réchauffement climatique, comme le montrent leurs Pouvoirs de Réchauffement Planétaire (PRP ou GWP) élevés.

Il est à noter que depuis les années 1990, le Protocole de Montréal réglemente la production et la consommation des fluides chlorés (CFC, HCFC) qui participent à l'appauvrissement de la couche d'ozone, en vue de leur élimination. Dans de nombreuses applications, ils ont été remplacés par les HFC, qui eux aussi sont maintenant régis par le Protocole de Montréal, dans le cadre de l'Amendement de Kigali (voir Tableau 1).

Les émissions indirectes sont liées à la production de l'énergie nécessaire au fonctionnement des systèmes frigorifiques :

- la production de l'électricité nécessaire au fonctionnement des systèmes (voir [Annexe D](#), [Annexe F](#)) entraîne des émissions de GES : du CO₂ est émis essentiellement lors de la combustion des différents types de combustibles mais aussi lors de l'extraction du gaz naturel ; du méthane (CH₄) est émis lors de l'extraction de charbon essentiellement ; du protoxyde d'azote (N₂O) est émis de manière non négligeable lors de la combustion de charbon ;
- la climatisation automobile entraîne une surconsommation de carburant (voir [Annexe E](#)) et donc des émissions de CO₂ et de N₂O supplémentaires.
- D'autres sources d'émissions indirectes existent comme les émissions liées au transport frigorifique et au système à ab- et adsorption utilisant comme source de chaleur la combustion d'un combustible. Mais au vu du nombre d'unités en service, les émissions liées à ces systèmes sont considérées comme négligeables comparées aux autres (voir [Annexe E](#)).

Le calcul du LCCP inclut, en plus de ces deux types d'émissions, les émissions liées à la fabrication des matériaux et des frigorigènes ainsi que celles liées au traitement en fin de vie des appareils. Sur la base des données de la 32^e Note d'Information de l'IIF sur le LCCP ^[2], l'impact de ces émissions est considéré comme négligeable.

Tableau 1 : Récapitulatif des objectifs des Protocoles de Montréal ^[3, 4] et de Kyoto ^[5]

Protocole de Montréal
<ul style="list-style-type: none">• Élimination de la production et de la consommation des CFC en 1996 pour les pays développés, en 2010 pour les pays en développement (Amendement de Londres, 1990).• Élimination de la production et de la consommation des HCFC en 2020 pour les pays développés et en 2030 pour les pays en développement (Amendement de Montréal, 2007).• Réduction de la production et de la consommation des HFC de 85 % en 2036 pour les pays développés et de 80 ou 85 % en 2045 ou 2047 pour les pays en développement (Amendement de Kigali, 2016).
Convention de Rio et Protocole de Kyoto
<ul style="list-style-type: none">• Objectif : « Stabiliser les concentrations GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ».• 6 gaz concernés : CO₂ (dioxyde de carbone), CH₄ (méthane), N₂O (oxyde nitreux), HFC (hydrofluorocarbures), PFC (hydrocarbures perfluorés), SF₆ (hexafluorure de soufre).• L'Accord de Paris concerne ces 6 gaz à effet de serre.

Le Tableau 2 détaille les gaz à effet de serre considérés dans cette Note d'Information. Les GWP ^[6], basés sur les durées de vie des GES dans la haute atmosphère, sont donnés sur un intervalle de temps de 100 ans. Les émissions directes tiennent compte du fait que les CFC, HCFC et HFC ne sont pas utilisés uniquement par le secteur du froid. Les pourcentages d'utilisation de ces gaz par le secteur du froid sont fournis en [Annexe A](#).

Tableau 2: Liste des GES émis par le secteur du froid

Substance		GWP ₁₀₀ ^[6]	Durée de vie (années) ^[6]
Émissions directes			
CFC	CFC-11	4 660	45
	CFC-12	10 200	100
	CFC-115	7 670	1 020
HCFC	HCFC-22	1 760	11,9
	HCFC-123	79	1,3
	HCFC-124	527	5,4
HFC	HFC-32	677	5,2
	HFC-125	3170	28,2
	HFC-134a	1300	13,4
	HFC-143a	4800	47,1
	HFC-152a	138	1,5
Émissions indirectes			
	CO ₂	1	Pas de durée de vie unique
	NH ₄	28	12,4
	N ₂ O	265	121

1.2. Concepts utilisés pour évaluer l'impact des émissions

1.2.1. Forçage radiatif

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) définit le forçage radiatif ^[7] comme le taux de transfert d'énergie par unité surfacique du globe, mesuré dans les hautes couches de la troposphère, exprimé en watt par mètre carré. Il « indique une perturbation imposée par l'extérieur dans le bilan énergétique du système climatique terrestre. Une telle perturbation peut être provoquée par des changements séculaires dans les concentrations des espèces actives sur le plan radiatif (par exemple le CO₂, les aérosols), des changements dans le rayonnement solaire incident sur la planète, ou d'autres changements qui affectent l'énergie radiative absorbée par la surface (par exemple des changements dans les propriétés de réflexion de la surface). Ce déséquilibre du bilan radiatif peut conduire à un nouvel état d'équilibre du système climatique » ^[8]. Pour montrer

la responsabilité de l'homme, l'année 1750 (début de l'époque industrielle) a été prise comme année de référence : un gaz ayant la même capacité radiative qu'en 1750 aura donc un forçage radiatif nul.

La définition et la validité du forçage radiatif sont acceptées par la communauté scientifique, mais il est à souligner que le forçage radiatif est une grandeur instantanée puisqu'elle dépend de la concentration atmosphérique actuelle d'un gaz qui résulte de ses émissions passées et de sa durée de vie atmosphérique.

Pour résumer, le forçage radiatif donne une très bonne indication du poids d'un gaz dans le changement climatique à un instant donné, c'est-à-dire de l'impact des émissions antérieures à cet instant. Il n'est donc en rien une estimation de l'impact des émissions actuelles.

1.2.2. GWP

Pour estimer l'impact des émissions actuelles, il faut prendre en compte les mécanismes climatiques et ces derniers sont encore trop peu connus. Il est donc à l'heure actuelle très difficile de prédire de manière précise l'impact total d'un gaz, c'est à dire depuis son émission jusqu'à sa désintégration dans l'atmosphère.

Pour pouvoir donner un ordre de grandeur de l'impact à long terme et comparer les différents GES, le GIEC ^[9] a accepté la notion de GWP. C'est un indicateur assez simple qui correspond à l'intégration temporelle du forçage radiatif due à l'émission instantanée d'une masse d'un gaz, relative à l'émission instantanée d'une masse égale de CO₂.

Le GWP prend en compte le forçage radiatif d'un gaz, sa durée de vie ainsi que l'évolution de sa concentration au cours du temps (il y a encore des incertitudes non négligeables sur ce point). En multipliant les émissions massiques d'un GES par son GWP, on obtient ces émissions en CO₂-équivalent. Cette unité permet de pouvoir comparer les différents GES en convertissant leurs émissions dans une unité commune.

Le GWP rencontre quelques limites. L'intervalle de temps, qui est choisi par « l'utilisateur », influence les résultats obtenus. Il est généralement fixé à 100 ans (GWP₁₀₀). Certains opposants aux HFC contestent l'utilisation du GWP₁₀₀ et optent pour le GWP₂₀, plus conforme selon eux à la durée de vie moyenne des HFC (21,7 ans) ^[10].

Dans cette note d'information, c'est le GWP₁₀₀ qui est utilisé pour obtenir des estimations à long terme. Au vu de la durée de vie de certains gaz, notamment le CO₂, 20 ans semble une échelle trop courte et contribuerait à surestimer l'impact réel des gaz à faible durée de vie ^[11].

Par ailleurs, d'autres indicateurs (GTP, iGTP, TEMP... ^[12, 13, 14, 15, 16]) ont été développés, mais aucun n'a fait consensus pour remplacer le GWP ^[17, 18].

Estimation de l'impact du froid sur le changement climatique

2.1. Estimation de l'impact des émissions passées à partir du forçage radiatif

Comme expliqué précédemment, le forçage radiatif permet d'évaluer à un instant donné l'impact d'un (ou de plusieurs) gaz présents dans l'atmosphère, résultant de ses/leurs émissions antérieures, et la concentration qui en résulte à cet instant.

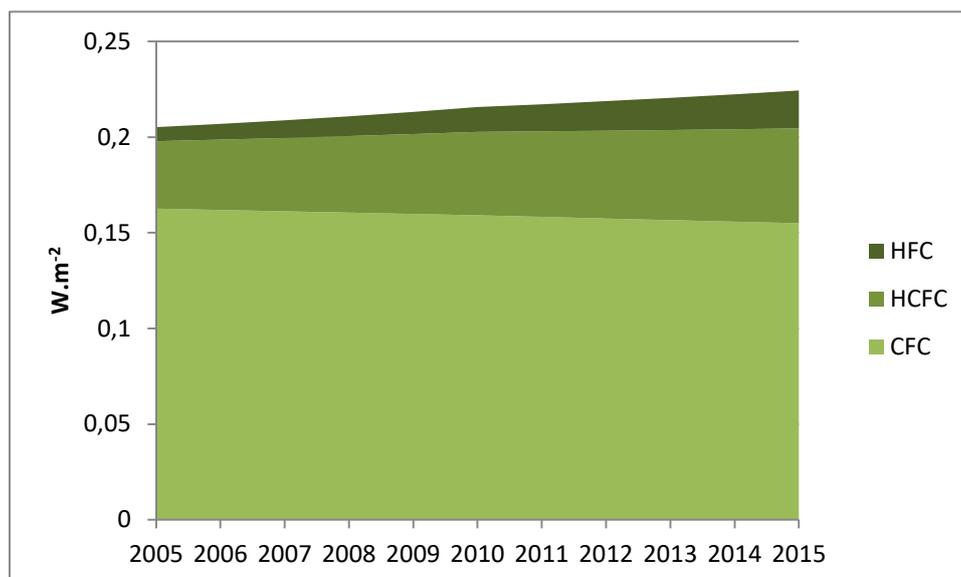


Figure 1 : Évolution du forçage radiatif total des CFC, HCFC et HFC (secteur du froid uniquement) entre 2005 et 2015. Sources : WMO ^[4] et GIEC ^[7]. (Voir [Annexe A](#), [Annexe B](#))

On observe sur la Figure 1 que les CFC représentent la majorité du forçage radiatif des frigorigènes (69 % en 2015 – 0,16 W.m²). Cela peut paraître surprenant à première vue puisqu'ils sont régis par le Protocole de Montréal depuis 1987 et que leur production a été interdite depuis 2010 dans tous les pays (pays de l'Article 5 et hors Article 5). Mais cela est logique lorsque l'on prend en compte la durée de vie des CFC dans l'atmosphère. Les CFC ont connu un pic d'émission dans les années 1990, qui représente encore une bonne partie du forçage radiatif actuel. Mais leur impact diminue, ce qui montre bien l'impact positif du Protocole de Montréal. On peut toutefois estimer que les CFC vont encore pour de nombreuses décennies représenter une part non négligeable du forçage radiatif total ^[19].

Pour les HCFC, on note une légère augmentation du forçage radiatif. Mais celui-ci devrait se stabiliser en 2020 avant de diminuer par la suite ^[19]. Ceci est la conséquence du calendrier de réduction progressive résultant du Protocole de Montréal et de leur durée de vie relativement faible (environ 10 ans).

L'impact des HFC en termes de forçage radiatif peut être pour le moment jugé comme relativement faible, mais il est à noter que le forçage radiatif des HFC a été multiplié par 2,70 en moins de 10 ans et qu'il est sur une pente ascendante en raison du remplacement des CFC et des HCFC au profit des HFC. Ceci illustre l'importance de l'Amendement de Kigali pour la réduction progressive des HFC.

Au total en 2015, comme indiqué sur la Figure 1, **les émissions directes avaient un forçage radiatif de 0,23 W.m²**. Par comparaison, **la somme des émissions indirectes représentait 0,14 W.m²** (voir les estimations de l'IIF en [Annexe B](#)). On voit donc que les émissions directes passées ont eu en 2015 un impact sur le changement climatique supérieur à celui des émissions indirectes passées.

Sur la base de ces estimations, on peut noter aussi que **le forçage radiatif lié au secteur du froid représente 12 % du forçage radiatif global**. Ces données sont pertinentes pour chiffrer l'impact des émissions passées mais elles ne sont en rien révélatrices de l'impact des émissions actuelles et futures. Cet impact est étudié dans le paragraphe suivant.

2.2. Estimation de l'impact des émissions actuelles à partir du GWP

2.2.1. Émissions globales

Le but ici est de chiffrer l'impact de l'ensemble des émissions actuelles liées au froid. Le GWP_{100} est ici utilisé pour mettre les émissions des différents gaz sur une même échelle : le « CO_2 équivalent ». Par la suite, sauf indication contraire, toutes les estimations d'émissions correspondent à des valeurs annuelles.

Il est important de comparer les émissions directes (CFC, HCFC et HFC) et indirectes (CO_2 essentiellement) générées par le secteur du froid pour évaluer leur impact sur le changement climatique.

Sur les graphiques ci-dessous, basés sur des estimations de l'IIF (voir [Annexe C](#)), on voit que **les émissions directes liées au secteur du froid représentent environ 1,53 Gt CO_2 eq, soit 37 % des émissions totales** de ce secteur.

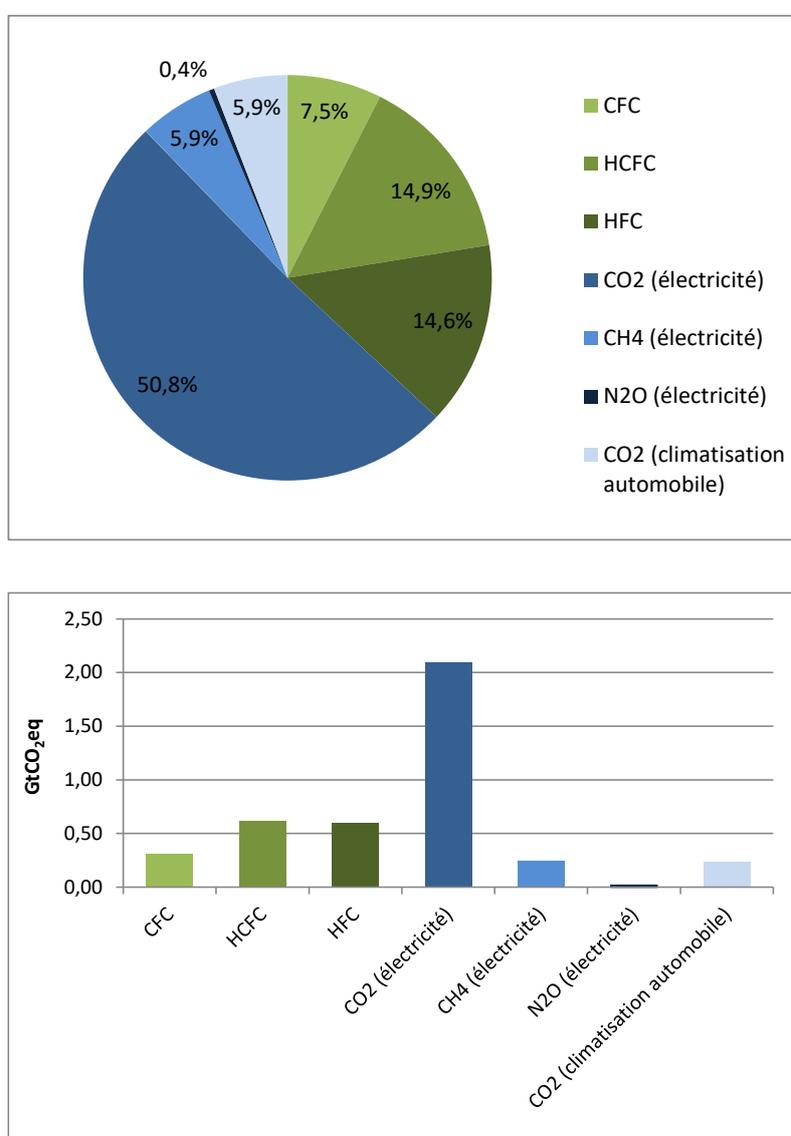


Figure 2 : Émissions des différents GES en 2014 et répartition de chacun d'eux (secteur du froid uniquement). (Voir [Annexe A](#), [Annexe C](#), [Annexe D](#), [Annexe E](#), [Annexe F](#).)

En 2014, les émissions de HFC et de HCFC étaient sensiblement égales (0,6 GtCO₂eq). La tendance actuelle est à la diminution des émissions de HCFC [20], du fait du Protocole de Montréal, et à l'augmentation des émissions de HFC [21]. Les réglementations sur les HFC mises en place dans plusieurs pays étant récentes, leur impact est beaucoup plus faible. Concernant les CFC, leurs émissions sont de l'ordre de 0,31 GtCO₂eq, soit une diminution de plus de 96 % par rapport aux émissions du début des années 1990 [6].

Les émissions indirectes du secteur du froid, imputables à la consommation d'énergie, s'élèvent à environ 2,61 GtCO₂eq (63 %) (voir [Annexe D](#), [Annexe E](#), [Annexe F](#)).

Les émissions indirectes les plus importantes sont celles liées à la production d'électricité. La consommation d'électricité du secteur du froid engendre des émissions indirectes de l'ordre de 2,37 GtCO₂eq (CO₂ [22, 23] : 2,10 GtCO₂eq ; CH₄ [24, 25, 26] : 0,24 GtCO₂eq ; N₂O [22] : 0,02 GtCO₂eq). La consommation de carburants [1, 22, 27] liée à l'utilisation de la climatisation automobile n'est pas négligeable, puisqu'elle représente 9,3 % des émissions indirectes (0,24 GtCO₂eq).

Au total, selon les estimations de l'IIF, le secteur du froid représente 4,14 GtCO₂eq, soit 7,8 % des émissions globales de GES.

2.2.2. Émissions régionales

Dans cette partie, nous avons estimé les émissions régionales ou nationales de GES liées à l'utilisation du froid. Nous nous sommes basés pour cela sur les déclarations des pays à l'UNFCCC [28] dans le cadre du Protocole de Kyoto, ou d'études spécifiques à certains pays (voir [Annexe G](#)).

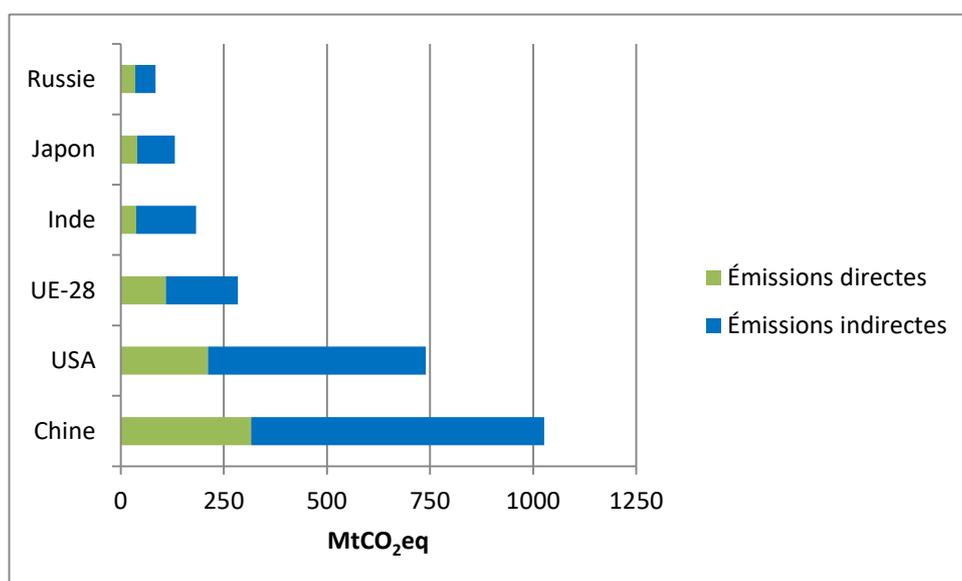


Figure 3 : Émissions de GES dans différents pays et régions (secteur du froid uniquement) en 2014

La Chine [29, 30, 31, 32] et les États-Unis [32, 33, 34] sont les plus gros émetteurs de GES : respectivement 1000 MtCO₂eq et 750 MtCO₂eq (Figure 3). Cela représente près de 43 % des émissions globales du secteur du froid.

L'Union Européenne [35, 36], deuxième zone économique mondiale derrière les États-Unis en termes de produit intérieur brut (PIB), émet 2,6 fois moins de GES que les États-Unis, malgré une population plus importante.

Autre remarque intéressante, l'Inde ^[32, 33], deuxième pays le plus peuplé au monde, a des émissions assez faibles, seulement 180 MtCO₂eq. Cela atteste de la diffusion encore limitée de l'utilisation du froid dans ce pays. Mais ces émissions devraient toutefois augmenter fortement dans un avenir proche compte tenu de la forte croissance de la demande de froid.

Pour mieux appréhender l'utilisation du froid et les émissions qui en découlent, il est intéressant d'analyser les émissions par habitant (figure 4).

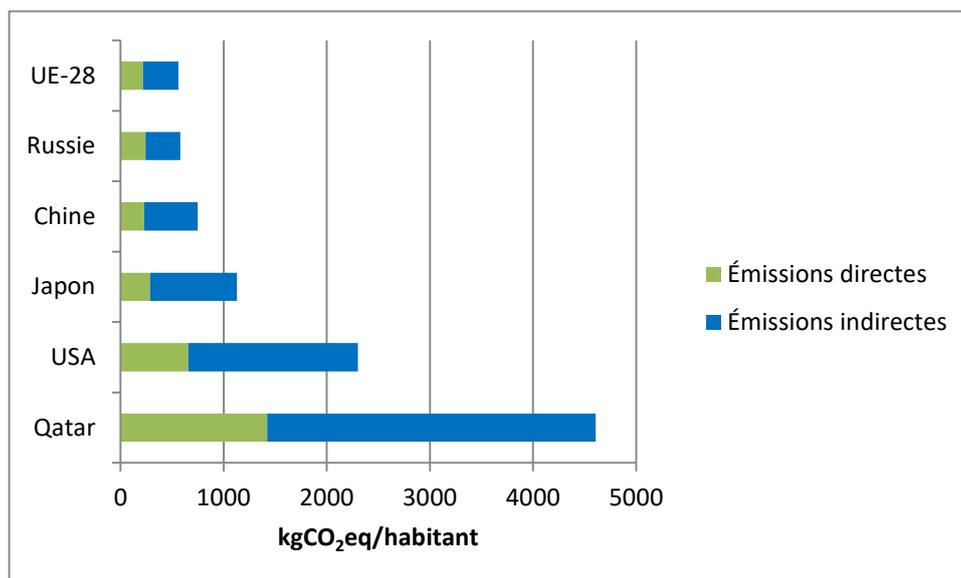


Figure 4 : Émissions de GES par habitant dans différents pays et régions (secteur du froid uniquement) ([Annexe G](#))

Parmi les pays étudiés, le Qatar ^[28] est le plus gros émetteur par habitant de GES liées à l'utilisation du froid avec plus de 4500 kgCO₂eq/habitant. On retrouve ensuite les États-Unis avec 2300 kgCO₂eq/habitant. Ces chiffres illustrent l'impact des climats chauds sur les besoins de froid, et en particulier de conditionnement d'air, ainsi que l'impact des sources d'énergie utilisées pour la production d'électricité.

Il est à noter que pour la Chine, contrairement aux autres pays présentés dans la Figure 4, une importante partie de la population (en zone rurale notamment) n'a qu'un accès limité aux technologies du froid. Cela explique la valeur relativement faible des émissions par habitant pour la Chine. Pour l'Europe et la Russie, on obtient des émissions par habitant assez similaires (environ 550 kgCO₂/habitant).

On peut souligner aussi que le ratio émissions directes/émissions indirectes varie assez fortement selon les pays. Cette variabilité est frappante lorsque l'on examine les pays européens. Ainsi, en Allemagne ^[35] (où la production d'électricité est assurée en grande partie à partir des énergies fossiles), les émissions indirectes pèsent 75 % des émissions de GES liées au secteur du froid. Mais en France (pays où l'énergie nucléaire est prépondérante pour la production d'électricité), elles ne représentent que 39 % et même 6 % en Islande où l'électricité est produite exclusivement à partir d'énergies renouvelables ^[35].

Ces chiffres reflètent la situation en 2014, qui peut être un peu différente de la situation actuelle (par exemple au Japon ^[28] du fait de la fermeture des centrales nucléaires à la suite du séisme de 2011) et qui peut changer dans les prochaines années.

2.3. Prévisions sur les émissions futures

Le but de cette partie est de prédire l'évolution future des émissions directes liées au secteur du froid et d'évaluer en particulier l'impact de l'Amendement de Kigali sur cette évolution. Pour cela, on compare l'évolution des émissions tenant compte de la mise en œuvre de cet amendement à des scénarios « Business as Usual » (BAU) développés par Velders et al ^[21], dans lesquels l'Amendement de Kigali n'est pas pris en compte. Ces scénarios se basent sur plusieurs modèles socio-économiques différents.

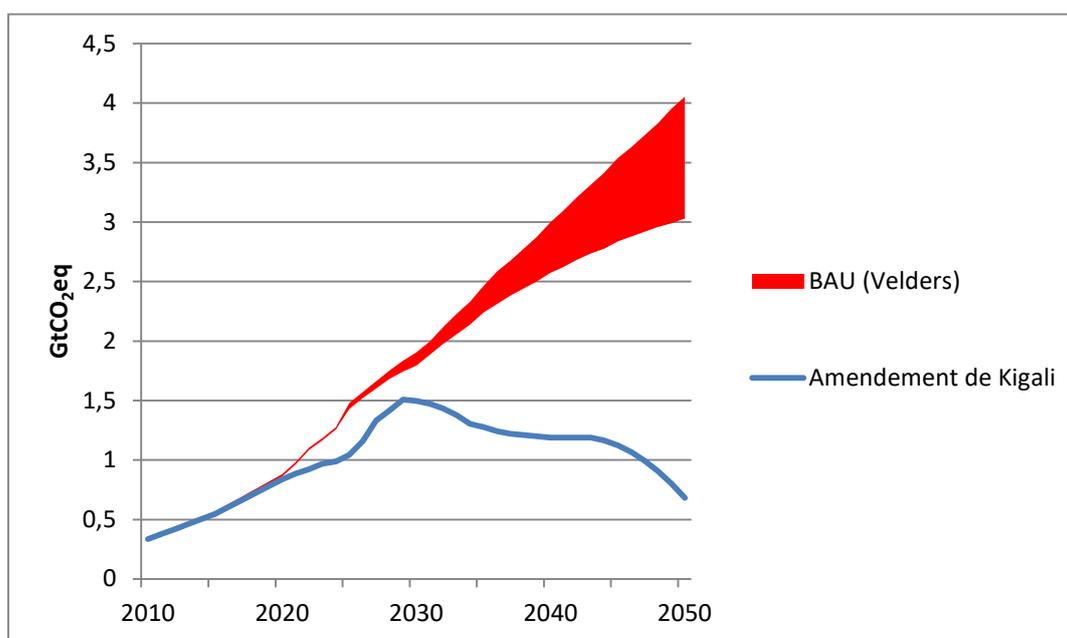


Figure 5 : Évolution des émissions de HFC (secteur du froid uniquement) avec (courbe bleue) et sans (aire rouge) l'Amendement de Kigali ([Annexe H](#))

La Figure 5 montre que, sans application de l'Amendement de Kigali, les émissions de HFC imputables au secteur du froid s'élèveraient à des valeurs comprises entre 3 et 4 GtCO₂eq ^[21] à l'horizon 2050. En revanche, selon les estimations de l'IIF, en prenant en compte l'Amendement de Kigali, ces émissions de HFC seraient alors limitées à environ 0,7 GtCO₂eq en 2050 après avoir connu un pic à la fin des années 2020 aux alentours de 1,5 GtCO₂eq.

Au total, sur la période 2015-2050, cela représente une baisse de 44 % à 51 % des émissions cumulées de HFC. Avec l'Amendement de Kigali, on obtient en effet des émissions cumulées de 39 GtCO₂eq alors que sans celui-ci, elles atteindraient entre 70 GtCO₂eq et 80 GtCO₂eq.

Ces projections illustrent bien l'importance des bénéfices potentiels de l'Amendement de Kigali sur le climat dans les prochaines décennies.

Il est également intéressant de prédire l'évolution des émissions directes de l'ensemble des frigorigènes (CFC, HCFC et HFC) utilisés dans le secteur du froid.

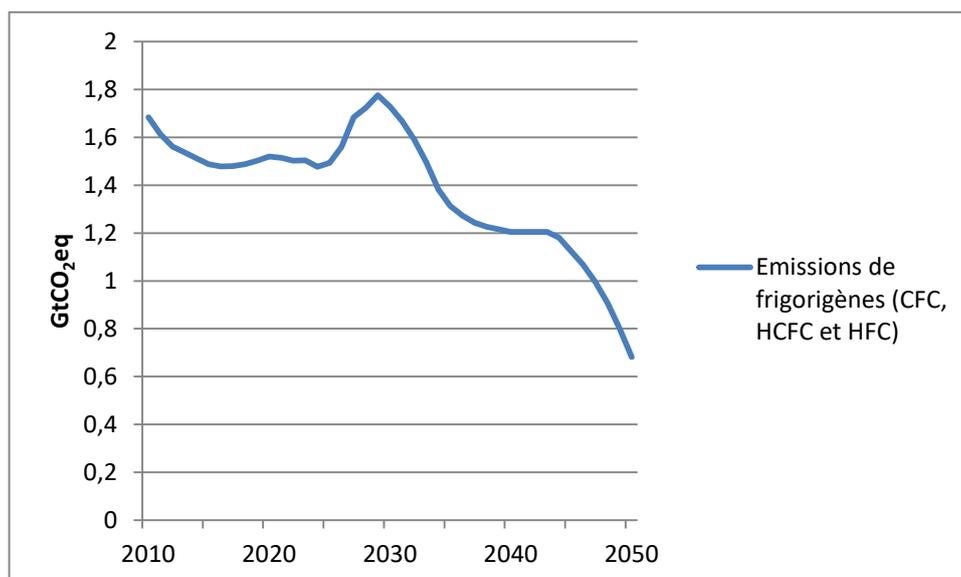


Figure 6 : Évolution des émissions de frigorigènes de type CFC, HCFC et HFC suite à l'Amendement de Kigali (Annexe H)

À la lecture de la Figure 6, le premier résultat important est la diminution des émissions de frigorigènes en 2050 par rapport à 2015. On passe en effet de 1,5 GtCO₂,eq en 2015 à 0,7 GtCO₂,eq en 2050. Cette diminution est à attribuer en premier lieu à l'efficacité du Protocole de Montréal et de ses différents amendements.

Il est à souligner que, sans l'application de l'Amendement de Kigali, les émissions globales de frigorigènes augmenteraient.

Il faut noter également que, lors de la signature de l'Amendement de Kigali, il a été avancé par de nombreux responsables politiques et organisations que la régulation des HFC qu'il prévoit permettrait d'éviter une hausse des températures moyennes de la planète jusqu'à 0,5 °C [37, 38, 39] d'ici 2100. Ce chiffre est à comparer avec l'objectif de l'Accord de Paris qui est « de contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en-dessous de 2 °C par rapport aux niveaux pré-industriels »[40]. En fait, ce chiffre de 0,5 °C est extrapolé d'une publication datant de 2013 [41] dans laquelle les auteurs estimaient qu'en l'absence de réglementation, les émissions de HFC pourraient contribuer à une élévation des températures moyennes de 0,35 °C à 0,5 °C en 2100. De plus, cette publication se basait sur une étude controversée réalisée en 2009 [42] qui surestimait les émissions futures de HFC.

De nombreux scientifiques [43, 44] estiment aujourd'hui que **l'Amendement de Kigali devrait permettre une réduction de la température située entre 0,1 °C et 0,3 °C d'ici 2100** (et non une réduction de 0,5 °C).

Conclusion

Il ressort des estimations faites dans cette Note d'Information que le forçage radiatif lié au secteur du froid (intégrant les systèmes frigorifiques ainsi que les systèmes de conditionnement d'air, de pompes à chaleur et cryogéniques) représente 12 % du forçage global. Toutefois, cet indicateur, pertinent pour chiffrer l'impact des émissions passées, n'est pas représentatif de l'impact des émissions actuelles et futures.

À cet effet, nous avons fait le choix d'utiliser le GWP₁₀₀ pour estimer l'impact actuel des émissions liées au secteur du froid sur le changement climatique.

Sur ces bases, **le secteur du froid représente 7,8 % des émissions globales de GES** (sur la base d'estimations pour l'année 2014).

Ces émissions se composent de 63 % d'émissions indirectes et de 37 % d'émissions directes de frigorigènes à effet de serre, avec une répartition variable selon les pays et dans le temps.

Concernant **les émissions directes**, il est important de poursuivre les actions menées avec succès dans le cadre du protocole de Montréal concernant les CFC et les HCFC. De plus, maîtriser les émissions de HFC à fort GWP ^[42, 45] est désormais prioritaire, en particulier dans le cadre de l'Amendement de Kigali ^[3].

Selon les estimations IIF, la mise en œuvre de l'amendement de Kigali permettrait de réduire les émissions globales cumulées de HFC dans une proportion comprise entre 44 % et 51 % sur la période 2015-2050 par rapport à un scénario marqué par l'absence de réglementation ^[21].

Il est important de souligner que l'Amendement de Kigali, en réglementant l'utilisation des HFC, permettra d'éviter une hausse substantielle des températures moyennes comprise entre 0,1 °C et 0,3 °C d'ici 2100. Il est à noter que le chiffre de 0,5 °C souvent annoncé est surestimé. Ce résultat est à mettre en perspective avec l'objectif de l'Accord de Paris visant à contenir la hausse des températures globales moyennes bien en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels.

Pour remplacer les frigorigènes à GWP élevé, il existe aujourd'hui de nombreux frigorigènes alternatifs ^[46, 47] avec des efficacités énergétiques comparables ou supérieures. On peut citer l'ammoniac, le CO₂, les hydrocarbures et les HFO. Ces alternatives peuvent toutefois présenter certains risques en termes de sécurité (inflammabilité, toxicité) ou d'environnement (produits de décomposition), ou certains inconvénients (pression d'utilisation élevée, coût supérieur). Ceux-ci doivent être pris en compte, tant au niveau de la conception des installations frigorifiques que de la formation et de la certification des opérateurs.

Des technologies alternatives à la compression mécanique, sans frigorigènes, peuvent aussi être développées et avoir un impact positif.

Les émissions indirectes, qui sont majoritaires, dépendent essentiellement de deux facteurs:

- l'efficacité énergétique des systèmes frigorifiques ;
- l'énergie primaire utilisée pour la production d'électricité (charbon, pétrole, gaz, énergie nucléaire, énergie renouvelable etc.) ainsi que le rendement du transport de l'électricité.

Le potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique est limité au final par les lois de la thermodynamique et les contraintes de coût mais il demeure très important de rechercher un accroissement de l'efficacité grâce à la recherche et aux innovations techniques. Des solutions peuvent être mises en œuvre pour limiter les pertes, notamment grâce à des systèmes de récupération d'énergie ou par une meilleure isolation. Un autre potentiel d'amélioration réside dans une utilisation rationnelle du conditionnement d'air et des

stratégies de régulation intelligentes, par exemple en choisissant des températures de confort qui ne soient pas trop basses en été, tout en évitant de refroidir inutilement des pièces vides.

Au niveau de l'énergie primaire, le potentiel de réduction des émissions est bien plus important. Cependant il ne dépend que très peu du secteur du froid lui-même mais davantage des politiques énergétiques nationales. La réduction de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles est une nécessité.

De par la nature des gaz émis, la réduction des émissions directes ou la réduction des émissions indirectes auront des conséquences différentes sur le changement climatique. Toutefois, celles-ci sont liées. En effet contrairement aux HFC et aux HCFC qui ont une durée de vie dans l'atmosphère d'une vingtaine d'année, le CO₂ a une durée de vie dans l'atmosphère de plusieurs siècles et intervient dans de nombreux mécanismes climatiques [11, 48]. De ce fait, la réduction des émissions directes (HFC et HCFC) aurait un impact positif très substantiel à court et moyen terme alors que la régulation des émissions de CO₂ aurait un impact à plus long terme.

La priorité mondiale dans la lutte contre le changement climatique doit donc être de réduire les émissions de CO₂. Sur ce point le secteur du froid a son rôle à jouer en proposant des systèmes plus efficaces sur le plan énergétique. Pour autant il faut poursuivre activement les efforts pour réduire les émissions directes, qui joueront un rôle important dans la limitation du réchauffement climatique.



Recommandations

Compte tenu de la demande croissante de froid et de conditionnement d'air, en particulier dans les pays en développement, l'utilisation des technologies du froid est amenée à se développer fortement. Afin de limiter leur impact sur le changement climatique, il est nécessaire de poursuivre les initiatives engagées pour réduire les émissions de GES.

En ce qui concerne les émissions directes (37 % des émissions totales du secteur), l'IIF encourage les gouvernements et les différents acteurs du secteur à se mobiliser pour faire de l'Amendement de Kigali un succès et à remplacer dès que possible les frigorigènes HCFC et HFC à fort impact sur le réchauffement de la planète par des frigorigènes à faible impact. Cela passe aussi par des efforts menés en matière de confinement et de récupération, notamment pour les frigorigènes dont l'impact sur le réchauffement de la planète n'est pas négligeable ou qui présentent des risques en termes de sécurité (inflammabilité, toxicité).

Les émissions indirectes du secteur (63 %) restent majoritaires en termes d'impact sur le climat. Il est primordial pour les gouvernements de favoriser l'utilisation des énergies renouvelables et de promouvoir l'efficacité énergétique dans l'ensemble de l'économie, tout en encourageant les programmes éducatifs sur l'utilisation rationnelle de l'énergie. Il est essentiel de poursuivre la recherche et le développement de frigorigènes alternatifs et de technologies frigorifiques alternatives présentant une efficacité énergétique élevée et un coût modéré.

L'IIF, grâce à ses conférences scientifiques, son réseau international d'experts et ses diverses publications, entend jouer un rôle moteur dans ces actions en faveur de la limitation du réchauffement de la planète et du développement durable.

Références

- [1] IIF, COULOMB Didier, DUPONT Jean-Luc, PICHARD Audrey. Le rôle du froid dans l'économie mondiale. *29^e Note d'Information sur les technologies du froid* **[en ligne]**. 2015. Disponible sur : <<http://bit.ly/IIF-NI-29-FR>> (Consulté le 13/10/2017)
- [2] IIF, HWANG Yunho. Harmonisation de la méthode de calcul de l'indice de performance climatique sur le cycle de vie. *32^e Note d'Information sur les technologies du froid* **[en ligne]**. 2016. Disponible sur : <<http://bit.ly/IIF-NI-32-FR>> (Consulté le 13/10/2017)
- [3] CLARK Ezra, WAGNER Sonja. The Kigali Amendment to the Montreal Protocol: HFC Phase Down. *OzonAction Fact Sheet* **[en ligne]**. 2016. Disponible sur : <<http://bit.ly/OzonAction-FactSheet-Kigali>> (Consulté le 13/10/2017)
- [4] IIF. Summary sheet on the Montreal Protocol. *Fiche de synthèse de l'IIF* **[en ligne]**. 2017. Disponible sur : <<http://bit.ly/IIF-Summary-Montreal-EN>> (Consulté le 13/10/2017)
- [5] IIF. Fiche de synthèse sur le Protocole de Kyoto. *Fiche de synthèse de l'IIF* **[en ligne]**. 2017. Disponible sur : <<http://bit.ly/IIF-Synthèse-Kyoto-FR>> (Consulté le 13/10/2017)
- [6] WMO, UNEP, National OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, EUROPEAN COMMISSION. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014* **[en ligne]**. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project- Report N°. 56. Genève, 2014. 92 pages. Disponible sur : <<http://bit.ly/WMO-Scientific-Assessment>> (Consulté le 13/10/2017)
- [7] SOLOMON Susan, QIN Dahe, MANNING Martin, et al. *Changements climatiques 2007 - Les éléments scientifiques* **[en ligne]**. Contribution du Groupe de travail I - Quatrième rapport d'évaluation du GIEC - Questions fréquentes. Genève, 2007. 43 pages. Disponible sur <<http://bit.ly/GIEC-FAQ-Changements-Climatiques>> (Consulté le 13/10/2017)
- [8] BOUCHER O., HAIGH J., HAUGLUSTAIN D., et al. *Changements climatiques 2001 - Les éléments scientifiques* **[en ligne]**. Contribution du Groupe de Travail - Troisième rapport d'évaluation du GIEC - Le forçage radiatif. Genève, 2001. 68 pages. Disponible sur : <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/pdf/TAR-06.PDF#page=5>>
- [9] MYRHE Gunnar, SHINDELL Drew, BRÉON François-Marie, et al. Anthropogenic and natural radiative forcing **[en ligne]**. In : *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. Genève, 2013. Disponible sur : <<http://bit.ly/GIEC-Anthropogenic-Natural-Radiative-Forcing>> (Consulté le 13/10/2017)
- [10] MATÉ Janos, KANTER David. The benefits of basing policies on the 20-year GWP of HFCs. In : *Site de Greenpeace International* **[en ligne]**. 2011. Disponible sur : <<http://bit.ly/Greenpeace-Benefits-20years-GWP>> (Consulté le 13/10/2017)
- [11] ALLEN Myles. Short-Lived Promise? The Science and Policy of Cumulative and Short-Lived Climate Pollutants. *Oxford Martin Policy Paper* **[en ligne]**. 2015. Disponible sur <http://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/briefings/Short_Lived_Promise.pdf> (Consulté le 13/10/2017)
- [12] TANAKA Katsumasa, O'NEILL Brian, ROKITYANSKIY Dmitry et al. Evaluating global warming potentials with historical temperature. *Climatic Change* **[en ligne]**. 2009. Disponible sur <<http://bit.ly/Evaluating-GWP-with-Historical-Temperature>> (Consulté le 13/10/2017)
- [13] FUGLESTVEDT Jan, SHINE Keith, BERNTSEN Terje, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: Metrics. *Atmospheric Environment* **[en ligne]**. 2010. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.044>> (Consulté le 13/10/2017)

- [14] PETERS Glen, AAMAAS Borgar, BERNTSEN Terje, et al. The integrated global temperature change potential (iGTP) and relationships between emission metrics. *Environmental Research Letters*. **[en ligne]**. 2011. Disponible sur : <<http://bit.ly/IGTM-and-relationships-between-emission-metrics>> (Consulté le 13/10/2017)
- [15] EKHOLM Tommi, LINDROOS Tomi J., SAVOLAINEN Ilkka. Robustness of climate metrics under climate policy ambiguity. *Environmental Science & Policy* **[en ligne]**. 2013. Disponible sur : <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2013.03.006>> (Consulté le 13/10/2017)
- [16] LEDGARD Stewart, REISINGER Andy. Implications of alternative greenhouse gas metrics for life cycle assessments of livestock food products. **In** : *Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector, October 8-10 2014, San Francisco, California, USA*. pp.683-692. **[en ligne]**. Disponible sur : <<http://www.lcafood2014.org/papers/102.pdf>> (Consulté le 13/10/2017)
- [17] WMO, UNEP. *IPCC expert meeting on the science of alternative metrics* **[en ligne]**. Meeting Report. Oslo, 2009. 82 pages. Disponible sur : <<https://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-metrics-oslo.pdf>> (Consulté le 13/10/2017)
- [18] KUIJPERS Lambert. The use of the gwp indicator in refrigerant selection. **In** : *Proceedings of the Ammonia Refrigeration Technology Conference, April 14-16 2011, Ohrid, Macedonia*. **[en ligne]**. Disponible sur : <<http://bit.ly/Fridoc-Kuijpers-2011>> (Consulté le 13/10/2017)
- [19] RIGBY Matt, PRINN R. G., O'DOHERTY S., et al. Recent and future trends in synthetic greenhouse gas radiative forcing. *Geophysical Research Letters* **[en ligne]**. 2014. Disponible sur : <<http://doi.wiley.com/10.1002/2013GL059099>> (Consulté le 13/10/2017)
- [20] MONTZKA Stephen A., MCFARLAND M., ANDERSEN S. O., et al. Recent trends in global emissions of hydrochlorofluorocarbons and hydrofluorocarbons: reflecting on the 2007 adjustments to the Montreal Protocol. *Journal of Physical Chemistry A* **[en ligne]**. 2011. Disponible sur : <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jp5097376>> (Consulté le 13/10/2017)
- [21] VELDERS Guus, FAHEY David, DANIEL John, et al. Future atmospheric abundances and climate forcings from scenarios of global and regional hydrofluorocarbon (HFC) emissions. *Atmospheric Environment* **[en ligne]**. 2014. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.071>> (Consulté le 13/10/2017)
- [22] IEA. CO₂ emissions from fuel combustion. **In** : *Site de l'International Energy Agency* **[en ligne]**. 2016. Disponible sur : <<http://bit.ly/IEA-CO2-Emission-Fuel-2016>> (Consulté le 13/10/2017)
- [23] IEA. Key electricity trends electricity summary. **In** : *Site de l'International Energy Agency* **[en ligne]**. 2016. Disponible sur : <<http://bit.ly/IEA-Electricity-Trends-2016>> (Consulté le 13/10/2017)
- [24] SAUNOIS Marielle, BOUSQUET Philippe, POULTER Ben, et al. The global methane budget 2000-2012. *Earth System Science Data* **[en ligne]**. 2016. Disponible sur : <<http://www.earth-syst-sci-data.net/8/697/2016/>> (Consulté le 13/10/2017)
- [25] MCCABE David, GEERTSMA Meleah, MATTHEWS Nathan, et al. Waste not - Common sense ways to reduce methane pollution from the oil and natural gas industry. **In** : *Site du NRDC* **[en ligne]**. 2015. Disponible sur : <https://www.nrdc.org/sites/default/files/ene_14111901b.pdf> (Consulté le 13/10/2017)
- [26] IEA. *World: balances for 2014 in ktoe on a net calorific value basis* **[en ligne]**. Rapport statistique de l'IEA. Paris, 2014. Disponible sur : <<http://bit.ly/IEA-Rapport-2014>> (Consulté le 13/10/2014)
- [27] OICA. Vehicles in Use. **In** : *Site de l'OICA* **[en ligne]**. 2015. Disponible sur : <http://www.oica.net/wp-content/uploads/Total_in-use-All-Vehicles.pdf> (Consulté le 13/10/2017)
- [28] UNFCCC. National Reports. **In** : *Site de l'UNFCCC* **[en ligne]**. Disponible sur : <http://unfccc.int/national_reports/items/1408.php> (Consulté le 13/10/2017)

[29] LI Zhifang, BIE Pengju, WANG Ziyuan, et al. Estimated HCFC-22 emissions for 1990-2050 in China and the increasing contribution to global emissions. *Atmosphere Environment* [en ligne]. 2016. Disponible sur : <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.02.038>> (Consulté le 13/10/2017)

[30] FANG Xuekun, VELDEERS Guus, RAVISHANKARA A. R., et al. Hydrofluorocarbon (HFC) Emissions in China: An inventory for 2005-2013 and projections to 2050. *Environmental Science & Technology* [en ligne]. 2016. Disponible sur : <<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.5b04376>> (Consulté le 13/10/2017)

[31] AN XingQing, HENNE Stephan, YAO Bo, et al. Estimating emissions of HCFC-22 and CFC-11 in China by atmospheric observations and inverse modeling. *Science China Chemistry* [en ligne]. 2012. Disponible sur : <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11426-012-4624-8>> (Consulté le 13/10/2017)

[32] FORTEMS-CHEINEY Audrey, Saunois M., Pison I., et al. Increase in HFC-134a emissions in response to the success of the Montreal Protocol. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* [en ligne]. 2015. Disponible sur : <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015JD023741/full>> (Consulté le 13/10/2017)

[33] SIMMONDS Paul, DERWENT R. G., MANNING A. J., et al. USA Emissions estimates of CH₃CHF₂, CH₂FCF₃, CH₃CF₃ and CH₂F₂ based on in situ observations at Mace Head. *Atmospheric Environment* [en ligne]. 2015. Disponible sur : <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.010>> (Consulté le 13/10/2017)

[34] MILLET Dylan, ATLAS Elliot, BLAKE Donald, et al. Halocarbon emissions from the United States and Mexico and their Global Warming Potential. *Environmental Science & Technology* [en ligne]. 2009. Disponible sur : <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es802146j>> (Consulté le 13/10/2017)

[35] GRAZIOSI F., ARDUINI J., FURLANI F., et al. European Emissions of the powerful greenhouse gases hydrofluorocarbons inferred from atmospheric measurements and their comparison with annual national reports to UNFCCC. *Atmospheric Environment* [en ligne]. 2017. Disponible sur : <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.029>> (Consulté le 13/10/2017)

[36] GRAZIOSI F., ARDUINI J., FURLANI F., et al. European emissions of HCFC-22 based on eleven years of high frequency atmospheric measurements and a Bayesian inversion method. *Atmospheric Environment* [en ligne]. 2015. Disponible sur : <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.042>> (Consulté le 13/10/2017)

[37] MCGRATH Matt. Climate Change: "Monumental" deal to Cut HFCs, fastest growing greenhouse gases. In : *Site de la BBC* [en ligne]. 2016. Disponible sur : <<http://www.bbc.com/news/science-environment-37665529>> (Consulté le 13/10/2017)

[38] VIDAL John. Kigali deal on HFCs is big step in fighting climate change. In : *Site du Guardian* [en ligne]. 2016. Disponible sur : <<https://www.theguardian.com/environment/2016/oct/15/kigali-deal-hfcs-climate-change>> (Consulté le 13/10/2017)

[39] DONIGER David. Countries adopt Kigali Amendment to phase down HFCs. In : *Site du NRDC* [en ligne]. 2016. Disponible sur : <<https://www.nrdc.org/experts/david-doniger/countries-adopt-kigali-amendment-phase-down-hfcs>> (Consulté le 13/10/2017)

[40] UNFCCC. Accord de Paris. In : *Site de l'UNFCCC* [en ligne]. 2015. Disponible sur : <<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/fre/l09f.pdf>> (Consulté le 13/10/2017)

[41] XU Y., ZAELEKE D., VELDEERS Guus, et al. The role of HFCs in mitigating 21st century climate change. *Atmosphere Chemistry and Physics* [en ligne]. 2013. Disponible sur : <<https://www.atmos-chem-phys.net/13/6083/2013>> (Consulté le 13/10/2017)

[42] VELDEERS Guus, FAHEY D. W., DANIEL J. S., et al. The large contribution of projected HFC emissions to future climate forcing. *Proceedings of the National Academy of Science* [en ligne]. 2009. Disponible sur : <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2700150>> (Consulté le 13/10/2017)

[43] ROGELJ Joeri, SCHAEFFER Michiel, MEINSHAUSEN Malte, et al. Disentangling the effects of CO₂ and short-lived climate forcer mitigation. *Proceedings of the National Academy of Science* **[en ligne]**. 2014. Disponible sur : <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4246330>> (Consulté le 13/10/2017)

[44] DOYLE Alister. Benefits of greenhouse gas pact may fall short of high hopes. **In** : *Site de Reuters* **[en ligne]**. 2016. Disponible sur : <<http://www.reuters.com/article/us-un-climatechange-idUSKBN12G0FN>> (Consulté le 13/10/2017)

[45] GSCHREY Barbara, SCHWARZ Winfried, ELSNER Cornelia. Global projection of F-gas emissions shows high increase until 2050. *Greenhouse Gas Measurement and Management* **[en ligne]**. 2009. Disponible sur : <<http://bit.ly/Gschrey2011>> (Consulté le 13/10/2017)

[46] IIF, KAUFFELD Michael. Frigorigènes alternatifs : les options actuelles sur le long terme et leurs applications. *31^e Note d'Information sur les technologies du froid*. **[en ligne]**. 2016. Disponible sur : <http://www.iifiir.org/userfiles/file/publications/notes/NoteTech_31_FR.pdf> (Consulté le 13/10/2017)

[47] KUIJPERS Lambert. HFC phase-down schedules under the “Kigali” amended Montreal Protocol ; potential impacts to the choice of alternatives. **In** : *Proceedings of the 7th Conference on Ammonia and CO₂ Refrigeration Technology, May 11-13 2017, Ohrid, Macedonia*. **[en ligne]**. Disponible sur : <<http://bit.ly/Fridoc-Kuijpers-2017>>

[48] BOWERMAN Niel, FRAME David, HUTINGFORD Chris, et al. The role of short-lived climate pollutants in meeting temperature goals. *Nature Climate Change* **[en ligne]** 2013. Disponible sur <<http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2034>>(Consulté le 13/10/2017)