

# PRÉSERVATION DE LA COUCHE D'OZONE ET DU SYSTÈME CLIMATIQUE PLANÉTAIRE

Questions relatives aux hydrofluorocarbures  
et aux hydrocarbures perfluorés

Résumé à l'intention des décideurs et Résumé technique



Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat  
Groupe de l'évaluation technique et économique



**Rapport spécial du GIEC et du GETE**

**Préservation de la couche d'ozone et  
du système climatique planétaire:  
Questions relatives aux hydrofluorocarbures  
et aux hydrocarbures perfluorés**

**Résumé à l'intention des décideurs**

Rapport des Groupes de travail I et III du GIEC

*et*

**Résumé technique**

Rapport accepté par les Groupes de travail I et III du GIEC,  
mais non approuvé dans le détail

Le présent rapport a été élaboré par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et le Groupe de l'évaluation technique et économique (GETE) à la demande des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et au Protocole de Montréal

# Avant-propos

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été formé en 1988 conjointement par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Il est chargé d'évaluer les informations disponibles portant sur la science, les incidences et les aspects économiques de l'évolution du climat ainsi que les possibilités d'adaptation aux changements climatiques et les moyens d'atténuer leurs effets. Il donne également, sur demande, des avis scientifiques, techniques et socio-économiques à la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Le GIEC a publié une série de rapports d'évaluation, rapports spéciaux, documents techniques, méthodologies et autres documents qui sont devenus des ouvrages de référence largement utilisés par les décideurs, les scientifiques et d'autres experts.

Le *Rapport spécial sur la préservation de la couche d'ozone et du système climatique planétaire* a été élaboré à la demande des Parties à la CCNUCC<sup>1</sup> et au Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone<sup>2</sup>. Le GIEC et le Groupe de l'évaluation technique et économique (GETE) relevant du Protocole de Montréal ont été priés d'établir ensemble un rapport spécial équilibré, de nature scientifique et technique, propre à faciliter la prise de décision sur ces questions. Ils devaient procéder à une évaluation scientifique des relations entre la couche d'ozone et les changements climatiques et présenter des informations pratiques et neutres qui aident l'ensemble des Parties et des intervenants à choisir en toute connaissance de cause parmi les solutions de remplacement des substances nocives pour l'ozone.

Ces questions sont examinées depuis longtemps déjà. Ainsi, lors de la quatrième session de la Conférence des Parties à la CCNUCC (Buenos Aires, 1998), les Parties et tous les organes compétents ont été invités à communiquer au secrétariat de la Convention des informations sur les moyens disponibles, ou susceptibles de le devenir, pour limiter les émissions d'hydrofluorocarbures (HFC) et d'hydrocarbures perfluorés (PFC) employés en remplacement des substances qui détruisent l'ozone. Le rapport de la réunion d'experts du GIEC et du GETE organisée en 1999 sur le sujet<sup>3</sup>, complété

par des données plus récentes sur la science, les technologies et les besoins en matière de politique, a été très utile pour mener à bien la présente étude.

Les participants à la quatorzième Réunion des Parties au Protocole de Montréal (Rome, Italie, 25-29 novembre 2002) se sont félicités de la décision adoptée par la Conférence des Parties à la CCNUCC<sup>1</sup> et ont prié le GETE d'œuvrer avec le GIEC à l'élaboration du rapport spécial et de soumettre simultanément celui-ci au Groupe de travail à composition non limitée relevant du Protocole de Montréal et à l'Organe subsidiaire de conseil scientifique et technologique (SBSTA) de la CCNUCC. Pour sa part, le GIEC a approuvé l'objet, le plan et les grandes lignes du rapport spécial en séance plénière lors de sa vingtième session (Paris, France, 19-21 février 2003).

Comme toujours au sein du GIEC, la réussite de l'élaboration du présent rapport est due avant tout à l'enthousiasme et à la coopération d'experts du monde entier, dans de nombreuses disciplines différentes mais connexes. Nous souhaitons exprimer notre gratitude à tous les auteurs coordonnateurs principaux, auteurs principaux, auteurs collaborateurs, éditeurs-réviseurs et experts examinateurs, qui ont consacré énormément de travail et de temps à la réalisation de ce rapport et nous leur sommes extrêmement reconnaissants de leur dévouement aux activités du GIEC.

Nous tenons aussi à adresser nos vifs remerciements au Comité directeur, dont les coprésidents sont membres du GETE et du GIEC:

Stephen Andersen, Lambert Kuijpers et José Pons pour le GETE, et

Susan Solomon, Ogunlade Davidson et Bert Metz (président du Comité directeur) pour le GIEC.

Nous sommes convaincus que ce rapport spécial présente une évaluation scientifique et technique nuancée qui aidera tous les intéressés à prendre des décisions quant aux solutions de remplacement des substances qui appauvrissent la couche d'ozone.

## Michel Jarraud

Secrétaire général  
Organisation météorologique mondiale

## Klaus Töpfer

Directeur exécutif  
Programme des Nations Unies pour l'environnement, et  
Directeur général  
Office des Nations Unies à Nairobi

<sup>1</sup> Décision 12/CP.8, FCCC/CP/2002/7/Add.1, page 32. Huitième session de la Conférence des Parties à la CCNUCC, New Delhi, Inde, 23 octobre–1<sup>er</sup> novembre 2002

<sup>2</sup> Décision XIV/10 UNEP/OzL.Pro.14/9, page 56. Quatorzième Réunion des Parties au Protocole de Montréal, Rome, Italie, 25-29 novembre 2002

<sup>3</sup> *Proceedings of the Joint IPCC/TEAP Expert Meeting on options for the limitation of emissions of HFCs and PFCs*, Petten, Pays-Bas, 26-28 mai 1999, voir <http://www.ipcc-wg3.org/docs/IPCC-TEAP99/index.html>

# Préface

Le présent *Rapport spécial sur la préservation de la couche d'ozone et du système climatique planétaire* a été rédigé à la demande des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et au Protocole de Montréal. Il renferme des informations utiles à la prise de décision pour la sauvegarde de la couche d'ozone et la protection du système climatique mondial: deux enjeux environnementaux planétaires ayant diverses implications complexes, tant sur le plan scientifique que sur le plan technique. Le champ d'investigation, la structure et le plan de ce rapport spécial ont été approuvés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) lors de sa vingtième session à Paris (France), du 19 au 21 février 2003. Sa préparation a été placée sous la responsabilité des Groupes de travail I et III du GIEC et du Groupe de l'évaluation technique et économique (GETE) relevant du Protocole de Montréal. Un comité directeur commun aux deux entités a été constitué (voir plus loin) pour veiller au respect des procédures du GIEC dans cette préparation.

## Historique

Les preuves scientifiques reliant les CFC (ou chlorofluorocarbures) et d'autres substances menaçant la couche d'ozone (SAO) à l'appauvrissement effectif de celle-ci au niveau planétaire ont conduit au contrôle initial des produits chimiques dans le cadre du Protocole de Montréal en 1987. Ont suivi des amendements et ajustements dans les années 90 pour étendre la liste des substances nocives, programmer leur retrait progressif et accélérer leur élimination. Ce processus international a conduit à: i) l'arrêt de la production de la plupart des CFC, du trichloréthane-1-1-1 et des halons (ou hydrocarbures halogénés); ii) l'usage accru des hydrochlorofluorocarbures existants (HCFC); iii) la production d'une vaste palette de composants fluorés industriels, dont certains nouveaux types de HCFC, d'hydrofluorocarbures (HFC) et d'hydrocarbures perfluorés (PFC); iv) l'utilisation de substituts non halogénés comme les hydrocarbures, le dioxyde de carbone et l'ammoniac; et v) le développement de méthodes de remplacement, comme les procédures de nettoyage à l'eau.

C'est dans les années 70 qu'a été identifié le risque que les CFC et autres SAO aient également un impact sur le système climatique. Au cours des trois décennies qui ont suivi, l'effet sur le réchauffement de la planète des halocarbures, et notamment des hydrofluorocarbures, a été mis en évidence. Ainsi, les responsables de l'évaluation scientifique de l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, dans leur rapport de 1989, consacraient un chapitre au potentiel de réchauffement global (PRG) lié aux halocarbures et les responsables de l'évaluation technologique de 1989 présentaient ces potentiels dans des discussions sur l'importance des éconergies dans les mousses isolantes, les systèmes de refroidissement et les systèmes de climatisation. Tandis que diverses approches étaient développées pour éliminer les SAO dans le cadre du Protocole de Montréal, il est apparu que certaines mesures prises pour ralentir l'appauvrissement de la couche d'ozone, notamment l'introduction des HFC et des PFC, pouvaient contribuer à augmenter ou réduire l'impact sur le réchauffement planétaire.

Ces informations scientifiques et techniques ont permis aux Parties au Protocole de Montréal de choisir des options de substitution aux SAO, en connaissant leur impact sur le réchauffement planétaire – des choix reflétés dans certains des investissements réalisés par le Fonds multilatéral dudit protocole. Lorsque le Protocole de Kyoto a été négocié en 1997, les États avaient de nouvelles motivations les poussant à tenir compte de la façon dont les choix effectués en matière de substituts pouvaient affecter les objectifs des deux protocoles. Ces considérations ont mis à jour la nécessité de mieux s'informer sur les options de substitution, afin de tenir compte de la préservation impérative de la couche d'ozone d'une part, et du système climatique mondial d'autre part. En mai 1999, le GIEC et le GETE ont réuni des experts afin de travailler sur les possibilités de limiter les émissions de HFC et PFC. Ces travaux ont abouti à la publication d'un rapport en octobre 1999 intitulé *The Implications to the Montreal Protocol of the Inclusion of HFCs and PFCs in the Kyoto Protocol* (Les implications pour le Protocole de Montréal de l'inclusion des HFC et des PFC dans le Protocole de Kyoto). Le présent rapport spécial de 2005 est la plus récente expression de cette collaboration.

L'impact potentiel de chaque substance de remplacement des SAO sur le système climatique dépend non seulement de ses propriétés chimiques et physiques, mais également des facteurs qui en influencent les émissions dans l'atmosphère: confinement, recyclage, destruction et rendement énergétique de certaines applications. Les gaz, les applications et les secteurs étudiés dans ce rapport sont ceux liés aux émissions de CFC, HCFC, HFC et PFC, ainsi qu'aux options alternatives à l'utilisation des HFC et PFC. Il n'est pas question des autres utilisations, industrielles ou non, de ces mêmes produits. Ce rapport traite des composants chimiques et des technologies actuellement exploités ou susceptibles d'être exploités dans la décennie à venir.

## Structure du rapport

Ce rapport fournit le contexte scientifique nécessaire à l'étude des options de substitution aux SAO (chapitres 1 et 2); des méthodologies potentielles d'évaluation de ces options (chapitre 3); et des enjeux techniques associés aux perspectives de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour chacun des secteurs impliqués – réfrigération et climatisation, mousses, aérosols, protection contre l'incendie et solvants (chapitres 4 à 10). Il traite également de la disponibilité future des HFC (chapitre 11).

Les chapitres 1 et 2 abordent les relations entre l'appauvrissement de la couche d'ozone et les changements climatiques, à partir des précédentes évaluations scientifiques internationales, notamment celles conduites sous les auspices de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et du GIEC (comme les rapports suivants: *Scientific Assessment of Ozone Depletion, 2002*; *Assessment of the Environmental Impacts of Ozone Depletion, 2002*; et *Bilan 2001 des changements climatiques: les éléments scientifiques*). Le chapitre 1 couvre la chimie et la dynamique de la stratosphère et leur relation avec les changements climatiques, tandis que le chapitre 2 traite du forçage radiatif des différents gaz concernés ainsi que de leur rôle dans

la chimie de la troposphère et la qualité de l'air. Ce rapport ne prétend pas être aussi exhaustif et précis que les évaluations spécialisées sur les évolutions climatiques et la couche d'ozone. Il s'agit plutôt de proposer une synthèse des interactions entre deux enjeux environnementaux pour faciliter la compréhension et l'application du reste du rapport.

Le chapitre 3 résume les méthodologies disponibles pour caractériser et comparer les technologies (par exemple, l'indice de l'impact sur le climat au cours du cycle de vie, LCCP), en particulier celles qui s'appliquent aux différents secteurs traités dans ce rapport.

Les chapitres 4 à 10 proposent une description technique et des informations sur chacun des secteurs clés utilisant des halocarbures: réfrigération (4), systèmes résidentiels et industriels de climatisation et de chauffage (5), systèmes de climatisation mobiles (6), mousses (7), aérosols médicaux (8), protection contre l'incendie (9) et enfin, aérosols non médicaux, solvants et émissions de HFC-23 à partir de la production de HCFC-22 (10). Chaque chapitre présente le secteur sur lequel il porte et les technologies concernées, la consommation et les émissions des gaz en question, puis les pratiques et les technologies de remplacement qui permettraient de réduire les émissions et l'impact direct sur le réchauffement. Cela inclut notamment des considérations sur l'amélioration des processus dans les applications, l'amélioration du confinement, de la récupération et du recyclage en cours d'exploitation, la récupération en fin de vie, l'élimination et la destruction. Les choix parmi les options possibles dans chaque secteur impliquent des considérations détaillées sur différents facteurs techniques, tels que performances, protection de l'environnement, sécurité, coût, disponibilité des options de remplacement, rendement énergétique et efficacité des ressources.

Le chapitre 11 traite des questions relatives aux ressources et aux besoins en HFC et intègre des estimations des émissions dans les divers secteurs et régions. Il regroupe des informations sur les émissions des différents composants chimiques par les divers secteurs et traite de l'équilibre entre «l'offre et la demande» en HFC.

Comme dans les précédents rapports du GIEC, ce document propose, en plus des chapitres principaux, un résumé à l'intention des décideurs (RID) et un résumé technique (RT). Chaque section de ces deux résumés renvoie à la rubrique correspondante du chapitre concerné dans le rapport. Il est donc facile d'approfondir dans ces chapitres les thèmes traités dans les deux documents de synthèse. En outre, le rapport propose, en annexe, une liste des auteurs et experts examinateurs, un glossaire, une liste des acronymes et abréviations utilisés, une liste des unités et des facteurs de conversion, ainsi qu'une présentation des principales formules chimiques et une nomenclature des substances évoquées au travers de ces pages.

Ce rapport a été élaboré entre août 2003 et avril 2005 par 145 experts de 35 pays différents. La version préliminaire a été soumise pour examen à des experts, dont les suggestions ont permis d'apporter des améliorations. La version révisée a ensuite été communiquée pour un deuxième examen aux gouvernements et aux experts. Au cours de ces deux cycles de révision, quelque 6 600 commentaires ont été formulés par les 175 spécialistes, gouvernements et organisation non gouvernementales impliqués. Cette procédure de révision et

sa supervision par des éditeurs-réviseurs, indépendants de l'équipe de rédaction, font partie intrinsèque de toute évaluation du GIEC et constituent un élément majeur garantissant la qualité et la crédibilité du produit.

La version finale a été présentée à la session conjointe des Groupes de travail I et III du GIEC qui s'est tenue à Addis-Abeba du 6 au 8 avril 2005. Au cours de cette session, le résumé à l'intention des décideurs a été approuvé ligne par ligne et le rapport a été adopté par le GIEC.

### **Remerciements**

Le Comité directeur adresse ses sincères remerciements à tous les auteurs coordonnateurs principaux, auteurs principaux et éditeurs-réviseurs dont la compétence, la diligence et la patience ont permis de mener à bien l'élaboration de ce rapport, auquel ils ont consacré généreusement une part substantielle de leur temps, tant professionnel que personnel; ainsi qu'à tous les intervenants et réviseurs impliqués pour leur dévouement constant et leur précieux apport.

Nous remercions également Marco Gonzalez et Megumi Seki du Secrétariat de l'ozone du PNUE, pour leur parrainage, leur soutien financier et leur engagement dans le processus qui a abouti à ce rapport.

Nous adressons aussi nos remerciements aux Gouvernements des Pays-Bas, des États-Unis d'Amérique, du Japon et de l'Argentine pour avoir accueilli les quatre sessions de rédaction, ainsi qu'au Gouvernement éthiopien et au Centre de conférences des Nations Unies à Addis-Abeba où s'est déroulée la réunion des Groupes de travail I et III.

Nous remercions encore Renate Christ, Secrétaire du GIEC, et le personnel de son secrétariat, qui ont apporté le soutien logistique nécessaire aux liaisons avec les gouvernements et à l'organisation des déplacements des experts des pays en développement et à économie de transition.

Nous remercions enfin tout le personnel des unités d'appui technique des Groupes de travail I et III pour leur participation à la préparation de ce rapport, notamment David de Jager, secrétaire du Comité directeur (membre de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail III), Martin Manning (responsable de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail I) et Leo Meyer (responsable de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail III) pour leur concours administratif et scientifique, ainsi que Tahl Kestin, Scott Longmore, Melinda Tignor (Groupe de travail I), Heleen de Coninck, Anita Meier, Martin Middelburg, Rob Puijk et Thelma van den Brink (Groupe de travail III) pour leur soutien technique et logistique. Ajoutons des remerciements particuliers à Christine Ennis, Dave Thomas et Pete Thomas pour leur participation à l'édition de la version finale de ce rapport.

Comité directeur pour le présent rapport:

Stephen O. Andersen, Coprésident du GETE  
 Ogunlade Davidson, Coprésident du Groupe de travail III du GIEC  
 Lambert Kuijpers, Coprésident du GETE  
 Bert Metz, Coprésident du Groupe de travail III du GIEC (président le Comité directeur)  
 José Pons, Coprésident du GETE  
 Susan Solomon, Coprésidente du Groupe de travail I du GIEC

# Table des matières

## Résumé à l'intention des décideurs

<b>1. Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2. Halocarbures, appauvrissement de la couche d'ozone et changements climatiques</b>	<b>4</b>
2.1 Quels effets les SAO et leurs produits de remplacement ont-ils sur le climat planétaire et sur la couche d'ozone?	4
2.2 En quoi l'élimination progressive des SAO contribue-t-elle à lutter contre l'évolution du climat et l'appauvrissement de la couche d'ozone?	5
2.3 Quelles conséquences le remplacement des SAO a-t-il sur la qualité de l'air et sur d'autres aspects de l'environnement liés à la chimie de l'atmosphère?	6
<b>3. Production, stocks et émissions</b>	<b>8</b>
3.1 Quels liens existe-t-il entre la production, les stocks et les émissions au cours d'une année donnée?	8
3.2 Quels renseignements sur les stocks et les émissions tire-t-on de l'observation des concentrations dans l'atmosphère?	8
3.3 Comment pense-t-on que les stocks et les émissions évolueront entre 2002 et 2015?	8
<b>4. Possibilités d'éliminer les substances qui appauvrissent la couche d'ozone et de réduire les émissions de gaz à effet de serre</b>	<b>11</b>
4.1 Quels moyens existe-t-il de réduire les émissions de gaz à effet de serre et comment évaluer l'efficacité des différentes solutions?	11
4.2 Quelles sont les possibilités de réduire les émissions d'ici 2015, dans les différents secteurs, et quels en seraient les coûts?	12
4.3 Quels sont les instruments, les politiques et les mesures en place?	14
4.4 La capacité de production des HFC et des PFC sera-t-elle suffisante pour les utilisations futures dans les pays en développement ?	14

## Résumé technique

<b>1. Introduction</b>	<b>16</b>
<b>2. Halocarbures, appauvrissement de la couche d'ozone et changements climatiques</b>	<b>18</b>
2.1 Comment les CFC et leurs substituts contribuent-ils au forçage radiatif du système climatique?	18
2.2 Combien de temps les CFC et leurs substituts restent-ils dans l'atmosphère une fois émis?	19
2.3 Comment évoluent les concentrations atmosphériques et les émissions de CFC, halons, HCFC, HFC et PFC?	20
2.4 Dans quelle mesure les halocarbures gazeux et leurs substituts contribuent-ils au forçage radiatif positif du système climatique lié à la période préindustrielle? Et aux années 70?	22
2.5 Quelle a été l'évolution de l'ozone stratosphérique au cours des dernières décennies? Quelles en sont les causes?	22
2.6 De quelle manière l'appauvrissement de la couche d'ozone a-t-il affecté le forçage radiatif du système climatique?	23
2.7 Quels sont les facteurs qui permettraient de contrôler l'ozone dans le siècle à venir? Peut-on «restaurer» les valeurs d'avant le trou? Cette récupération a-t-elle déjà commencé?	24
2.8 Dans quelle mesure les CFC, les HCFC et leurs substituts possibles devraient-ils affecter le futur forçage radiatif du système climatique?	25
2.9 Que représente le potentiel de réchauffement global et à quoi sert-il?	26
2.10 Les HCFC, les HFC ou leurs substituts devraient-ils avoir d'autres effets sur la future chimie de l'environnement?	28
<b>3. Solutions envisageables pour l'élimination des SAO et la réduction des émissions de GES</b>	<b>29</b>
3.1 Où se situent les émissions de GES liées à l'utilisation des SAO et de leurs substituts?	29
3.2 De quelle manière les émissions et les stocks estimés devraient-ils se développer entre 2002 et 2015?	29
3.3 Quelles sont les options de réduction des émissions à effet de serre?	36
3.4 Quels sont les outils d'évaluation qui peuvent fournir des informations sur les choix technologiques?	37
3.5 Quelles sont les différences régionales?	39
3.6 Quelles sont les principales perspectives identifiées en termes de réduction des émissions à effet de serre liées à l'utilisation des SAO, de leurs substituts et des émissions indirectes associées?	39
3.7 Quels sont les instruments politiques existants permettant d'encadrer la réduction des émissions des GES traités dans ce rapport?	46

3.8	Que dire à propos de la future disponibilité des HFC/PFC aux fins de leur utilisation dans les pays en développement?	46
<b>4.</b>	<b>Découvertes majeures dans les secteurs exploitant des SAO et leurs substituts</b>	<b>48</b>
4.1	Quelles sont les découvertes majeures dans le secteur de la réfrigération?	48
4.2	Quelles sont les découvertes majeures dans le secteur du chauffage et de la climatisation résidentiels et commerciaux?	55
4.3	Quelles sont les découvertes majeures dans le secteur de la climatisation mobile?	57
4.4	Quelles sont les découvertes majeures dans le secteur des mousses?	60
4.5	Quelles sont les découvertes majeures dans le secteur des aérosols médicaux?	66
4.6	Quelles sont les découvertes majeures dans la protection contre l'incendie?	68
4.7	Quelles sont les découvertes majeures dans le secteur des aérosols non médicaux, des solvants et des émissions de HFC-23?	72
<b>Annexe I</b>	<b>Glossaire</b>	<b>79</b>
<b>Annexe II</b>	<b>Formules chimiques et nomenclature</b>	<b>83</b>

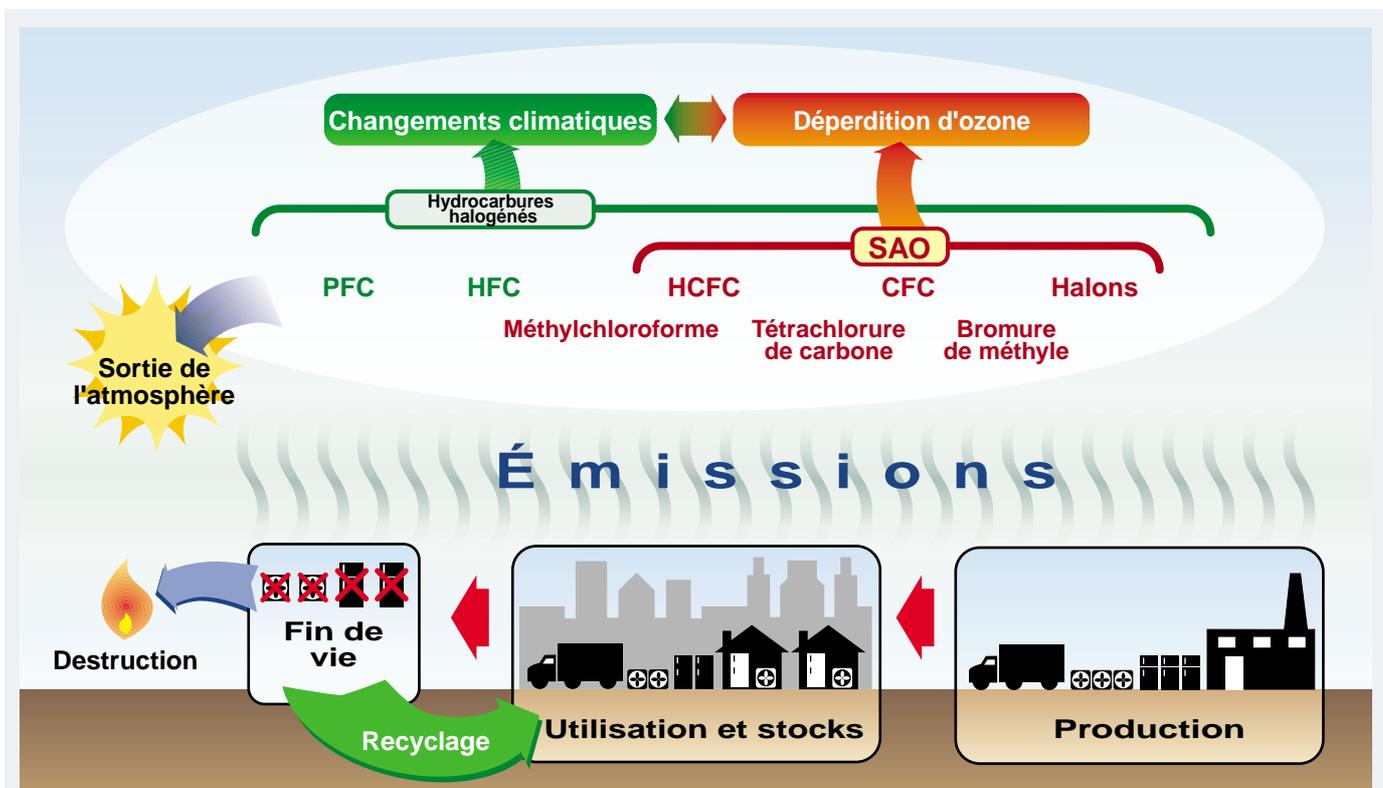
Rapport spécial du GIEC et du GETE  
**Préservation de la couche d'ozone et du système climatique planétaire:  
Questions relatives aux hydrofluorocarbures et  
aux hydrocarbures perfluorés**

## **Résumé à l'intention des décideurs**

# 1. Introduction

Les Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)<sup>1</sup> et au Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone<sup>2</sup> ont demandé que soit établi un rapport spécial équilibré, propre à faciliter la prise de décision, qui renferme des informations scientifiques et techniques concernant l'impact sur le système climatique mondial des produits de remplacement des substances nocives pour l'ozone. Le rapport a été préparé par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et par le Groupe de l'évaluation technique et économique (GETE) relevant du Protocole de Montréal.

Le Protocole de Montréal régleme la production et la consommation des substances qui appauvrissent la couche d'ozone (SAO) dans la stratosphère<sup>3</sup>. En conséquence, les pays développés et les pays en développement qui sont Parties au Protocole ont entrepris leur élimination progressive. Ces substances et un certain nombre de leurs substituts sont des gaz à effet de serre qui contribuent à l'évolution du climat (voir la figure RID-1). Certains produits de remplacement des SAO, en particulier les hydrofluorocarbures (HFC) et les hydrocarbures perfluorés (PFC), sont régis par les dispositions de la CCNUCC et de son Protocole de Kyoto. Les solutions retenues pour préserver la couche d'ozone pourraient



**Figure RID-1.** Illustration des principales questions étudiées dans le rapport. Les chlorofluorocarbures (CFC), les halons et les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) concourent à la déperdition d'ozone et aux changements climatiques. Les hydrofluorocarbures (HFC) et les hydrocarbures perfluorés (PFC) contribuent uniquement aux changements climatiques. Ces derniers peuvent donc remplacer les SAO, car ils sont sans danger pour la couche d'ozone. Les gaz réglementés par le Protocole de Montréal, ses amendements et ajustements<sup>4</sup> figurent en rouge, les gaz régis par la CCNUCC et le Protocole de Kyoto sont en vert. Parmi les moyens envisagés pour réduire les émissions d'hydrocarbures halogénés figurent le renforcement du confinement, la récupération, le recyclage, la destruction des sous-produits et des stocks<sup>5</sup> actuels, le recours à des techniques de remplacement et le choix de substances qui présentent un potentiel de réchauffement global moindre ou négligeable.

<sup>1</sup> Décision 12/CP.8, FCCC/CP/2002/7/Add.1, page 32.

<sup>2</sup> Décision XIV/10 UNEP/OzL.Pro.14/9, page 56.

<sup>3</sup> Sauf indication contraire, l'ozone dont il est question dans le rapport est l'ozone stratosphérique.

<sup>4</sup> Dénommé ci-après Protocole de Montréal.

<sup>5</sup> Quantité totale de substances qui sont présentes dans des appareils, dépôts, mousses et autres produits mais qui n'ont pas encore été libérées dans l'atmosphère.

influer sur les changements climatiques, lesquels sont susceptibles, à leur tour, d'avoir un impact indirect sur la couche d'ozone.

Le rapport traite de l'incidence des émissions totales de SAO et de leurs substituts sur le système climatique et sur la couche d'ozone, afin notamment de saisir les répercussions que pourraient avoir les solutions de remplacement sur le réchauffement planétaire. L'impact de ces dernières sur la couche d'ozone n'est pas analysé en détail.

Les possibilités de réduire les émissions d'hydrocarbures halogénés, en recourant à des substances ou à des techniques susceptibles de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, sont étudiées par secteur. Les HFC et les PFC sont uniquement examinés en tant que produits de remplacement des substances nocives pour l'ozone. Il n'y est pas question des émissions de HFC ou de PFC dues à la production d'aluminium, à la fabrication de semi-conducteurs ou à d'autres activités.

Les substances qui appauvrissent la couche d'ozone et les HFC ou PFC qui les remplacent sont surtout utilisés dans la réfrigération, la climatisation, les mousses, les aérosols, la protection contre les incendies et les solvants. La libération dans l'atmosphère peut survenir de bien des manières: étapes de fabrication, rejet non intentionnel de sous-produits, opérations comportant une émission intentionnelle, évaporation ou fuite des substances présentes dans les appareils et produits, travaux d'entretien, essais, mise au rebut.

L'étude des différentes solutions envisagées s'étend généralement jusqu'en 2015. En effet, on détient pour la prochaine décennie des données fiables sur les techniques et produits de remplacement qui présentent d'excellentes possibilités de commercialisation dans ces secteurs en évolution rapide. Le rapport analyse également les résultats techniques, les méthodes d'évaluation possibles, les émissions indirectes<sup>6</sup> associées à la consommation d'énergie, les coûts et les questions relatives à la santé et à la sécurité, aux conséquences sur la qualité de l'air et à l'approvisionnement futur.

---

<sup>6</sup> Dans les inventaires nationaux, on entend par «émissions indirectes» les rejets de gaz à effet de serre qui se produisent lors de la décomposition d'une autre substance dans l'environnement. Il n'en va pas de même dans le rapport, où l'expression désigne les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la consommation d'énergie dont tiennent compte les analyses du cycle de vie (ACV), par exemple le calcul de l'impact total équivalent sur le réchauffement planétaire (TEWI) ou l'évaluation de l'impact sur le climat au cours du cycle de vie (LCCP).

---

## 2. Halocarbures, appauvrissement de la couche d'ozone et changements climatiques

### 2.1 Quels effets les SAO et leurs produits de remplacement ont-ils sur le climat planétaire et sur la couche d'ozone?

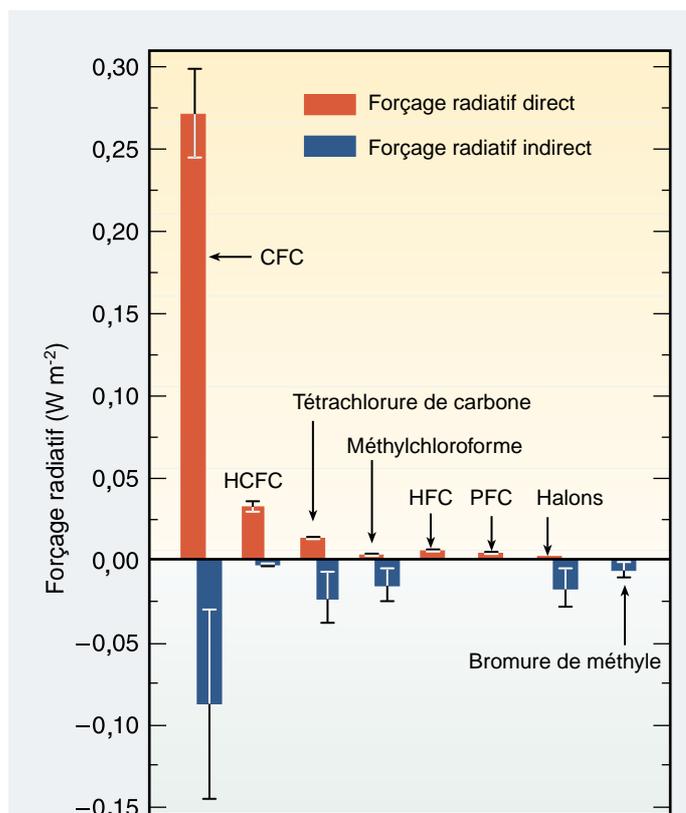
Les halocarbures, en particulier les SAO, ont contribué au forçage radiatif<sup>7</sup> positif direct et à l'élévation concomitante des températures moyennes à la surface du globe (voir la figure RID-2). On estime à  $0,33 \pm 0,03 \text{ W m}^{-2}$  le forçage positif direct total provoqué entre 1750 et 2000 par l'augmentation des quantités de SAO et d'halocarbures sans danger pour l'ozone qui ont été produits de manière industrielle. Cela représente 13 % environ du total imputable à la hausse des concentrations de mélanges homogènes de tous les gaz à effet de serre pendant la même période. L'augmentation de la plupart des halocarbures est survenue ces dernières décennies. Les concentrations atmosphériques de CFC étaient stables ou en baisse en 2001-2003 (0 à -3 % par an, selon le gaz considéré), tandis que les halons ainsi que les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) et les CFC utilisés comme produits de remplacement ont respectivement augmenté de 1 à 3 %, de 3 à 7 % et de 13 à 17 % par an. [1.1, 1.2, 1.5 et 2.3]<sup>8</sup>

La principale cause de l'appauvrissement de la couche d'ozone observée depuis 1970 est la hausse des concentrations de composés chlorés et bromés réactifs qui sont issus de la dégradation des SAO d'origine anthropique, notamment les halons, les CFC, les HCFC, le méthylchloroforme ( $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ ), le tétrachlorure de carbone ( $\text{CCl}_4$ ) et le bromure de méthyle ( $\text{CH}_3\text{Br}$ ). [1.3 et 1.4]

L'appauvrissement de la couche d'ozone provoque un forçage radiatif négatif du climat, c'est-à-dire un effet indirect de refroidissement (voir la figure RID-2). On pense que la modification des concentrations d'ozone est actuellement responsable, en moyenne à l'échelle du globe, d'un forçage radiatif d'environ  $-0,15 \pm 0,10 \text{ W m}^{-2}$ . La grande incertitude entourant le forçage radiatif indirect associé aux SAO est surtout due au manque de données précises sur la répartition verticale de la déperdition d'ozone. Il est *très probable*<sup>10</sup> que ce forçage négatif indirect est moindre que le forçage positif direct dû à ces seules substances ( $0,32 \pm 0,03 \text{ W m}^{-2}$ ). [1.1, 1.2 et 1.5]

Le réchauffement provoqué par les SAO et le refroidissement associé à la perte d'ozone sont deux mécanismes distincts qui ne se compensent pas simplement l'un l'autre. La répartition spatiale et saisonnière de l'effet de

refroidissement n'est pas celle de l'effet de réchauffement. Selon les résultats d'un nombre limité d'études de modélisation du climat mondial et d'analyses statistiques, l'appauvrissement de la couche d'ozone pourrait modifier les configurations de la variabilité du climat qui influent sur la circulation troposphérique et sur les températures dans les deux hémisphères. Toutefois, les changements observés dans ces configurations ne peuvent être attribués hors de tout doute à la déperdition d'ozone. [1.3 et 1.5]



**Figure RID-2.** Forçage radiatif direct et indirect dû à la modification des concentrations d'halocarbures entre 1750 et 2000<sup>9</sup>. Les barres d'erreur indiquent l'incertitude à  $\pm 2$  écarts types. [Adapté du tableau 1.1]

<sup>7</sup> Le forçage radiatif est une mesure de l'influence qu'exerce un facteur par modification de l'énergie d'entrée ou de sortie dans le système Terre-atmosphère, et un indice de l'importance de ce facteur en tant que mécanisme potentiel de changement climatique. Il est exprimé en watts par mètre carré ( $\text{W m}^{-2}$ ). Un gaz à effet de serre produit un forçage radiatif direct par absorption et émission de rayonnement; il peut produire un forçage radiatif indirect par le biais d'interactions chimiques avec d'autres particules ou gaz à effet de serre.

<sup>8</sup> Les chiffres placés entre crochets renvoient aux sections du rapport principal dans lesquelles on pourra trouver le texte sur lequel repose le paragraphe en question, avec les références correspondantes.

<sup>9</sup> Les PFC utilisés à la place des SAO ne sont responsables que d'un faible pourcentage du forçage radiatif imputable à l'ensemble des PFC.

<sup>10</sup> Dans le présent résumé, les termes ci-après sont utilisés pour donner une idée de la confiance que l'on peut accorder aux estimations présentées: *très probable* (probabilité entre 90 et 99 %); *probable* (entre 66 et 90 %); *improbable* (entre 10 et 33 %); *très improbable* (entre 1 et 10 %).

Chaque type de gaz a des effets particuliers sur le réchauffement du climat mondial et sur l'appauvrissement de la couche d'ozone (voir la figure RID-2), selon notamment le moment où il est émis, la nocivité qu'il présente en tant que gaz à effet de serre, sa durée de vie et la quantité de chlore ou de brome que renferme chaque molécule. À l'heure actuelle, les gaz qui contiennent du brome contribuent beaucoup plus au refroidissement qu'au réchauffement du climat, ce qui est le contraire des CFC et des HCFC. Pour leur part, les HFC et les PFC concourent uniquement au réchauffement planétaire. [1.5 et 2.5]

## 2.2 En quoi l'élimination progressive des SAO contribue-t-elle à lutter contre l'évolution du climat et l'appauvrissement de la couche d'ozone?

L'action engagée au titre du Protocole de Montréal a conduit à remplacer les CFC par des HCFC, des HFC et d'autres produits ou à mettre en œuvre des procédés différents. Étant donné, d'une part, que la plupart des substances de remplacement présentent un potentiel de réchauffement global<sup>11</sup> (PRG) plus faible et, d'autre part, que les rejets d'hydrocarbures halogénés ont accusé un recul, le total des émissions (directes, pondérées par le PRG) d'équivalent CO<sub>2</sub> qui leur sont associées a diminué. Selon les données déduites de l'observation de l'atmosphère, les émissions combinées de CFC, HCFC et HFC en équivalent CO<sub>2</sub> sont passées de 7,5 ± 0,4 Gt éqCO<sub>2</sub> par an, aux alentours de 1990, à 2,5 ± 0,2 Gt éqCO<sub>2</sub> par an, aux environs de 2000. Cela équivaut respectivement à 33 % et 10 % à peu près des émissions annuelles de CO<sub>2</sub> produites par la combustion de matières fossiles dans le monde. Les concentrations de chlore dans la stratosphère sont pratiquement stabilisées, elles ont peut-être même commencé à décroître. [1.2, 2.3 et 2.5]

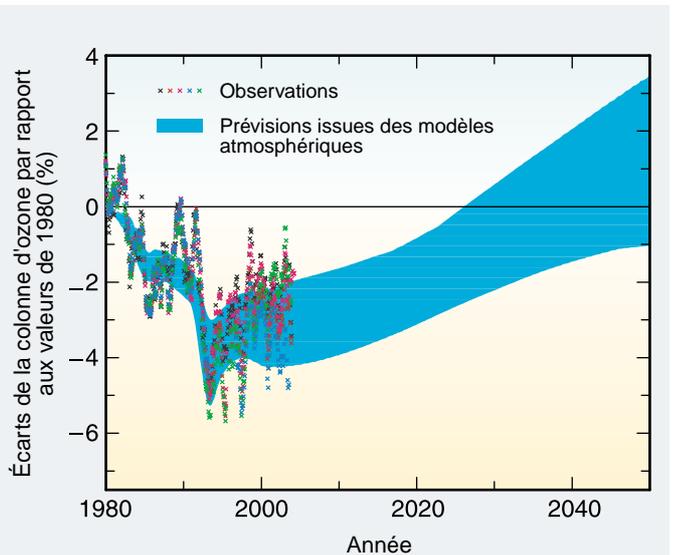
L'ammoniac et les hydrocarbures (HC) utilisés à la place des halocarbures ont une durée de vie de quelques jours à quelques mois dans l'atmosphère et il est très probable que le forçage radiatif direct et indirect lié à cet emploi a un impact négligeable sur le climat de la planète. Il pourrait être utile, à cet égard, d'examiner l'évolution des émissions dues à la consommation d'énergie. (Voir, dans la partie 4, l'évaluation poussée des solutions de remplacement des SAO.) [2.5]

Selon le scénario de la poursuite des activités élaboré dans le rapport, le forçage radiatif direct provoqué par les HFC atteindrait 0,030 W m<sup>-2</sup> en 2015; selon le Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émission (RSSE), le forçage radiatif imputable aux PFC<sup>9</sup> s'établirait à 0,006 W m<sup>-2</sup>. Le forçage radiatif dû aux HFC et aux PFC correspond, respectivement, à 1,0 % et 0,2 % environ du forçage radiatif estimé pour les mélanges homogènes de l'ensemble des gaz à effet de serre en 2015, l'apport des SAO étant d'à peu près 10 %. On s'intéresse en premier lieu dans le rapport aux scénarios qui portent jusqu'en 2015, mais on a tout de même examiné, sans les réévaluer, les scénarios du RSSE qui vont au-delà de cette date. Ils prévoient une hausse importante du forçage radiatif dû aux HFC au cours des décennies subséquentes, mais ces estimations

sont sans doute hautement hypothétiques étant donné que les incertitudes entourant les politiques et les procédés technologiques augmentent avec le temps. [1.5, 2.5 et 11.5]

Les observations et les résultats des modèles indiquent que la déperdition moyenne d'ozone à l'échelle du globe s'est à peu près stabilisée (voir par exemple la figure RID-3). Même si des écarts considérables sont attendus d'une année à l'autre, y compris dans les régions polaires où la perte est la plus accentuée, la couche d'ozone devrait commencer à se reconstituer dans les prochaines décennies en raison de la baisse des concentrations de SAO, sous réserve du respect intégral des dispositions du Protocole de Montréal. [1.2 et 1.4]

L'élévation des concentrations d'autres gaz à effet de serre pourrait avoir à long terme un impact de plus en plus marqué sur la couche d'ozone, en refroidissant la stratosphère et en modifiant la circulation stratosphérique. Il est probable que, par suite de l'effet de refroidissement et de la baisse des concentrations de SAO, la quantité d'ozone augmente dans une bonne partie de la stratosphère, mais diminue dans certaines régions, par exemple au-dessus de l'Arctique. Toutefois, les modifications de la circulation atmosphérique liées aux changements climatiques pourraient avoir des conséquences plus importantes que ces facteurs. L'impact net, sur l'ozone total, de la hausse des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère reste incertain, tant dans son ampleur que dans son sens. Selon les modèles actuels, il est très improbable qu'un trou d'ozone semblable à celui que l'on observe sur l'Antarctique se forme au-dessus de l'Arctique. [1.4]



**Figure RID-3.** Variation, par rapport aux valeurs de 1980, de la colonne d'ozone aux latitudes basses et moyennes (60 °S–60 °N), selon les observations et selon les modèles. [Encadré 1.7]

<sup>11</sup> Le potentiel de réchauffement global compare l'impact sur le climat, intégré dans le temps, de l'émission pulsée d'un gaz à effet de serre à celui de l'émission de la même quantité de CO<sub>2</sub>, à un horizon temporel fixe.

**L'effet de réchauffement et de refroidissement lié aux émissions de CFC, HCFC, HFC, PFC et halons dépend de la durée de vie du gaz considéré, de ses propriétés chimiques et du moment de l'émission (voir le tableau RID-1).** La durée de vie dans l'atmosphère va de un an à deux décennies pour la majorité des HFC et des HCFC, de décennies à des siècles pour certains HFC et pour la plupart des halons et des CFC, et de mille à cinquante mille ans pour les PFC. Le potentiel direct de réchauffement global des halocarbures se situe entre 5 et plus de 10 000. Le refroidissement indirect provoqué par les SAO devrait cesser lors de la reconstitution de la couche d'ozone, si bien que le PRG associé à ce phénomène dépend de l'année d'émission, du respect des dispositions du Protocole de Montréal et de la durée de vie des gaz. Le potentiel de réchauffement indirect est entaché d'incertitudes beaucoup plus grandes que le potentiel de réchauffement direct. [1.5, 2.2 et 2.5]

### 2.3 Quelles conséquences le remplacement des SAO a-t-il sur la qualité de l'air et sur d'autres aspects de l'environnement liés à la chimie de l'atmosphère?

**Le remplacement des substances nocives pour l'ozone par des HFC, des PFC et d'autres gaz, tels les hydrocarbures, dans le domaine de la climatisation, de la réfrigération et des mousses ne devrait pas avoir d'effet important sur la chimie de la troposphère à l'échelle du globe. Un impact léger mais non négligeable sur la qualité de l'air pourrait être observé à proximité des sources d'émission.** Cet impact pourrait susciter quelques inquiétudes, par exemple si les normes locales ne sont pas respectées. [2.4 et 2.6]

**Les produits persistants issus de la décomposition des HFC et des HCFC (par exemple l'acide trifluoracétique) sont éliminés de l'atmosphère par dépôt et lessivage. Toutefois, les études réalisées jusqu'à présent dans le but d'évaluer et de surveiller les risques pour l'environnement indiquent que ces produits ne devraient pas atteindre des concentrations susceptibles de nuire gravement aux écosystèmes.** Les mesures de l'acide trifluoracétique présent dans l'eau de mer révèlent que les sources anthropiques sont plus faibles que les sources naturelles, quoique ces dernières ne soient pas toutes connues. [2.4]

**Tableau RID-1.** Potentiel de réchauffement global (PRG) des halocarbures régis par le Protocole de Montréal et par la CCNUCC et son Protocole de Kyoto (évalués dans le rapport en relation avec le CO<sub>2</sub> à un horizon de 100 ans), avec leur durée de vie et le potentiel de réchauffement de la planète (PRP) utilisé par la CCNUCC. Les gaz sur fond bleu (foncé) relèvent du Protocole de Montréal, les gaz sur fond jaune (clair) de la CCNUCC. [Tableaux 2.6 et 2.7]

Gaz	PRG, forçage radiatif direct <sup>a</sup>	PRG, forçage radiatif indirect (émissions en 2005 <sup>b</sup> )	Durée de vie (années)	PRP CCNUCC <sup>c</sup>
<b>CFC</b>				
CFC-12	10 720 ± 3 750	-1 920 ± 1 630	100	n.d. <sup>d</sup>
CFC-114	9 880 ± 3 460	Non disponible	300	n.d. <sup>d</sup>
CFC-115	7 250 ± 2 540	Non disponible	1 700	n.d. <sup>d</sup>
CFC-113	6 030 ± 2 110	-2 250 ± 1 890	85	n.d. <sup>d</sup>
CFC-11	4 680 ± 1 640	-3 420 ± 2 710	45	n.d. <sup>d</sup>
<b>HCFC</b>				
HCFC-142b	2 270 ± 800	-337 ± 237	17,9	n.d. <sup>d</sup>
HCFC-22	1 780 ± 620	-269 ± 183	12	n.d. <sup>d</sup>
HCFC-141b	713 ± 250	-631 ± 424	9,3	n.d. <sup>d</sup>
HCFC-124	599 ± 210	-114 ± 76	5,8	n.d. <sup>d</sup>
HCFC-225cb	586 ± 205	-148 ± 98	5,8	n.d. <sup>d</sup>
HCFC-225ca	120 ± 42	-91 ± 60	1,9	n.d. <sup>d</sup>
HCFC-123	76 ± 27	-82 ± 55	1,3	n.d. <sup>d</sup>
<b>HFC</b>				
HFC-23	14 310 ± 5 000	~0	270	11 700
HFC-143a	4 400 ± 1 540	~0	52	3 800
HFC-125	3 450 ± 1 210	~0	29	2 800
HFC-227ea	3 140 ± 1 100	~0	34,2	2 900
HFC-43-10mee	1 610 ± 560	~0	15,9	1 300
HFC-134a	1 410 ± 490	~0	14	1 300
HFC-245fa	1 020 ± 360	~0	7,6	- <sup>e</sup>
HFC-365mfc	782 ± 270	~0	8,6	- <sup>e</sup>
HFC-32	670 ± 240	~0	4,9	650
HFC-152a	122 ± 43	~0	1,4	140
<b>PFC</b>				
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	12 010 ± 4 200	~0	10 000	9 200
C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>	9 140 ± 3 200	~0	3 200	7 400
CF <sub>4</sub>	5 820 ± 2 040	~0	50 000	6 500
<b>Halons</b>				
Halon-1301	7 030 ± 2 460	-32 900 ± 27 100	65	n.d. <sup>d</sup>
Halon-1211	1 860 ± 650	-28 200 ± 19 600	16	n.d. <sup>d</sup>
Halon-2402	1 620 ± 570	-43 100 ± 30 800	20	n.d. <sup>d</sup>
<b>Autres halocarbures</b>				
Tétrachlorure de carbone (CCl <sub>4</sub> )	1 380 ± 480	-3 330 ± 2 460	26	n.d. <sup>d</sup>
Méthylchloroforme (CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> )	144 ± 50	-610 ± 407	5,0	n.d. <sup>d</sup>
Bromure de méthyle (CH <sub>3</sub> Br)	5 ± 2	-1 610 ± 1 070	0,7	n.d. <sup>d</sup>

## Notes:

<sup>a</sup> Les incertitudes entourant le PRG, pour le forçage positif direct, sont estimées à ± 35 % (2 écarts types) (GIEC, 2001).

<sup>b</sup> Les incertitudes entourant le PRG, pour le forçage négatif indirect, tiennent compte de l'incertitude estimée quant à la durée de reconstitution de la couche d'ozone et de l'incertitude visant le forçage négatif dû à l'appauvrissement de la couche d'ozone.

<sup>c</sup> Les directives générales de notification de la CCNUCC prescrivent d'utiliser les valeurs du potentiel de réchauffement planétaire présentées dans le deuxième Rapport d'évaluation du GIEC (voir FCCC/SBSTA/2004/8, <http://unfccc.int/resource/docs/french/sbsta/0408f.pdf>).

<sup>d</sup> Les SAO ne sont pas régies par la CCNUCC.

<sup>e</sup> Le deuxième Rapport d'évaluation du GIEC ne donne pas d'indice de PRG pour le HFC-245fa et le HFC-365mfc. Cependant, les directives de la CCNUCC renferment des dispositions quant à la notification de tous les gaz à effet de serre pour lesquels de tels indices ont été évalués par le GIEC.

## 3. Production, stocks et émissions

### 3.1 Quels liens existe-t-il entre la production, les stocks et les émissions au cours d'une année donnée?

**Les émissions actuelles de SAO et de leurs produits de remplacement sont en grande partie le fruit des modes d'utilisation passés. Dans le cas des CFC et des HCFC, ce sont surtout les stocks accumulés qui sont à l'origine des rejets actuels et à venir. Ni le Protocole de Montréal, ni la CCNUCC et son Protocole de Kyoto, n'obligent à restreindre ce type de rejets, mais certains pays ont adopté des politiques efficaces en la matière.**

On entend par stocks la quantité totale de substances qui sont présentes dans des appareils, dépôts, mousses et autres produits mais qui n'ont pas encore été libérées dans l'atmosphère (voir la figure RID-1). En l'absence de mesures additionnelles de gestion des stocks, l'accumulation de substances découlant des applications (relativement) récentes des HFC déterminera dans une large mesure le volume des émissions après 2015.

### 3.2 Quels renseignements sur les stocks et les émissions tire-t-on de l'observation des concentrations dans l'atmosphère?

**Les relevés atmosphériques, conjugués aux données sur la production et sur les formes d'utilisation, donnent une idée de l'ampleur des stocks mais ne permettent pas d'établir leur taille exacte.**

Les estimations les plus précises concernant les émissions de CFC-11 et CFC-12 sont déduites de l'observation des concentrations dans l'atmosphère. Ces valeurs sont plus élevées que les quantités estimées en se fondant sur la production actuelle, ce qui donne à penser qu'une bonne partie des rejets provient des stocks constitués dans le passé. Au contraire, les concentrations atmosphériques de HFC-134a sont inférieures aux valeurs que devrait entraîner la production, ce qui implique une augmentation des stocks. La quantité totale de HFC-134a présente dans l'atmosphère du globe serait à peu près équivalente à la quantité renfermée dans les stocks. [2.5 et 11.3.4]

S'agissant du CFC-11 et de quelques autres gaz, les informations dont on dispose sur les modes d'utilisation sont insuffisantes

pour dire quelle part des émissions observées est imputable à la production et à l'utilisation actuelles. De plus amples recherches sont nécessaires pour mieux connaître les sources de rejet.

### 3.3 Comment pense-t-on que les stocks et les émissions évolueront entre 2002 et 2015?

**Les stocks de CFC, HCFC, HFC et PFC s'élevaient à environ 21 Gt  $\text{éqCO}_2$  en 2002<sup>12,13</sup>. Selon le scénario de la poursuite des activités, ils devraient baisser au cours de la période visée et s'établir à 18 Gt  $\text{éqCO}_2$  en 2015<sup>14</sup>. [7, 11.3 et 11.5]**

En 2002, les stocks de CFC, HCFC et HFC étaient respectivement de 16 Gt  $\text{éqCO}_2$ , 4 Gt  $\text{éqCO}_2$  et 1 Gt  $\text{éqCO}_2$  (valeurs pondérées par le PRG, forçage radiatif direct) (voir la figure RID-4). Le scénario de la poursuite des activités donne, pour 2015, des valeurs correspondantes de 8 Gt  $\text{éqCO}_2$ , 5 Gt  $\text{éqCO}_2$  et 5 Gt  $\text{éqCO}_2$ . Les stocks de PFC utilisés en remplacement des SAO s'élevaient à 0,005 Gt  $\text{éqCO}_2$  environ en 2002.

La quantité de CFC stockés dans les appareils de réfrigération, de climatisation fixe<sup>15</sup> et de climatisation mobile devrait passer de 6 à 1 Gt  $\text{éqCO}_2$  entre 2002 et 2015, en raison principalement de la libération des substances dans l'atmosphère, mais aussi de leur destruction ou de leur récupération en fin de vie. On estime que les quantités présentes dans les mousses diminueront beaucoup moins vite (10 Gt  $\text{éqCO}_2$  en 2002, 7 Gt  $\text{éqCO}_2$  en 2015), car les agents gonflants sont libérés à un rythme nettement plus lent, à quantité égale, que les frigorigènes utilisés en réfrigération et en climatisation.

Les stocks de HFC, qui ont commencé à se former, devraient se situer aux environs de 5 Gt  $\text{éqCO}_2$  en 2015. Les mousses ne renferment que 0,6 Gt  $\text{éqCO}_2$  de HFC, mais ce chiffre devrait continuer d'augmenter après 2015.

**Dans le scénario de la poursuite des activités, les émissions directes totales de CFC, HCFC, HFC et PFC sont estimées à 2,3 Gt  $\text{éqCO}_2$  par an en 2015, contre 2,5 Gt  $\text{éqCO}_2$  à peu près en 2002. Les émissions combinées de CFC et de HCFC passent de 2,1 à 1,2 Gt  $\text{éqCO}_2$  par an pendant la période visée, tandis que les rejets de HFC sont en hausse (0,4 Gt  $\text{éqCO}_2$  par an en 2002, 1,2 Gt  $\text{éqCO}_2$  en 2015)<sup>16</sup>. Pour leur part, les PFC issus des produits de remplacement des SAO, qui sont estimés à 0,001 Gt  $\text{éqCO}_2$  par an en 2002, devraient diminuer. [11.3 et 11.5]**

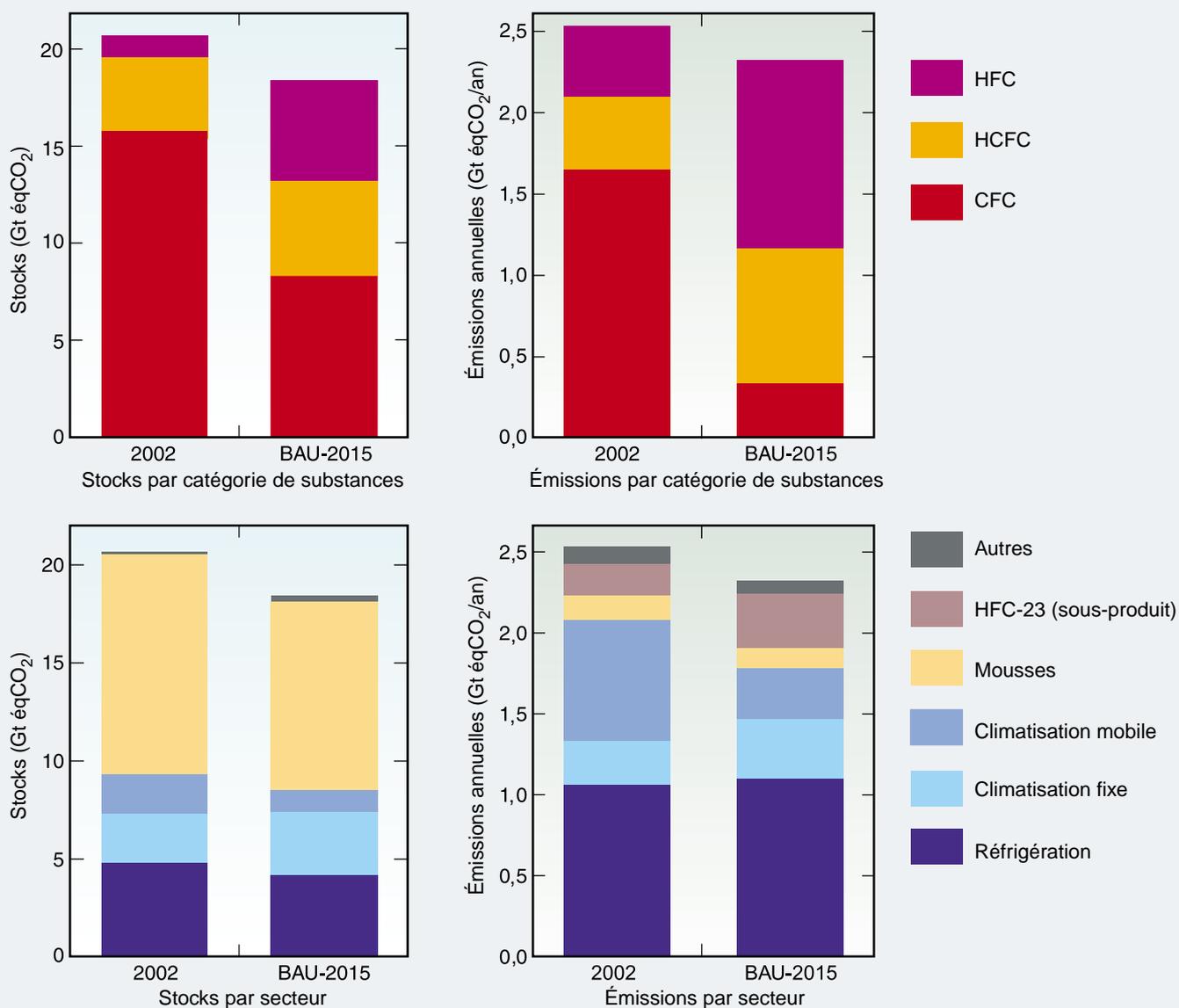
<sup>12</sup> Quand les émissions et les stocks de gaz à effet de serre sont exprimés en équivalent  $\text{CO}_2$ , on tient compte du PRG lié au forçage radiatif direct sur 100 ans. Sauf indication contraire, les valeurs les plus récentes du PRG sont employées et analysées dans le rapport, telles qu'elles figurent dans le tableau RID-1 (colonne «PRG, forçage radiatif direct»).

<sup>13</sup> Dans le cas des halons, le forçage négatif indirect est beaucoup plus grand que le forçage positif direct. Par souci de clarté, les effets de cette catégorie de substances ne sont pas indiqués ici.

<sup>14</sup> On suppose, dans ce scénario, que toutes les mesures en cours se poursuivent, y compris celles prises dans le cadre du Protocole de Montréal (élimination progressive) et des politiques nationales. Les tendances actuelles concernant les pratiques, l'adoption de produits ou de procédés de remplacement et les taux d'émission restent les mêmes jusqu'en 2015. L'efficacité des mesures de récupération en fin de vie n'augmente pas.

<sup>15</sup> Dans le présent résumé, le secteur de la réfrigération englobe les installations à usage domestique, commercial et industriel (y compris pour la transformation des aliments et l'entreposage frigorifique) ainsi que le transport frigorifique. [4] La climatisation fixe comprend les appareils de climatisation et de chauffage domestiques et commerciaux. [5] La climatisation mobile regroupe les systèmes placés dans les automobiles, les autocars et les cabines de camions.

<sup>16</sup> Les valeurs scientifiques les plus récentes du PRG sont employées pour établir ces chiffres (tableau RID-1, colonne «PRG, forçage radiatif direct»). Si l'on utilisait le PRP adopté par la CCNUCC (tableau RID-1, colonne «PRP, CCNUCC»), les émissions de HFC (en tonnes d'équivalent  $\text{CO}_2$ ) seraient inférieures d'environ 15 %.



**Figure RID-4.** Données d'archives pour 2002 et projections pour 2015 (scénario de la poursuite des activités – BAU) des stocks (à gauche) et des émissions annuelles directes (à droite) de gaz à effet de serre, en équivalent  $\text{CO}_2$ , liés à l'utilisation des CFC, HCFC et HFC. Ventilation par catégorie de substances (en haut) et par secteur (en bas). «Autres» comprend les inhalateurs utilisés en médecine, la protection contre les incendies, les aérosols non médicaux et les solvants. [11.3 et 11.5]

La figure RID-4 montre la contribution des différents secteurs aux émissions directes de gaz à effet de serre qui sont dues à l'emploi des substances appauvrissant la couche d'ozone et de leurs produits de remplacement. Le gros des rejets provient des installations de réfrigération et de climatisation mobile et fixe, ce qui concorde avec les taux élevés d'émission propres aux stocks de frigorigènes. La part des mousses sera surtout importante après 2015, la majorité des rejets survenant à la fin de vie de ces produits.

La nouvelle production étant faible, les stocks totaux de CFC diminueront du fait de la libération des substances dans l'atmosphère en cours de fonctionnement et lors de la mise au rebut des appareils. En l'absence de mesures additionnelles, une grande partie des CFC stockés aura été rejetée en 2015. En conséquence, les émissions annuelles de CFC devraient diminuer, passant de 1,7 Gt  $\text{éqCO}_2$  en 2002 à 0,3 Gt  $\text{éqCO}_2$  par an en 2015.

Les rejets de HCFC, évalués à 0,4 Gt  $\text{éqCO}_2$  par an en 2002, devraient atteindre 0,8 Gt  $\text{éqCO}_2$  en 2015. En effet, on s'attend à un accroissement rapide de l'utilisation de ces substances par les secteurs de la réfrigération (commerciale) et de la climatisation fixe.

On prévoit que les émissions de HFC tripleront à cause de la progression de l'emploi de ces substances dans les secteurs de la réfrigération et de la climatisation fixe et mobile, ainsi

que de la hausse des rejets du sous-produit HFC-23 due à l'augmentation de la production de HCFC-22 (195 Mt  $\text{éqCO}_2$  par an en 2002, 330 Mt  $\text{éqCO}_2$  en 2015 selon le scénario de la poursuite des activités).

**Les estimations des émissions présentent de grandes incertitudes.** Les données tirées des observations atmosphériques peuvent diverger de 10 à 25 % des calculs d'inventaire par catégorie de substances. L'écart est parfois beaucoup plus grand pour les gaz pris séparément. Cela s'explique par les lacunes que présentent les calculs d'inventaire, certaines applications n'étant pas répertoriées, et par les incertitudes qui entourent les données sur les appareils en service, qui ne sont pas centralisées. [11.3.4]

**Les textes publiés ne permettent pas d'estimer les émissions globales indirectes<sup>6</sup> de gaz à effet de serre associées à la consommation d'énergie. Elles peuvent être dix fois supérieures aux émissions directes, mais leur importance au cours du cycle de vie varie considérablement selon l'application.** Les émissions indirectes dépendent fortement du secteur en cause et des caractéristiques du produit ou de l'application, de l'intensité de carbone de l'électricité et des combustibles utilisés au cours du cycle de vie, de la qualité du confinement pendant la période d'utilisation et du traitement des substances stockées en fin de vie. [3.2, 4 et 5]

## 4. Possibilités d'éliminer les substances qui appauvrissent la couche d'ozone et de réduire les émissions de gaz à effet de serre

### 4.1 Quels moyens existe-t-il de réduire les émissions de gaz à effet de serre et comment évaluer l'efficacité des différentes solutions?

Tous les secteurs analysés dans le rapport pourraient réduire leurs émissions directes de gaz à effet de serre par les moyens suivants:

- Renforcement du confinement des substances;
- Réduction de la quantité de substances dans les appareils;
- Récupération et recyclage en fin de vie ou destruction des substances;
- Utilisation de produits de remplacement dont le potentiel de réchauffement global est moindre ou négligeable;
- Recours à des technologies de remplacement<sup>17</sup>.

Une évaluation poussée des solutions doit englober à la fois les émissions directes, les émissions indirectes associées à la consommation d'énergie, les aspects liés au cycle de vie complet et les considérations relatives à la santé, la sécurité et l'environnement. Toutefois, il n'existe pratiquement pas d'évaluations de ce genre, en raison du nombre limité de données et d'analyses comparatives publiées sur le sujet.

Les méthodes servant à déterminer quelle option technologique présente le plus grand potentiel en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre considèrent à la fois les émissions directes d'hydrocarbures halogénés ou de leurs produits de remplacement et les émissions indirectes associées à l'énergie consommée tout au long du cycle de vie. Les méthodes les plus complètes<sup>18</sup> évaluent une large gamme d'impacts sur l'environnement. D'autres, plus simples<sup>19</sup>, estiment les impacts au cours du cycle de vie et procurent souvent des indicateurs utiles de l'ampleur des émissions de gaz à effet de serre imputables à une application. Peu d'analyses comparatives claires reposant sur ces méthodes ont été publiées. Leurs conclusions divergent selon les hypothèses qui ont été retenues concernant les paramètres propres à l'application et, souvent, à la région et à la période

(particularités de l'emplacement, climat dominant, caractéristiques du système énergétique, etc.). [3.5]

Les analyses comparatives de nature économique sont utiles pour déterminer quelles solutions présentent une bonne efficacité par rapport à leurs coûts. Cependant, elles exigent un ensemble commun de méthodes et d'hypothèses (mode d'estimation des coûts, période visée, taux d'actualisation, conditions économiques futures, limites du système). La mise au point de techniques normalisées plus simples devrait permettre d'affiner les comparaisons à l'avenir. [3.3]

Il est généralement possible d'apprécier les risques pour la santé et la sécurité au moyen de méthodes normalisées. [3.4 et 3.5]

**La consommation d'énergie peut provoquer d'importantes émissions de gaz à effet de serre au cours du cycle de vie des appareils étudiés dans le rapport. L'amélioration du rendement énergétique est donc susceptible de réduire les émissions indirectes, selon la source d'énergie employée et d'autres paramètres, tout en abaissant les coûts nets, surtout lorsque la phase d'utilisation est longue (appareils de réfrigération et de climatisation fixe, par exemple).**

Les documents examinés n'ont pas permis d'estimer globalement la baisse des émissions qui serait ainsi possible, mais plusieurs études de cas portant sur une technologie ou un pays donné illustrent ce point.

**L'observation des meilleures pratiques<sup>20</sup> et des méthodes de récupération actuelles permettrait de réduire de moitié (baisse de 1,2 Gt éqCO<sub>2</sub> par an) d'ici 2015 les émissions directes imputables aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone et aux gaz à effet de serre qui les remplacent, par rapport aux projections du scénario de la poursuite des activités<sup>21</sup>. Environ 60 % de cette diminution concerne les HFC, 30 % les HCFC et 10 % les CFC.** Ces estimations reposent sur un scénario d'atténuation<sup>22</sup> qui comporte des hypothèses différentes selon les régions en ce qui concerne les meilleures pratiques de production, d'utilisation, de remplacement, de récupération et de destruction des

<sup>17</sup> Moyens d'obtenir les résultats escomptés sans employer d'hydrocarbures halogénés, en général par des méthodes différentes ou des techniques non conventionnelles. Exemples : déodorants en bâton ou en pulvérisateur à la place des aérosols au CFC-12, laine minérale à la place des mousses isolantes aux CFC, HFC ou HCFC, inhalateurs à poudre sèche à la place des inhalateurs doseurs aux CFC ou HFC.

<sup>18</sup> Les méthodes complètes, telle l'analyse du cycle de vie (ACV), incluent un certain nombre d'impacts sur l'environnement tout au long du cycle de vie. Elles sont exposées en détail dans les normes internationales ISO 14040:1997, ISO 14041:1998, ISO 14042:2000 et ISO 14043:2000.

<sup>19</sup> Les méthodes simplifiées comprennent l'impact total équivalent sur le réchauffement planétaire (TEWI), qui évalue les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre associées uniquement à l'utilisation et à l'élimination, et l'impact sur le climat au cours du cycle de vie (LCCP), qui englobe les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre dues à la fabrication des substances actives.

<sup>20</sup> Dans le rapport, on entend par meilleures pratiques les technologies éprouvées permettant d'atteindre à une date donnée les émissions les plus faibles possibles d'hydrocarbures halogénés pour produire, utiliser, remplacer, récupérer et détruire ces substances ou les produits qui en renferment. (Voir le tableau RT-6)

<sup>21</sup> À titre de comparaison, les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la combustion de matières fossiles et à la production de ciment se situaient aux environs de 24 Gt éqCO<sub>2</sub> par an en 2000.

<sup>22</sup> Le scénario d'atténuation utilisé dans le rapport prévoit l'évolution des émissions d'hydrocarbures halogénés jusqu'en 2015 en se basant sur des hypothèses différentes selon les régions pour ce qui est des meilleures pratiques.

substances visées. La part de chaque secteur est présentée dans la figure RID-5. [11.5]

C'est dans les secteurs qui emploient des frigorigènes que se trouve le plus grand potentiel de réduction des émissions dues aux substances stockées d'ici 2015. Les taux d'émission courants y sont beaucoup plus importants que dans le secteur des mousses. Une action précoce (récupération ou destruction et renforcement du confinement) permettrait de réduire davantage les rejets provenant des stocks de CFC.

## 4.2 Quelles sont les possibilités de réduire les émissions d'ici 2015, dans les différents secteurs, et quels en seraient les coûts?

**Les émissions directes de gaz à effet de serre produites par les appareils de réfrigération pourraient diminuer de 10 à 30 %. Le scénario d'atténuation donne une baisse globale des émissions directes de quelque 490 Mt  $\text{eqCO}_2$  par an d'ici 2015 pour l'ensemble du secteur, dont 400 Mt  $\text{eqCO}_2$  pour la seule réfrigération commerciale. Les coûts associés sont de l'ordre de 10 à 300 dollars  $\text{É.-U./t}$   $\text{eqCO}_2$ <sup>23,24</sup>. Par ailleurs, l'amélioration du rendement énergétique pourrait réduire sensiblement les émissions indirectes de gaz à effet de serre.**

Dans les grandes installations de supermarchés, il est possible d'abaisser les indices LCCP<sup>19</sup> de 60 % en utilisant des frigorigènes différents, en renforçant le confinement ou en recourant

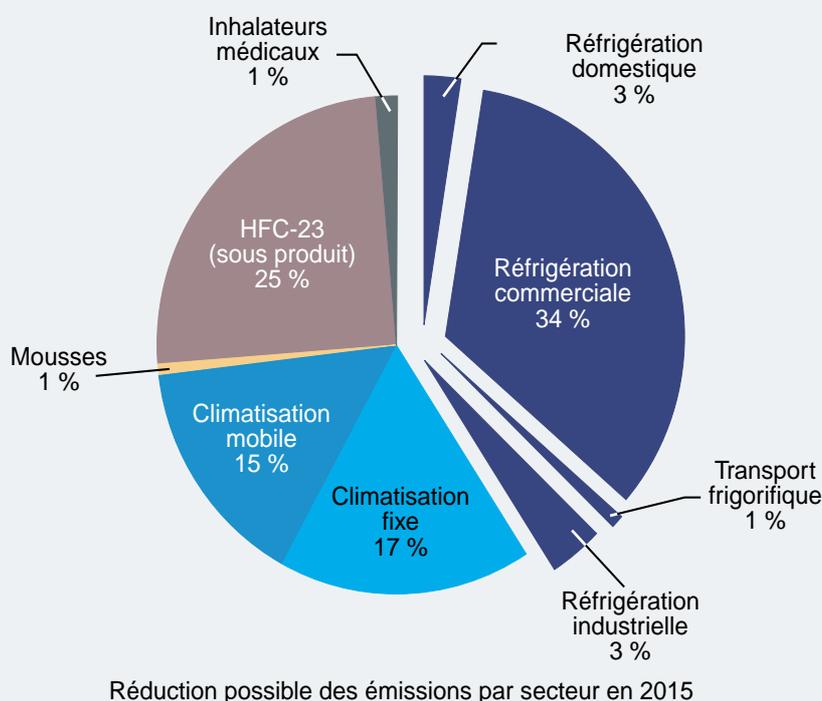
à des systèmes répartis, indirects ou en cascade. Les coûts associés aux mesures visant les frigorigènes se situent entre 20 et 280 dollars  $\text{É.-U./t}$   $\text{eqCO}_2$  dans la réfrigération commerciale.

Dans l'industrie alimentaire, l'entreposage frigorifique et la réfrigération industrielle, l'emploi d'ammoniac devrait augmenter et les HFC remplacer le HCFC-22 et les CFC. Les coûts des mesures visant les frigorigènes s'établissent entre 27 et 37 dollars  $\text{É.-U./t}$   $\text{eqCO}_2$  dans le secteur de la réfrigération industrielle. Dans celui du transport frigorifique, on a commencé à commercialiser des systèmes qui présentent un potentiel de réchauffement global moindre, fonctionnant par exemple avec de l'ammoniac, des hydrocarbures ou un mélange ammoniac-dioxyde de carbone.

Le potentiel de réduction des émissions est assez limité dans la réfrigération domestique. Les coûts associés varient de 0 à 130 dollars  $\text{É.-U./t}$   $\text{eqCO}_2$ . Les rejets des installations qui fonctionnent au HFC-134a ou au HC-600a (isobutane) représentent une bonne partie du total des émissions, pour différentes intensités de carbone de la production électrique. L'écart entre l'indice LCCP<sup>19</sup> des appareils au HFC-134a et celui des appareils à l'isobutane est faible et la récupération en fin de vie pourrait réduire encore cet écart, moyennant une certaine majoration des coûts. [4]

**Il est possible de diminuer les émissions directes de gaz à effet de serre provenant des appareils fixes de climatisation et de chauffage à usage domestique et commercial d'environ 200 Mt  $\text{eqCO}_2$  par an d'ici 2015, par rapport au**

**Figure RID-5.** Réduction possible des émissions directes de CFC, HCFC et HFC par secteur en 2015, par rapport aux projections du scénario de la poursuite des activités. Le total équivaut à la moitié environ (1,2 Gt  $\text{eqCO}_2$  par an) des émissions directes de gaz à effet de serre données par ce scénario.



<sup>23</sup> Les coûts concernent uniquement la réduction des émissions directes. La prise en considération de l'amélioration du rendement énergétique peut donner des coûts nets négatifs, c'est-à-dire des économies.

<sup>24</sup> Sauf indication contraire, les coûts sont en dollars  $\text{É.-U.}$  de 2002.

**scénario de la poursuite des activités. Les coûts associés vont de -3 à 170 dollars É.-U./t éqCO<sub>2</sub><sup>23</sup>. Si l'on tient compte de l'amélioration du rendement énergétique, qui réduit les émissions indirectes, les solutions envisagées entraînent bien souvent un avantage financier net.** La baisse des émissions directes peut se faire par i) une meilleure récupération des frigorigènes en fin de vie (selon le scénario d'atténuation, elle est estimée à 50 % dans les pays en développement et à 80 % dans les pays développés), ii) la réduction de la quantité de produit utilisé (jusqu'à 20 %), iii) le renforcement du confinement et iv) l'utilisation de frigorigènes qui présentent un potentiel de réchauffement global moindre ou négligeable.

L'amélioration de l'enveloppe des bâtiments (réduction des pertes ou des gains de chaleur) peut avoir un impact notable sur les émissions indirectes.

Les mélanges de HFC et les hydrocarbures (pour les petites installations) sont utilisés à la place du HCFC-22 dans les pays développés. Quand on peut employer sans risque des hydrocarbures, le rendement énergétique obtenu est comparable à celui des frigorigènes aux hydrocarbures fluorés. Les progrès techniques pourraient réduire la quantité de produit nécessaire et donc étendre les possibilités d'emploi des hydrocarbures. [5]

**Les émissions provenant du secteur de la climatisation mobile pourraient être réduites de 180 Mt éqCO<sub>2</sub> par an d'ici 2015, à un coût de 20 à 250 dollars É.-U./t éqCO<sub>2</sub><sup>23</sup>. Les coûts diffèrent selon la région et la solution adoptée.**

Le renforcement du confinement, la récupération en fin de vie (du CFC-12 et du HFC-134a) et le recyclage (du HFC-134a) pourraient faire reculer les émissions directes de gaz à effet de serre de 50 % et les émissions totales (directes et indirectes) de 30 à 40 %, avec un avantage financier pour les propriétaires de véhicules. Il est probable que de nouveaux appareils, renfermant du CO<sub>2</sub> ou du HFC-152a et présentant un indice LCCP équivalent, apparaîtront sur le marché et permettront d'abaisser les émissions totales de gaz à effet de serre de 50 à 70 % en 2015, à un coût se situant entre 50 et 180 dollars É.-U. par véhicule.

Les hydrocarbures et leurs mélanges, dont l'emploi reste limité, présentent des propriétés thermodynamiques intéressantes et offrent un bon rendement énergétique. Toutefois, les questions de sécurité et de responsabilité pour les constructeurs et les fournisseurs du secteur automobile restreignent l'utilisation d'hydrocarbures dans les véhicules neufs. [6.4.4]

**Étant donné la longue durée de vie de la plupart des installations qui renferment des mousses, on prévoit une baisse limitée des émissions d'ici 2015, de 15 à 20 Mt éqCO<sub>2</sub> par an, et des coûts associés de 10 à 100 dollars É.-U./t éqCO<sub>2</sub><sup>23</sup>. Le potentiel de réduction augmente dans les décennies suivantes.**

Plusieurs mesures à court terme, par exemple l'arrêt de l'utilisation des HFC dans les mousses monocomposant en Europe, sont déjà en place et sont prises en considération dans le scénario de la poursuite des activités. Il existe deux autres possibilités importantes dans ce secteur. La première est la diminution de l'emploi d'hydrocarbures halogénés dans la nouvelle production de mousses. Cependant, l'élargissement du recours aux mélanges et l'abandon des hydrocarbures fluorés dépendent des progrès techniques et de la réaction du marché. Les mesures visant à réduire de 50 % l'emploi de HFC

entre 2010 et 2015 permettraient de diminuer les émissions d'environ 10 Mt éqCO<sub>2</sub> par an, à un coût de 15 à 100 dollars É.-U./t éqCO<sub>2</sub>, et d'enregistrer de nouvelles baisses par la suite<sup>23</sup>.

La deuxième possibilité concerne les stocks mondiaux d'hydrocarbures halogénés que renferment les mousses isolantes présentes dans les bâtiments et divers appareils (environ 9 Gt éqCO<sub>2</sub> pour les CFC et 1 Gt éqCO<sub>2</sub> pour les HCFC en 2002). Bien que les mesures de récupération n'aient pas encore fait leur preuve et aient été jusqu'à présent limitées, surtout dans le bâtiment, le secteur commercial récupère déjà les hydrocarbures halogénés stockés dans les appareils, à un coût de 10 à 50 dollars É.-U./t éqCO<sub>2</sub><sup>23</sup>. La réduction des émissions atteindrait 7 Mt éqCO<sub>2</sub> par an en 2015, chiffre qui pourrait augmenter fortement entre 2030 et 2050, en raison du retrait définitif de grandes quantités de mousses isolantes des bâtiments. [7]

**Les possibilités liées aux inhalateurs médicaux sont réduites étant donné les impératifs de traitement, les taux assez faibles d'émission et le coût des produits de remplacement.** S'agissant des inhalateurs doseurs, la principale option serait de remplacer les CFC par des HFC dans une plus large mesure que ce que prévoit le scénario de la poursuite des activités. Les émissions de gaz à effet de serre s'établiraient ainsi à 14 Mt éqCO<sub>2</sub> par an en 2015, au lieu de 40 Mt éqCO<sub>2</sub>. La santé et la sécurité des patients sont capitales dans le choix du mode de traitement et l'emploi d'inhalateurs doseurs aux HFC se heurte à d'importants obstacles médicaux. Si les inhalateurs doseurs qui dispensent du salbutamol (la moitié environ du total) étaient remplacés par des inhalateurs à poudre sèche, ce qui n'est pas prévu dans le scénario d'atténuation, la baisse des émissions serait de 10 Mt éqCO<sub>2</sub> par an environ en 2015 et les coûts associés ieraient de 150 à 300 dollars É.-U./t éqCO<sub>2</sub>. [8]

**Dans le domaine de la protection contre les incendies, le potentiel de réduction d'ici 2015 est limité en raison des taux d'émission plutôt faibles, de l'adoption massive dans le passé de technologies de remplacement et du temps nécessaire pour l'agrément d'un nouveau matériel.** On estime à 5 Mt éqCO<sub>2</sub> par an en 2015 (scénario de la poursuite des activités) les émissions directes de gaz à effet de serre provenant de ce secteur. Les halons ont été remplacés par des agents sans incidence sur le climat dans 75 % des installations. Quatre pour cent des systèmes aux halons n'ont pas été modifiés, tandis que 21 % sont passés aux HFC et un petit nombre aux HCFC et aux PFC. Les nouvelles installations fixes n'ont pas besoin de PFC, qui servent uniquement d'agent propulseur dans un mélange pour extincteurs portatifs provenant d'un fabricant. Étant donné le temps nécessaire pour les essais, l'homologation et l'adoption d'équipements ou d'agents de protection contre les incendies, il est peu probable que de nouvelles solutions aient un impact notable d'ici 2015. L'utilisation d'un fluorocétone depuis 2002 pourrait accroître les réductions d'ici 2015, moyennant certains coûts, mais les baisses attendues sont faibles par rapport à ce qui serait possible dans d'autres domaines. [9]

**Il existe certaines possibilités de réduction des émissions dans le secteur des aérosols non médicaux et des solvants, mais elles sont probablement assez faibles car la plupart des utilisations actuelles sont cruciales du point de vue de la performance ou de la sécurité.** Le scénario de la poursuite des activités prévoit en 2015 des émissions de 14 Mt éqCO<sub>2</sub> par an pour les solvants et de 23 Mt éqCO<sub>2</sub> pour

les aérosols. Le remplacement du HFC-134a par du HFC-152a dans les aérosols techniques de dépoussiérage serait le principal moyen de réduire les gaz à effet de serre. Pour ce qui est des nettoyeurs de contacts électriques et des agents de démoulage des matières plastiques, il serait possible de remplacer les HCFC par des hydrofluoroéthers (HFE) et des HFC présentant un potentiel moindre de réchauffement global. L'utilisation de HFC dans les aérosols de produits de beauté, de consommation courante et de fantaisie est interdite dans certains pays, mais on continue dans beaucoup d'autres à employer du HFC-134a pour des raisons de sécurité.

Certains solvants organiques peuvent remplacer les HFC, PFC et SAO dans de nombreuses applications. C'est le cas de composés dont le potentiel de réchauffement global est moins élevé, tels les solvants chlorés classiques, les HFE, les HC et les solvants oxygénés. En outre, de nombreuses technologies de remplacement sont viables, par exemple les procédés sans nettoyage et le nettoyage à l'eau. [10]

**Selon deux études européennes réalisées en 2000, l'arrêt du rejet de HFC-23, sous-produit de la fabrication du HCFC-22, pourrait réduire les émissions de 300 Mt  $\text{eqCO}_2$  par an d'ici 2015, à des coûts associés inférieurs à 0,2 dollars É.-U./t  $\text{eqCO}_2$ .**

La diminution de la production de HCFC-22 sous l'effet des mécanismes du marché ou des politiques nationales, ou l'amélioration de la conception et de la construction des installations servant à cette production, pourrait également diminuer les émissions de HFC-23. [10.4]

### 4.3 Quels sont les instruments, les politiques et les mesures en place?

**Divers instruments, politiques et mesures sont mis en œuvre afin de réduire l'utilisation ou l'émission de substances appauvrissant la couche d'ozone et de leurs produits de remplacement, par exemple les HFC et les PFC. Il s'agit entre autres de règlements, d'instruments économiques, d'accords volontaires et de mécanismes de coopération internationale. En outre, les politiques générales en matière d'énergie et de climat ont une incidence sur les émissions indirectes de gaz à effet de serre découlant de l'emploi de substances nocives pour l'ozone, de leurs substituts ou de technologies de remplacement.**

Le rapport donne des informations sur les politiques et les mécanismes qui ont été mis en place dans certains pays

(développés pour la plupart) pour réduire l'utilisation ou l'émission de SAO et de leurs produits de remplacement. Ces mesures comprennent:

- Des règlements (normes de fonctionnement, homologation, restriction, gestion en fin de vie, etc.);
- Des instruments économiques (fiscalité, échange de droits d'émission, incitation financière, consignation, etc.);
- Des accords volontaires (réduction volontaire de l'utilisation et des émissions, partenariats industriels, respect des directives recommandées, etc.);
- Des mécanismes de coopération internationale (mécanisme pour un développement propre, etc.).

Bien entendu, les considérations de nature politique sont fonction des applications particulières, des conditions nationales et d'autres facteurs.

### 4.4 La capacité de production des HFC et des PFC sera-t-elle suffisante pour les utilisations futures dans les pays en développement?

**Les chiffres publiés ne permettent pas de prévoir la capacité future. Mais, étant donné qu'il n'existe aucun obstacle technique ou juridique à la production de HFC et de PFC, on peut supposer que la capacité mondiale permettra globalement de satisfaire ou d'excéder la demande. Dans le rapport, la production future est donc estimée en cumulant la demande des différents secteurs.**

Selon le scénario de la poursuite des activités, la capacité de production mondiale devrait croître, surtout dans les pays en développement et par le biais de coentreprises. Il est généralement possible, aujourd'hui, de produire une quantité de HFC et de PFC supérieure à la demande. Plusieurs usines de HFC-134a sont implantées dans les pays développés et une dans un pays en développement, d'autres devant venir s'y ajouter; les quelques usines qui fabriquent d'autres HFC sont presque toutes situées dans les pays développés. Le projet européen d'élimination progressive du HFC-134a dans les climatiseurs d'automobiles neuves et le programme volontaire de l'industrie visant à réduire les émissions de HFC-134a de 50 % aura un impact sur la demande ainsi que sur la capacité et le volume de production. L'expansion rapide des marchés dans les pays en développement, notamment pour le remplacement des CFC, crée de nouveaux débouchés pour les gaz fluorés, la demande étant actuellement satisfaite par l'expansion de la capacité de production de HCFC-22 et 141b. [11]

Rapport spécial du GIEC et du GETE

# Préservation de la couche d'ozone et du système climatique planétaire: Questions relatives aux hydrofluorocarbures et aux hydrocarbures perfluorés

## Résumé technique

### Auteurs coordonnateurs principaux

David de Jager (Pays-Bas), Martin Manning (États-Unis d'Amérique),  
Lambert Kuijpers (Pays-Bas)

### Auteurs principaux

Stephen O. Andersen (États-Unis d'Amérique), Paul Ashford (Royaume-Uni), Paul Atkins (États-Unis d'Amérique), Nick Campbell (France), Denis Clodic (France), Sukumar Devotta (Inde), Dave Godwin (États-Unis d'Amérique), Jochen Harnisch (Allemagne), Malcolm Ko (États-Unis d'Amérique), Suzanne Kocchi (États-Unis d'Amérique), Sasha Madronich (États-Unis d'Amérique), Bert Metz (Pays-Bas), Leo Meyer (Pays-Bas), José Roberto Moreira (Brésil), John Owens (États-Unis d'Amérique), Roberto Peixoto (Brésil), José Pons (Venezuela), John Pyle (Royaume-Uni), Sally Rand (États-Unis d'Amérique), Rajendra Shende (Inde), Theodore Shepherd (Canada), Stephan Sicars (Canada), Susan Solomon (États-Unis d'Amérique), Guus Velders (Pays-Bas), Dan Verdonik (États-Unis d'Amérique), Robert Wickham (États-Unis d'Amérique), Ashley Woodcock (Royaume-Uni), Paul Wright (Royaume-Uni) et Masaaki Yamabe (Japon)

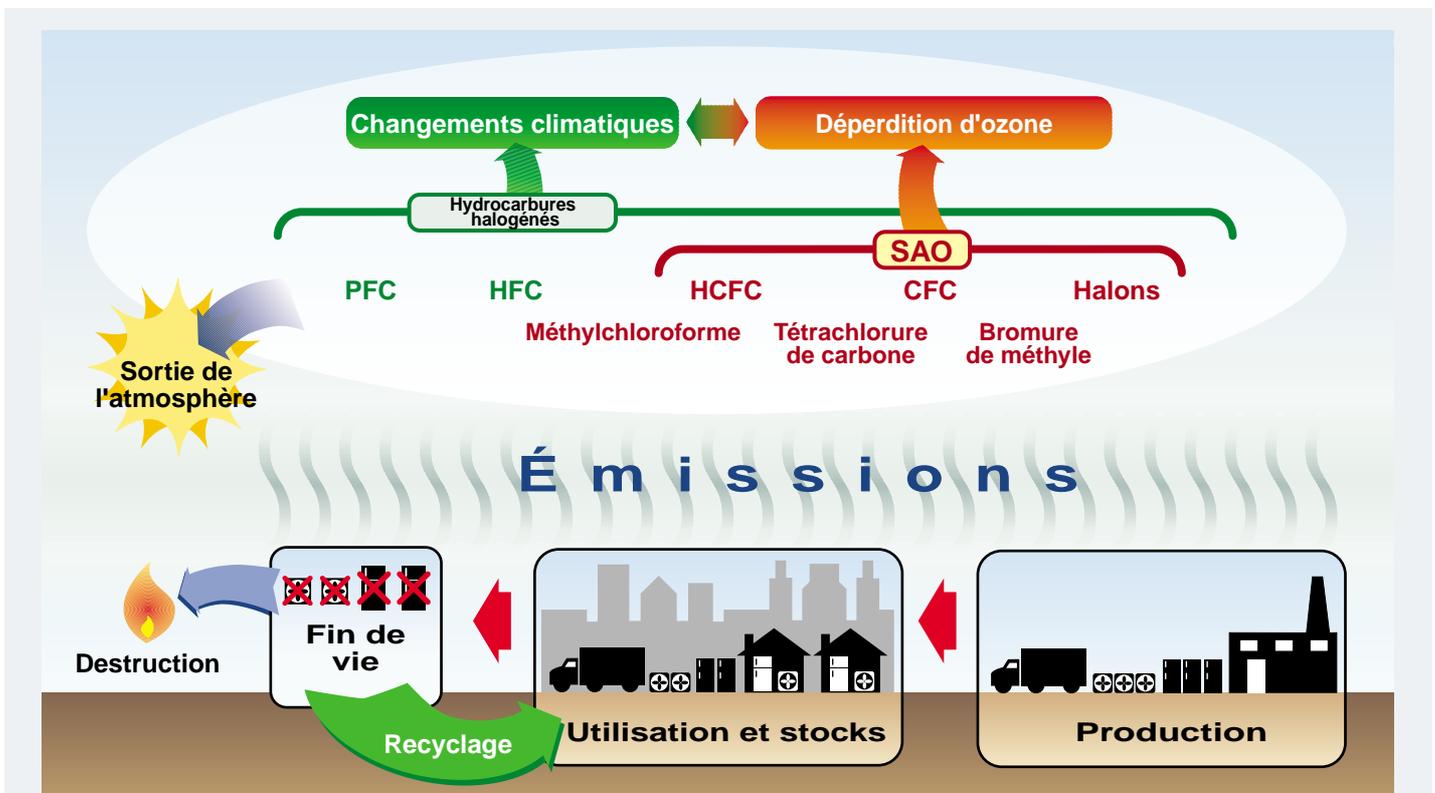
### Éditeurs-réviseurs

Ogunlade Davidson (Sierra Leone), Mack McFarland (États-Unis d'Amérique),  
Pauline Midgley (Allemagne)

# 1. Introduction

Les Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)<sup>1</sup> et au Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone<sup>2</sup> ont demandé que soit établi un rapport spécial équilibré, propre à faciliter la prise de décision, qui renferme des informations scientifiques et techniques concernant l'impact sur le système climatique mondial des produits de remplacement des substances nocives pour l'ozone. Le rapport a été élaboré par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et par le Groupe de l'évaluation technique et économique (GETE) relevant du Protocole de Montréal.

Le Protocole de Montréal régleme la production et la consommation des **substances qui appauvrissent la couche d'ozone**<sup>3</sup> (SAO) dans la stratosphère<sup>4</sup>. En conséquence, les pays développés et les pays en développement qui sont Parties au Protocole ont entrepris leur élimination progressive. Ces substances et un certain nombre de leurs substituts sont des **gaz à effet de serre** (GES) qui contribuent aux changements climatiques (voir la figure RT-1). Certains produits de remplacement des SAO, en particulier les **hydrofluorocarbures** (HFC) et les **hydrocarbures perfluorés** (PFC), sont régis par les dispositions de la CCNUCC et de son Protocole de Kyoto. Les solutions retenues pour préserver la couche d'ozone pourraient influencer sur les



**Figure RT-1.** Illustration des principales questions traitées dans ce rapport. Les chlorofluorocarbures (CFC), les halons et les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) concourent à la déperdition d'ozone et aux changements climatiques. Les hydrofluorocarbures (HFC) et les hydrocarbures perfluorés (PFC) contribuent uniquement aux changements climatiques. Ces derniers peuvent donc remplacer les SAO, car ils sont sans danger pour la couche d'ozone. Les gaz réglementés par le Protocole de Montréal, ses amendements et ajustements<sup>5</sup> figurent en rouge, les gaz régis par la CCNUCC et le Protocole de Kyoto sont en vert. Parmi les moyens envisagés pour réduire les émissions d'halocarbures figurent le renforcement du confinement, la récupération, le recyclage, la destruction des sous-produits et des stocks<sup>6</sup> actuels, le recours à des techniques de remplacement et le choix de substances qui présentent un potentiel de réchauffement global moindre ou négligeable.

<sup>1</sup> Décision 12/CP.8, FCCC/CP/2002/7/Add.1, page 32.

<sup>2</sup> Décision XIV/10 UNEP/OzL.Pro.14/9, page 56.

<sup>3</sup> Les termes définis dans le glossaire sont mis en évidence en couleur à leur première occurrence dans le présent résumé technique.

<sup>4</sup> Sauf indication contraire, l'ozone dont il est question dans le rapport est l'ozone stratosphérique.

<sup>5</sup> Regroupés ensuite sous le terme de «Protocole de Montréal».

<sup>6</sup> Quantité totale de substances qui sont présentes dans les équipements existants, les dépôts chimiques, les mousses et autres produits mais qui n'ont pas encore été libérées dans l'atmosphère.

changements climatiques, lesquels sont susceptibles, à leur tour, d'avoir un impact indirect sur la couche d'ozone.

Le présent rapport traite de l'incidence des émissions totales de SAO et de leurs substituts sur le système climatique et sur la couche d'ozone, afin notamment de saisir les répercussions que pourraient avoir les solutions de remplacement sur le réchauffement planétaire. L'impact de ces dernières sur la couche d'ozone n'est pas analysé en détail.

Les [hydrochlorofluorocarbures](#) (HCFC) ont servi à remplacer les [chlorofluorocarbures](#) (CFC) dans plusieurs applications parce qu'ils ont une durée de vie moindre dans l'atmosphère et participent donc moins à l'[appauvrissement de la couche d'ozone](#). Les HFC et les PFC ont été identifiés comme substituts potentiels à long terme des SAO car ils ne contiennent ni brome ni chlore, et ne participent pas de façon notable à l'appauvrissement de la couche d'ozone. Cependant, tous sont des gaz à effet de serre et contribuent à l'évolution du climat à divers degrés. D'autres alternatives à l'utilisation des [halocarbures](#) incluent l'ammoniac et des matières organiques, dont les émissions directes ont un impact très limité sur le climat, même si les émissions indirectes peuvent être importantes.

Les possibilités de réduire les émissions d'halocarbures, en recourant à des substances ou à des techniques susceptibles de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, sont étudiées par secteur. Les HFC et les PFC sont uniquement examinés en tant que produits de remplacement des substances nocives pour l'ozone. Il n'y est pas question des émissions de HFC ou de PCF dues à la production d'aluminium, à la fabrication de semi-conducteurs ou à d'autres activités dans lesquelles il n'est pas envisagé de remplacer les SAO.

Les substances qui appauvrissent la couche d'ozone et les HFC ou PFC qui les remplacent sont surtout utilisés dans la réfrigération, la climatisation, les mousses, les [aérosols](#), la protection contre les incendies et les [solvants](#). La libération dans l'atmosphère peut survenir de bien des manières: étapes de fabrication, rejet non intentionnel de sous-produits, opérations comportant une émission intentionnelle, évaporation ou fuite des [stocks](#) contenus dans les équipements et les produits au cours de leur utilisation, leurs essais, leur entretien et en fin de vie.

L'étude des différentes solutions envisagées s'étend généralement jusqu'en 2015. En effet, on détient pour la prochaine décennie des données fiables sur les techniques et produits de remplacement qui présentent d'excellentes possibilités de commercialisation dans ces secteurs en évolution rapide. Le rapport analyse également les résultats techniques, les méthodes d'évaluation possibles, les émissions indirectes<sup>7</sup> associées à la consommation d'énergie, les coûts et les questions relatives à la santé et à la sécurité, aux conséquences sur la qualité de l'air et à l'approvisionnement futur.

Le résumé technique (RT) rassemble les principales informations contenues dans le rapport et en suit globalement la structure en trois parties. La première partie décrit les relations scientifiques entre l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique et l'évolution du climat. Elle apporte un complément d'informations sur le [forçage radiatif](#), les observations sur les variations des agents de forçage et de leurs émissions (section 2 du résumé technique). Elle explique comment l'élimination progressive des SAO affecte l'ozone stratosphérique et l'évolution du climat, mais également les implications sur la qualité de l'air et les enjeux environnementaux locaux. Le rapport ne se veut pas aussi exhaustif et précis que les évaluations spécialisées sur les changements climatiques et la couche d'ozone. Il propose plutôt une synthèse des interactions entre les deux enjeux environnementaux permettant une réflexion sur les options de remplacement.

La seconde partie analyse les options de substitution aux SAO, y compris les enjeux environnementaux, sanitaires, sécuritaires, techniques et de disponibilité (sections 3 et 4 du résumé technique). Le rapport évalue les pratiques et les technologies de remplacement permettant de réduire les émissions et les impacts nets sur le réchauffement dans chaque secteur d'utilisation, y compris les considérations en termes d'amélioration des processus, du [confinement](#), de la [récupération](#) en fin de vie, du [recyclage](#), de la mise au rebut et de la [destruction](#), ainsi que les politiques et mesures correspondantes.

La troisième partie couvre la question de l'offre et de la demande. Le rapport fait la synthèse des informations existantes sur les émissions des divers secteurs et régions et examine l'équilibre entre offre et demande, en tenant compte des enjeux propres aux pays en développement (section 3.8 du résumé technique).

<sup>7</sup> Dans les inventaires nationaux, on entend par «émissions indirectes» les rejets de gaz à effet de serre qui se produisent lors de la décomposition d'une autre substance dans l'environnement. Il n'en va pas de même dans le présent rapport, où l'expression désigne les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la consommation d'énergie dont tiennent compte les analyses du cycle de vie (ACV), par exemple le calcul de l'impact total équivalent sur le réchauffement planétaire (TEWI) ou l'évaluation de l'impact sur le climat au cours du cycle de vie (LCCP).

## 2. Halocarbures, appauvrissement de la couche d'ozone et changements climatiques

### 2.1 Comment les CFC et leurs substituts contribuent-ils au forçage radiatif du système climatique?

De nombreux halocarbures, dont les CFC, PFC, HFC et HCFC, sont des GES effectifs car ils absorbent les rayons infrarouges émis depuis le sol dans un domaine spectral où l'énergie n'est pas retirée par le  $\text{CO}_2$  ou la vapeur d'eau (parfois appelé la *fenêtre atmosphérique*, voir la figure RT-2). Les molécules d'halocarbures peuvent être des milliers de fois plus efficaces pour absorber l'énergie radiante émise depuis la Terre qu'une molécule de  $\text{CO}_2$ , et un faible volume de ces gaz peut contribuer de manière notable au forçage radiatif<sup>8</sup> du système climatique. [1.1]<sup>9</sup>

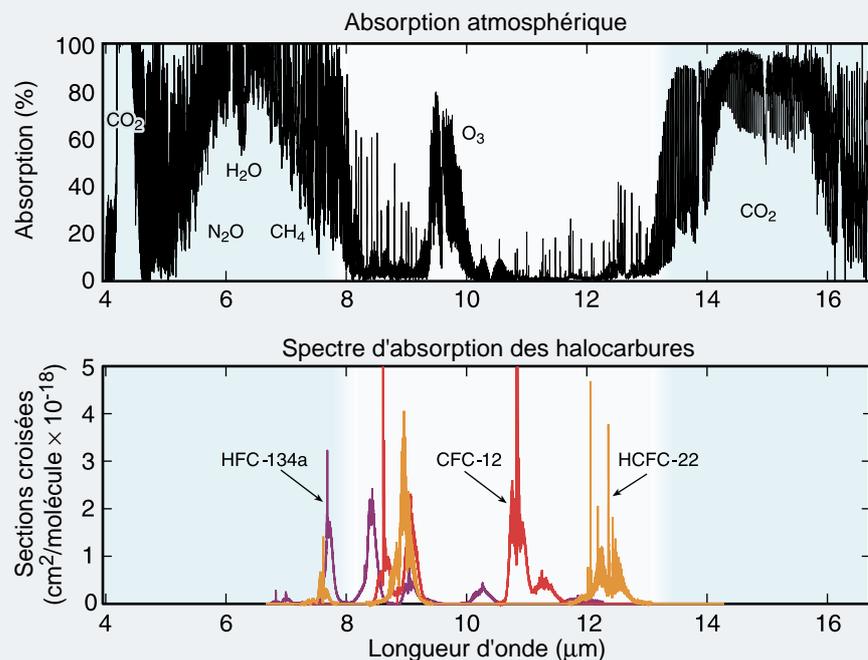
Les rendements radiatifs ( $\text{W m}^{-2} \text{ppb}^{-1}$ ) des halocarbures et autres gaz à effet de serre bien mélangés, déclarés dans le cadre des Protocoles de Montréal et de Kyoto, sont indiqués dans le tableau RT-1. Pour la plupart des gaz considérés, l'amplitude du forçage radiatif direct généré par un gaz correspond au produit de son rapport de mélange (en unités par milliard

ou ppb) par son rendement radiatif. Pour les gaz à effet de serre les plus abondants – le  $\text{CO}_2$ , le méthane et l'oxyde nitreux – il existe une relation non linéaire entre le taux de mélange et le forçage radiatif. [1.1]

Le premier effet radiatif du  $\text{CO}_2$  et de la vapeur d'eau est de réchauffer le climat de surface tout en refroidissant la *stratosphère*. Cependant, compte tenu de leur absorption dans la fenêtre atmosphérique, l'effet radiatif direct des halocarbures est de réchauffer à la fois la *troposphère* et la stratosphère. [1.2 et encadré 1.4]

Outre leur effet direct sur le climat, certains gaz ont un effet indirect soit dû au forçage radiatif causé par leurs produits de dégradation, soit de par leur influence sur la chimie de l'atmosphère. Les halocarbures contenant du chlore ou du brome sont des SAO et, comme l'*ozone* est un gros absorbeur de rayons UV, ils ont un effet de refroidissement indirect important par rapport à leur effet de réchauffement direct. Pour les *hydrocarbures*, les effets indirects associés à la production d'ozone troposphérique peuvent être sensiblement supérieurs aux effets directs. [1.1, 1.5, encadré 1.3, 2.2 et 2.5]

**Figure RT-2.** Partie supérieure: absorption atmosphérique infrarouge (0 représente l'absence d'absorption et 100 % l'absorption complète des radiations) déduite des mesures de radiance de la station spatiale IMG/ADEOS (3 avril 1997; 9,5 °O; 38,4 °N). Partie inférieure: sections croisées d'absorption des halocarbures (HCFC-22, CFC-12, HFC-134a) dans la fenêtre atmosphérique infrarouge, qui se situe entre les régions presque opaques du fait des fortes absorptions par les  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CH}_4$  et  $\text{N}_2\text{O}$ . [Figure 2.6]



<sup>8</sup> Le forçage radiatif est une mesure de l'influence d'un facteur sur l'altération de l'équilibre entre les énergies entrantes et sortantes du système Terre-atmosphère, et un indice de l'importance de ce facteur sur le mécanisme d'évolution potentiel du climat. Il est exprimé en watts par mètre carré ( $\text{W m}^{-2}$ ). Un gaz à effet de serre provoque un forçage radiatif direct par l'absorption et l'émission de radiations et peut également produire un forçage radiatif indirect par ses interactions chimiques qui influent sur les autres gaz à effet de serre ou particules.

<sup>9</sup> Les chiffres placés entre crochets renvoient aux sections du rapport principal dans lesquelles on pourra trouver le texte sur lequel repose le paragraphe en question, avec les références correspondantes.

**Tableau RT-1.** Rendements radiatifs, durées de vie et forçage radiatif positif direct des GES et des halocarbures miscibles normalement établis selon les Protocoles de Montréal et de Kyoto compte tenu de leur augmentation entre 1750 et 2000 et entre 1970 et 2000. Voir la section 1.1, notamment le tableau 1.1, et la section 2.2, notamment le tableau 2.6, à ce sujet.

Type de gaz	Rendement radiatif (W m <sup>-2</sup> ppb <sup>-1</sup> )	Durée de vie (années)	Forçage radiatif (W m <sup>-2</sup> )	
			1750–2000	1970–2000
CO <sub>2</sub>	1,55 × 10 <sup>-5</sup> <sup>a</sup>	∞ <sup>b</sup>	1,50	0,67
CH <sub>4</sub>	3,7 × 10 <sup>-4</sup>	12 <sup>c</sup>	0,49	0,13
N <sub>2</sub> O	3,1 × 10 <sup>-3</sup>	114 <sup>c</sup>	0,15	0,068
CFC-11	0,25	45	0,066	0,053
CFC-12	0,32	100	0,173	0,136
CFC-113	0,3	85	0,025	0,023
CFC-114	0,31	300	0,005	0,003
CFC-115	0,18	1 700	0,002	0,002
HCFC-22	0,20	12	0,0283	0,0263
HCFC-123	0,14	1,3	0,0000	0,0000
HCFC-124	0,22	5,8	0,0003	0,0003
HCFC-141b	0,14	9,3	0,0018	0,0018
HCFC-142b	0,2	17,9	0,0024	0,0024
HCFC-225ca	0,2	1,9	0,0000	0,0000
HCFC-225cb	0,32	5,8	0,0000	0,0000
HFC-23	0,19	270	0,0029	0,0029
HFC-32	0,11	4,9	0,0000	0,0000
HFC-125	0,23	29	0,0003	0,0003
HFC-134a	0,16	14	0,0024	0,0024
HFC-152a	0,09	1,4	0,0002	0,0002
HFC-227ea	0,26	34,2	0,0000	0,0000
Halon-1211	0,3	16	0,0012	0,0012
Halon-1301	0,32	65	0,0009	0,0009
Halon-2402	0,33	20	0,0001	0,0001
CCl <sub>4</sub>	0,13	26	0,0127	0,0029
CH <sub>3</sub> Br	0,01	0,7	0,0001	0,0000
CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	0,06	5	0,0028	0,0018
CF <sub>4</sub>	0,08	50 000	0,0029	0,0029
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	0,26	10 000	0,0006	0,0006
C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	0,26	2 600	0,0001	0,0001
Éthane	0,0032	0,21	-	-
Pentane	0,0046	0,010	-	-

Notes:

<sup>a</sup> Le rendement radiatif du CO<sub>2</sub> diminue lorsque sa concentration augmente.

<sup>b</sup> Le retrait du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère implique différents processus. Il est donc impossible de déterminer une durée de vie homogène. Cependant, les modèles du cycle du carbone estiment généralement que 30 à 50 % des émissions de CO<sub>2</sub> restent dans l'atmosphère au-delà de 100 ans.

<sup>c</sup> Les durées de vie des CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O englobent les effets indirects de l'émission de chaque gaz sur sa propre durée de vie.

## 2.2 Combien de temps les CFC et leurs substituts restent-ils dans l'atmosphère une fois émis?

Les gaz ayant les plus longues durées de vie restent dans l'atmosphère et peuvent donc avoir un effet sur le climat à plus long terme. La durée de vie de plusieurs halocarbures et de leurs substituts est indiquée dans le tableau RT-1. La plupart des CFC sont éliminés de l'atmosphère sur une période entre 50 et 100 ans. À l'exception du HFC-23, dont la durée de vie

atteint 270 ans, les HCFC et HFC sont efficacement éliminés de la troposphère par les processus d'oxydation dans l'atmosphère. Ils ont donc des durées de vie allant d'un an à quelques décennies. Les PFC sont des molécules très inertes et leurs émissions contribuent au réchauffement du système climatique sur des périodes pouvant dépasser le millénaire. [2.2]

La plupart des halocarbures gazeux perdurent suffisamment longtemps pour se mélanger à l'atmosphère avant d'être détruits. Ils ont donc des rapports de mélange quasi-constants dans la troposphère. À l'opposé, les composants organiques ou

l'ammoniac ont des durées de vie allant de quelques jours à quelques semaines, ce qui en rend la répartition très fluctuante à la fois dans l'espace et dans le temps. [2.2]

### 2.3 Comment évoluent les concentrations atmosphériques et les émissions de CFC, halons, HCFC, HFC et PFC?

Les observations atmosphériques, comme illustré à la figure RT-3, indiquent que les concentrations à l'échelle du globe de CFC ont considérablement augmenté entre les années 70 et les années 90, de telle sorte que leur participation au forçage radiatif s'est accrue essentiellement au cours de cette période alors que c'est maintenant au tour des concentrations des produits de substitution d'augmenter. Le HCFC-22 est le plus abondant de sa famille avec une concentration actuelle de 160 ppt. Cette concentration a commencé à augmenter au début des années 70, à l'instar de celle des CFC, alors que les concentrations des autres HCFC notables n'ont débuté leur progression que dans les années 90, comme celles des HFC. [1.2, 2.3]

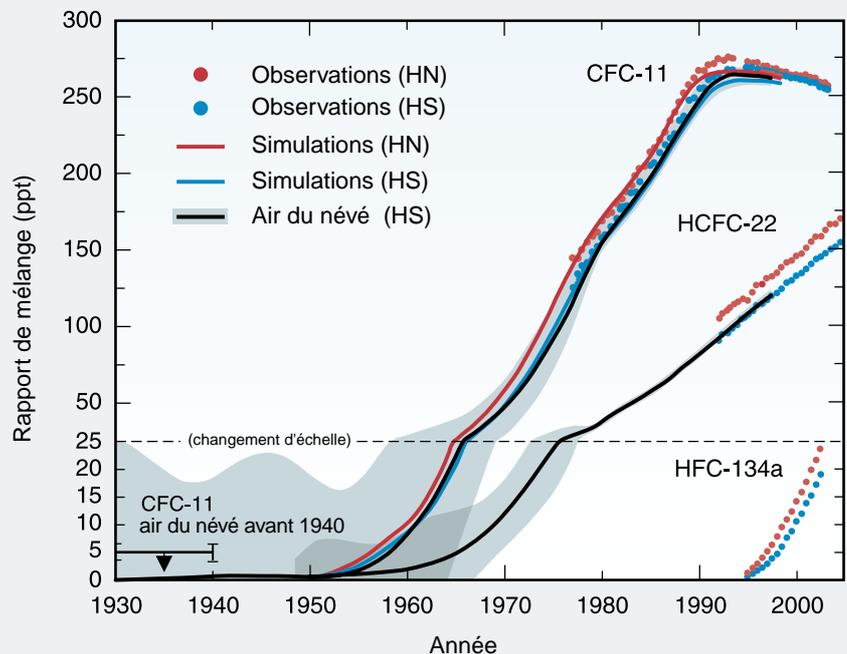
Les taux de variation actuellement enregistrés diffèrent entre les SAO, essentiellement en fonction de leurs émissions et de leur durée de vie dans l'atmosphère (voir le tableau RT-2). Suite au Protocole de Montréal et à ses divers amendements, la production et les émissions de SAO ont considérablement baissé. Les concentrations de certains CFC ont pris leur envol tandis que celles d'autres devraient diminuer dans l'avenir.

En cas d'absence complète d'émissions, ces concentrations diminueraient mais à un très faible rythme du fait de leur durée de vie atmosphérique de plusieurs décennies, voire plusieurs siècles. La poursuite des émissions entraînerait l'augmentation des concentrations ou le ralentissement de la diminution. Les observations des variations annuelles des concentrations atmosphériques fournissent des estimations très fiables des émissions planétaires des gaz les plus résistants. Par exemple, il a été observé une diminution du CFC-11 60 % plus lente qu'en l'absence d'émissions, tandis que le CFC-12 augmente toujours légèrement, ce qui indique qu'il y a toujours émission de ces deux gaz. À l'inverse, le CFC-113 diminue à un rythme proche de celui estimé en l'absence d'émissions. Le tableau RT-2 indique les concentrations globales observées et les taux de croissance ou de diminution des plus importants CFC, halons, HCFC, HFC et PFC, mis en parallèle avec les émissions mondiales dans l'atmosphère, nécessaires pour expliquer ces tendances. [2.3, 2.5]

Pour comparaison, les estimations antérieures des émissions (OMM, 2003)<sup>10</sup> sont indiquées pour l'année 1990, soit juste après le pic dans les émissions de SAO. Les émissions de CFC-113 et  $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ , deux matières très largement utilisées comme solvants et dont il n'existe pas de stocks d'accumulation, ont été divisées par plus de 10 entre 1990 et 2000. Les niveaux de chlorure dans la stratosphère sont presque stabilisés et pourraient avoir déjà amorcé une baisse. [2.3]

Les estimations des émissions actuelles de CFC-11 et CFC-12 indiquées dans le tableau RT-2 sont supérieures à celles de la nouvelle production, ce qui indique qu'une partie substantielle

**Figure RT-3.** Estimations des rapports de mélanges troposphériques mondiaux (ppt) de CFC-11, HCFC-22 et HFC-134a, présentés séparément pour les deux hémisphères Nord et Sud. Les symboles en rouge et bleu indiquent les mesures des réseaux AGAGE (*Advanced Global Atmospheric Gases Experiment*) et CMDL (*Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory*), tandis que les lignes en rouge et bleu représentent les simulations des concentrations de CFC-11, extrapolées des estimations d'émission et de durée de vie dans l'atmosphère. Les lignes noires et les zones grisées représentent l'écart entre estimations et incertitudes pour le CFC-11 et le HCFC-22, dérivées de l'inversion de la synthèse des mesures de l'air du névé de l'Antarctique et des mesures atmosphériques *in situ* du Cap Grim. La grosse ligne noire horizontale avec la barre fléchée et la barre d'erreur indique une autre limite supérieure d'estimation des concentrations de CFC-11 avant 1940, fondée sur les mesures de l'air du névé au pôle Sud. À noter que les gaz présentés ici servent dans diverses applications et ne sont représentés qu'à titre d'illustration. [Figure 1.8]



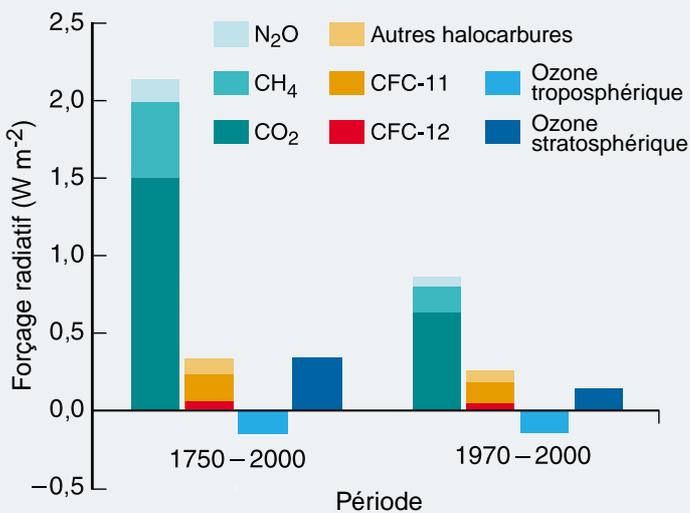
<sup>10</sup> OMM, 2003: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002. Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 47*, Organisation météorologique mondiale, Genève, 498 pages.

**Tableau RT-2.** Concentrations observées à l'échelle mondiale et tendances de certains des plus abondants CFC, HCFC, HFC et PFC autour de 2003, mises en parallèle avec les émissions mondiales nécessaires pour expliquer ces tendances. Pour comparaison, les émissions estimées sont indiquées pour l'année 1990, peu après le pic d'émissions totales de SAO. Voir la section 2.3, notamment le tableau 2.1 et la figure 2.4 à ce sujet.

Type	Concentration en 2003 <sup>a</sup> (ppt)	Tendance entre 2001 et 2003 <sup>a</sup> (ppt/an)	Tendance en % de la concentration %	Émissions estimées en 2002 <sup>b</sup> (kt/an) (Gt éqCO <sub>2</sub> /an) <sup>d</sup>		Émissions estimées en 1990 <sup>c</sup> (kt/an) (Gt éqCO <sub>2</sub> /an) <sup>d</sup>	
CFC-11	256	- 1,9 – - 2,7	- 0,7 – - 1,1	70 – 90	0,33 – 0,42	280 – 300	1,31 – 1,40
CFC-12	538	+ 0,2 – + 0,8	+ 0,04 – + 0,16	110 – 130	1,2 – 1,4	400 – 430	4,29 – 4,61
CFC-113	80	- 0,6 – - 0,7	- 0,8 – - 1,0	5 – 12	0,03 – 0,07	180 – 230	1,09 – 1,39
<b>Total des plus importants CFC</b>				<b>185 – 232</b>	<b>1,54 – 1,89</b>	<b>860 – 960</b>	<b>6,68 – 7,40</b>
HCFC-22	157	+ 4,5 – + 5,4	+ 2,8 – + 3,4	240 – 260	0,43 – 0,46	185 – 205	0,33 – 0,36
HCFC-123	0,03	0	0	n.d. <sup>e</sup>		0	0
HCFC-141b	16	+ 1,0 – + 1,2	+ 6,3 – + 7,5	55 – 58	0,04	0	0
HCFC-142b	14	+ 0,7 – + 0,8	+ 4,3 – + 5,7	25	0,06	10 – 20	0,02 – 0,05
<b>Total des plus importants HCFC</b>				<b>320 – 343</b>	<b>0,53 – 0,56</b>	<b>195 – 225</b>	<b>0,35 – 0,41</b>
HFC-23	17,5	+ 0,58	+ 3,3	13	0,19	6,4	0,09
HFC-125	2,7	+ 0,46	+ 17	9 – 10	0,03	0	0
HFC-134a	26	+ 3,8 – + 4,1	+ 15 – + 16	96 – 98	0,14	0	0
HFC-152a	2,6	+ 0,34	+ 13	21 – 22	0,003	0	0
<b>Total des plus importants HFC</b>				<b>139 – 143</b>	<b>0,36</b>	<b>6,4</b>	<b>0,09</b>
Halon-1211	4,3	+ 0,04 – + 0,09	+ 0,9 – + 2,8	7 – 8	0,013 – 0,015	11,5	0,02
Halon-1301	2,9	+ 0,04 – + 0,08	+ 1,4 – + 2,8	1 – 2	0,007 – 0,014	5,1	0,04
CCl <sub>4</sub>	95	- 0,9 – - 1,0	- 1,0 – - 1,1	64 – 76	0,09 – 0,10	120 – 130	0,17 – 0,18
CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	27	- 5,6 – - 5,8	- 21 – - 23	15 – 17	0,002	646	0,09
CF <sub>4</sub>	76	n.d. <sup>e</sup>	n.d. <sup>e</sup>				
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	2,9	+ 0,1	+ 3,4	n.d. <sup>e</sup>			
C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	0,26	n.d. <sup>e</sup>	n.d. <sup>e</sup>				

Notes :

- <sup>a</sup> Moyenne des concentrations troposphériques et fourchette des tendances provenant de plusieurs réseaux de surveillance.  
<sup>b</sup> Estimations tirées des concentrations et tendances actuelles.  
<sup>c</sup> Émissions estimées pour 1990 à partir du chapitre 2, figure 2.4, hormis pour le HFC-23 qui découle du chapitre 10.  
<sup>d</sup> Émissions pondérées en fonction des potentiels de réchauffement global issus de ce rapport.  
<sup>e</sup> n.d. – non disponible. Les données sont insuffisantes pour déterminer une tendance ou une valeur d'émission fiable.



**Figure RT-4.** Forçage radiatif ( $\text{W m}^{-2}$ ) lié aux changements dans les gaz à effet de serre bien mélangés et l'ozone pendant les périodes allant de 1750 à 2000 et de 1970 à 2000. Le forçage radiatif négatif de l'ozone stratosphérique est dû à l'appauvrissement de ce dernier à cause des émissions d'halocarbures entre 1970 et 2000. Le forçage radiatif de l'ozone troposphérique est lui largement indépendant des halocarbures. [Figure 1.3]

pics dans les émissions européennes de HFC-134a sur la période 1995 – 1998 et de HFC-152a sur la période 1996 – 2000, suivie par une chute jusqu'en 2003. [2.3]

## 2.4 Dans quelle mesure les halocarbures gazeux et leurs substituts contribuent-ils au forçage radiatif positif du système climatique lié à la période préindustrielle? Et aux années 70?

Les différentes contributions au forçage radiatif direct dû à l'augmentation des concentrations d'halocarbures entre 1750 et 2000 et entre 1970 et 2000 sont résumées dans le tableau RT-1 et la figure RT-4. Le forçage radiatif direct dû à cette augmentation entre 1750 et 2000 est évalué à  $0,33 \pm 0,03 \text{ W m}^{-2}$ , ce qui représente environ 13 % du total dû aux augmentations des concentrations de tous les gaz à effet de serre, bien mélangés, sur cette période. Les contributions respectives des CFC, HCFC et HFC s'élèvent environ à 0,27, 0,033 et  $0,006 \text{ W m}^{-2}$ . [1.1 et 1.5]

Comme l'augmentation des concentrations d'halocarbures s'est produite essentiellement au cours des trois dernières décennies, leur contribution relative au forçage radiatif total est plus importante sur cette période. Ainsi, le forçage direct lié à ces augmentations entre 1970 et 2000 est de  $0,27 \pm 0,03 \text{ W m}^{-2}$ , ce qui représente environ 23 % de celui dû aux augmentations de tous les autres GES bien mélangés. La contribution au forçage radiatif direct dû aux HCFC est actuellement dominée par le HCFC-22, tandis que la contribution au forçage radiatif direct dû aux HFC l'est par le HFC-134a et le HFC-23, ce dernier résultant principalement de la production de HCFC-22. [1.1, 1.5]

## 2.5 Quelle a été l'évolution de l'ozone stratosphérique au cours des dernières décennies? Quelles en sont les causes?

Comme le montre la figure RT-5, le volume de l'ozone stratosphérique a diminué au cours des dernières décennies, surtout au-dessus de l'Antarctique. Le plus fort de cet appauvrissement a été observé depuis 1980 au-dessus de l'Antarctique au printemps (*trou d'ozone austral*), avec des volumes mensuels totaux de la *colonne d'ozone* inférieurs de 40–50 % en septembre et octobre par rapport aux valeurs avant le trou. [1.2, 1.3 et 1.4]

Le trou d'ozone boréal sur une année donnée dépend énormément des conditions météorologiques. L'ozone arctique s'est ainsi appauvri chimiquement jusqu'à 30 % dans les dernières années froides, alors que les pertes observées les années chaudes sont minimales. À l'échelle du globe, l'ozone a diminué en moyenne de 3 % depuis 1980. La colonne a diminué d'environ 6 % dans les latitudes intermédiaires ( $35^\circ - 60^\circ$ ) de l'hémisphère Sud et de 3 % dans l'hémisphère Nord. Aucun changement notable à long terme de cette colonne n'a été observé dans les zones tropicales. Les observations et les calculs des modèles suggèrent que l'appauvrissement planétaire

de ces émissions provient des stocks de ces produits, constitués à partir de la production passée. Ces stocks couvrent la matière contenue dans les mousses, les systèmes de climatisation et de réfrigération et les autres applications. À l'inverse, la production est actuellement supérieure aux émissions de quasiment tous les HCFC et HFC, ce qui implique que des stocks de ces produits sont en train de se constituer et pourraient contribuer au forçage radiatif futur. Une mesure de l'importance de ces stocks est le rapport entre la taille du stock et le volume déjà dans l'atmosphère. Par exemple, dans le cas du HFC-134a, on estime que ces valeurs sont à peu près égales. [2.3, 2.5 et 11.3]

L'observation continue des CFC et autres SAO dans l'atmosphère permet désormais une meilleure validation des estimations sur l'intervalle entre la production et les émissions dans l'atmosphère. Cela procure un nouvel angle de vue sur l'importance des stocks globaux et des options de fin de vie appropriées pour l'utilisation à venir des substituts de HCFC et HFC. [2.5]

Pour certains gaz, on dispose aujourd'hui de suffisamment d'observations atmosphériques pour limiter les émissions non seulement mondiales, mais également régionales dans certaines zones. Ainsi, des mesures atmosphériques révèlent des

de la couche d'ozone est désormais quasi stabilisé (voir la figure RT-5). [1.2]

Les modifications constatées sont provoquées à la fois par des facteurs chimiques et dynamiques, les premiers étant les plus importants. L'appauvrissement de la couche d'ozone est principalement causé par l'augmentation des concentrations de composés réactifs à base de chlore et de brome, produits par la dégradation des SAO anthropiques, dont les halons, les CFC, les HCFC, le méthylchloroforme ( $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ ), le tétrachlorure de

carbone ( $\text{CCl}_4$ ) et le bromure de méthyle ( $\text{CH}_3\text{Br}$ ). Par rapport aux niveaux initiaux naturels estimés, les activités humaines ont quintuplé le volume de chlore dans la stratosphère depuis 1970. Les CFC sont la principale source de cette évolution, tandis que les HCFC concourent actuellement à environ 5 % de la montée en charge du chlore dans la stratosphère. [1.2, 1.3 et 1.4]

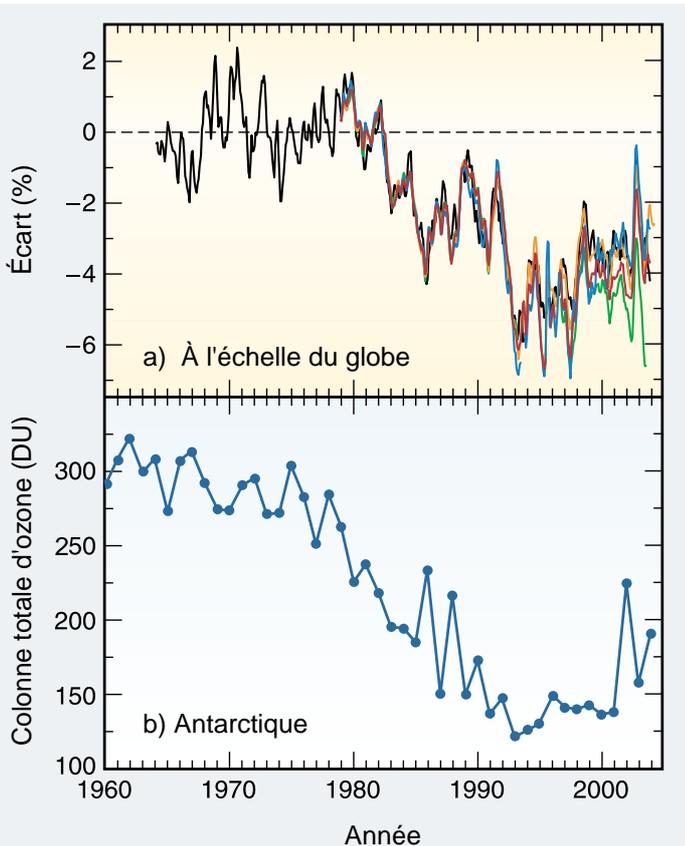
## 2.6 De quelle manière l'appauvrissement de la couche d'ozone a-t-il affecté le forçage radiatif du système climatique?

Les observations et la modélisation montrent que l'appauvrissement de la couche d'ozone a favorisé le refroidissement de la stratosphère qui, à son tour, a favorisé celui de la troposphère et de la surface. Le réchauffement de la planète par les SAO et le refroidissement lié à l'appauvrissement de l'ozone sont deux mécanismes distincts, régis par des processus physiques et des rétroactions différents, et pour lesquels il existe des niveaux assez différents de compréhension scientifique. Dans le cadre de ce rapport, nous suivons les travaux du GIEC de 2001<sup>11</sup> et partons du principe que l'appauvrissement constaté est entièrement dû aux SAO et que le forçage radiatif de l'ozone peut être considéré comme un effet indirect de ces SAO. Les gaz contenant du brome (comme les halons) sont particulièrement nocifs pour la couche d'ozone et contribuent plus largement à l'effet indirect par molécule que les autres gaz nocifs tels que les CFC. [1.1, 1.2, 1.3 et 1.5]

La meilleure estimation du forçage radiatif négatif indirect associé à l'appauvrissement de l'ozone entre 1970 et 2000 est de  $-0,15 \pm 0,10 \text{ W m}^{-2}$  – l'ampleur de l'incertitude est déterminée par la palette d'estimations modélisées et est essentiellement liée aux doutes existants sur la répartition verticale précise de l'appauvrissement. Cet effet indirect devrait *très probablement*<sup>12</sup> être moins important en magnitude que le forçage radiatif direct positif lié aux seuls SAO ( $0,32 \pm 0,03 \text{ W m}^{-2}$ ), et qui est bien mieux compris. Si une partie de l'évolution de l'ozone observée au niveau mondial n'était pas imputable aux SAO, la magnitude de cet effet indirect serait réduite. [1.5]

La contribution relative des différents types de gaz sur le forçage positif direct et négatif indirect est indiquée dans la figure RT-6. Cependant, les effets du réchauffement et du refroidissement produits par le forçage radiatif direct ou indirect ne se compensent pas mutuellement car les répartitions spatiale et saisonnière de ces effets sur le climat en surface diffèrent. [1.2, 1.5 et encadré 1.4]

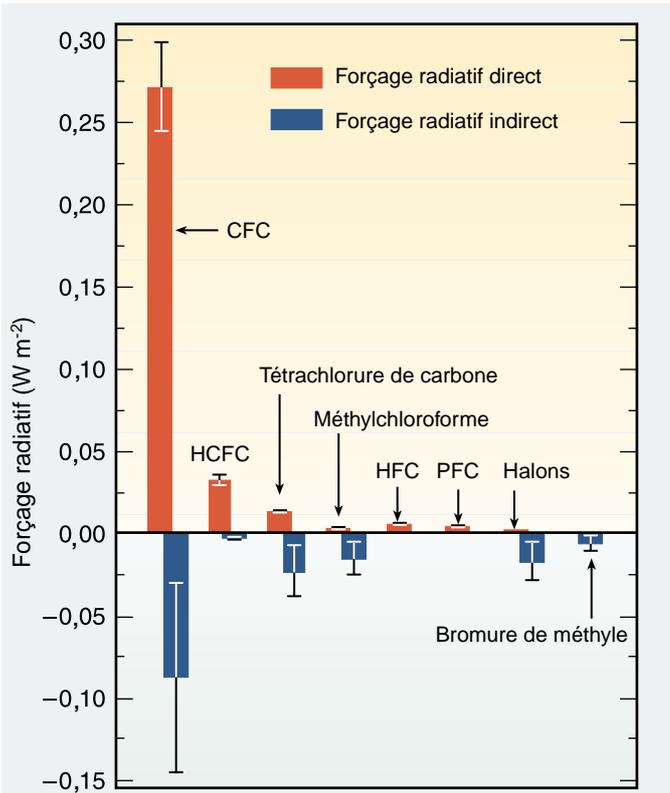
Un petit nombre d'études statistiques et de modélisation du climat mondial suggèrent que l'appauvrissement de l'ozone est un mécanisme qui peut affecter les modèles de **variabilité climatique**, importants pour la circulation et les températures troposphériques dans les deux hémisphères. En particulier, l'appauvrissement notable de l'ozone stratosphérique qui a



**Figure RT-5.** Partie supérieure: série chronologique des anomalies de la colonne d'ozone, en moyenne mondiale, corrigées des variations saisonnières, extrapolées de cinq sources de données différentes à partir des mesures terrestres (ligne noire) et par satellite (lignes en couleur). Les anomalies sont exprimées en pourcentage de la moyenne calculée pour la période 1964 – 1980. Partie inférieure: mesures moyennes de la colonne totale d'ozone en octobre, extraites du spectrophotomètre de Dobson à Halley, Antarctique (73,5 °S – 26,7 °O). [Figures 1.4 et 1.5]

<sup>11</sup> GIEC (2001), *Climate Change 2001: The Scientific Basis* (Bilan 2001 des changements climatiques: Les éléments scientifiques). Contribution du Groupe de travail I au troisième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, [Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, et C. A. Johnson (éd.)]. Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni) et New York (États-Unis d'Amérique), 944 pages.

<sup>12</sup> Dans ce rapport, les termes ci-après sont utilisés pour donner une idée de la confiance que l'on peut accorder aux estimations proposées: *très probable* [ment] (probabilité entre 90 et 99 %); *probable* [ment] (entre 66 et 90 %); *improbable* [ment] (entre 10 et 33 %); et *très improbable* [ment] (entre 1 et 10 %).

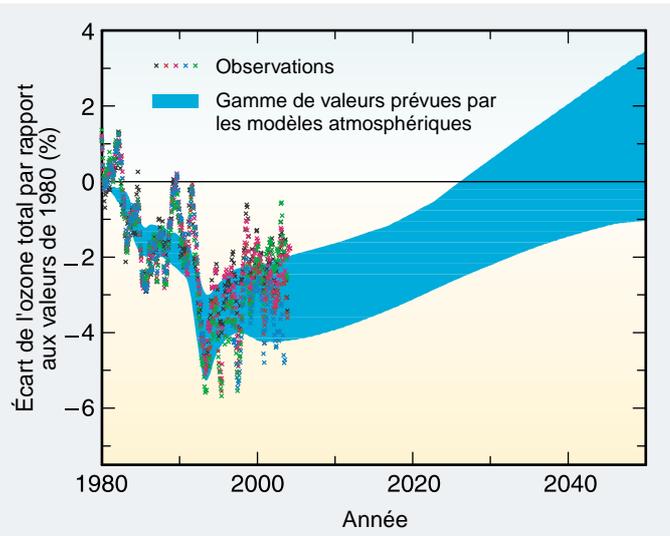


**Figure RT-6.** Forçage radiatif dû aux changements dans les halocarbures de 1750 à 2000. [Voir le tableau 1.1]

lieu dans la région antarctique a *probablement* affecté la circulation stratosphérique et, par conséquent, la troposphère. Certaines indications montreraient que le trou d’ozone austral a contribué au refroidissement observé sur le plateau antarctique et au réchauffement dans la région péninsulaire du continent. [1.3]

## 2.7 Quels sont les facteurs qui permettraient de contrôler l’ozone dans le siècle à venir? Peut-on «restaurer» les valeurs d’avant le trou? Cette récupération a-t-elle déjà commencé?

La reconstitution de la couche d’ozone devrait suivre la diminution des charges de chlore et de brome dans la stratosphère au fur et à mesure du déclin des concentrations en SAO dû à la réduction de leurs émissions. Alors qu’on estime qu’il s’agit du facteur dominant dans la reconstitution de l’ozone, les émissions d’autres GES (comme le CO<sub>2</sub>, le méthane et l’oxyde nitreux) peuvent affecter la chimie de l’atmosphère et le climat tant au niveau de la troposphère qu’à celui de la stratosphère et auront un certain impact sur la restauration de l’ozone. [1.3 et 1.4]



**Figure RT-7.** Changements observés et modélisés de la colonne d’ozone en latitude moyenne et basse (60 °S – 60 °N) en 1980, corrigés des variations saisonnières. Les symboles en noir représentent les mesures terrestres et ceux en couleur les différentes mesures par satellite. La gamme des valeurs prévues par les modèles résulte de l’utilisation de plusieurs modèles bidimensionnels de la photochimie induits dans le même scénario des halocarbures. Certains modèles ont également permis d’extrapoler les effets des changements dans le volume de CO<sub>2</sub> sur les températures stratosphériques. Les mesures indiquent que les valeurs de la colonne d’ozone entre 60 °S et 60 °N ont diminué au début des années 80 et les modèles saisissent plutôt bien la durée et l’étendue de cette diminution. Les concentrations d’halogènes modélisées diminuent au début du XXI<sup>e</sup> siècle en réponse au Protocole de Montréal, de telle sorte que les valeurs d’ozone simulées augmentent et reviennent à leur niveau d’avant 1980. [Encadré 1.7]

La figure RT-7 présente une série de prévisions des changements dans l’ozone stratosphérique dans l’intervalle des latitudes de 60 °S – 60 °N, issues de modèles photochimiques à deux dimensions avec des mesures comparables prises au sol et par satellite jusqu’en 2003. Ces simulations par ordinateur démontrent que la restauration de l’ozone s’effectue graduellement, à mesure que les émissions et les concentrations d’halogènes déclinent. Cependant, le temps de restauration varie considérablement selon les hypothèses émises sur le climat futur et la composition de l’atmosphère, et reste donc assez incertain. [1.4 et encadré 1.7]

Les futurs changements de température liés aux émissions de GES devraient accroître l’appauvrissement de l’ozone dans certaines zones de la stratosphère et le réduire dans d’autres. Les augmentations de la concentration en CO<sub>2</sub> devraient refroidir la stratosphère, ce qui réduit notablement le taux de destruction de l’ozone en phase gazeuse dans la plus grande partie de la stratosphère, et donc augmente les concentrations d’ozone en altitudes au-dessus de 25 km. À l’opposé, des températures

plus basses pourraient diminuer les concentrations d'ozone à des altitudes moins élevées. Tandis que ce dernier effet atteindrait son apogée en Arctique à la fin de l'hiver et au début du printemps, il peut être faible par rapport aux autres processus et va décroître lentement au fur et à mesure que les charges de chlore et de brome diminuent. Les changements dans la circulation stratosphérique sont également liés à l'augmentation des GES et pourraient aussi bien faire augmenter que diminuer l'ozone polaire et des latitudes tempérées. Le résultat net des futures émissions de GES sur l'ozone planétaire dépend d'une combinaison de ces effets dont la magnitude et l'orientation ne sont que faiblement quantifiées à l'heure actuelle. [1.3 et 1.4]

Comme l'illustrent les mesures de la figure RT-7, les premiers signes d'une reconstitution de l'ozone sont difficiles à percevoir compte tenu de la haute variabilité des niveaux d'ozone. Cette variabilité est due à la fois à celle de la météorologie et à l'influence ambiguë des éruptions volcaniques sur la couche d'ozone. En conséquence, il est encore impossible de statuer sans équivoque sur le démarrage d'une reconstitution. [1.2, 1.4 et encadré 1.7]

Les modèles suggèrent que l'ozone antarctique a déjà atteint ou devrait atteindre dans les prochaines années ses niveaux les plus faibles. Les mêmes projections pour la zone arctique sont plus incertaines compte tenu de la plus grande variabilité naturelle dans cette région, mais les modèles suggèrent que cela arrivera dans les deux prochaines décennies. Un trou d'ozone boréal de même importance que celui observé au-dessus de l'Antarctique est cependant *très improbable*. [1.3 et 1.4]

## 2.8 Dans quelle mesure les CFC, les HCFC et leurs substituts possibles devraient-ils affecter le futur forçage radiatif du système climatique?

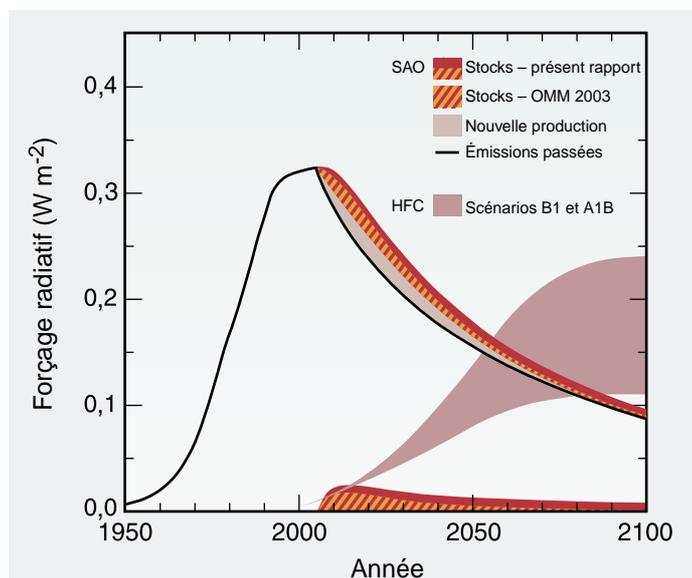
Le forçage radiatif estimé des HFC en 2015 se situerait entre 0,022 et 0,025  $W m^{-2}$  selon les scénarios du RSSE (Rapport spécial sur les scénarios d'émission) et entre 0,019 et 0,030  $W m^{-2}$  selon les scénarios extraits du chapitre 11 de ce rapport. Le forçage radiatif des PFC en 2015 avoisinerait 0,006  $W m^{-2}$  selon les scénarios du RSSE. Ceux des HFC et PFC correspondraient respectivement à 6 – 10 % et 2 % du forçage total estimé dû aux CFC et aux HCFC en 2015 (de l'ordre de 0,297  $W m^{-2}$  pour le scénario de référence). [2.5 et 11.5]

Ces projections conditionnelles du futur forçage radiatif sont indiquées dans la figure RT-8. À plus long terme, on passe de la projection à la conjecture, du fait de l'importance croissante de certaines incertitudes quant aux pratiques et stratégies technologiques à venir. Cependant, la contribution des HFC devrait être de l'ordre de 0,1 à 0,25  $W m^{-2}$  en 2100 selon les scénarios du RSSE, tandis que celle des PFC se situerait entre 0,02 et 0,04 pour la même époque. [1.5 et 2.5]

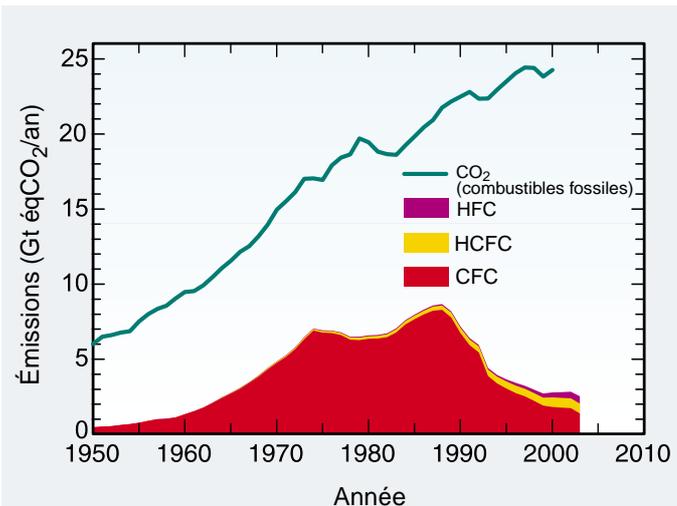
La figure RT-8 montre les estimations des diverses contributions sur le forçage radiatif des halocarbures issues: des anciennes émissions (déjà dans l'atmosphère); des futures émissions de la

nouvelle production, en supposant la poursuite des pratiques actuelles (selon le scénario Ab de l'OMM); et des émissions des stocks actuels d'halocarbures. Deux estimations différentes de ce dernier composant sont illustrées, l'une fondée sur l'évaluation de l'ozone par l'OMM en 2003 et l'autre sur les dernières sections du présent rapport. Bien que l'ampleur des stocks actuels de SAO ne soit pas clairement connue, leur contribution au forçage radiatif est estimée comparable à celle des émissions de HFC dans l'atmosphère dans les prochaines décennies. Cela indique que les choix liés aux options de fin de vie, comme la destruction des matières actuellement stockées, peuvent procurer des avantages importants pour le système climatique. Les pratiques de récupération, recyclage et destruction pourraient également réduire les émissions de tous les halocarbures nouvellement produits et leur contribution au forçage radiatif illustré à la figure RT-8. [1.5]

Outre la réduction de la charge de chlore dans l'atmosphère, le Protocole de Montréal et ses ajustements et amendements ultérieurs ont déclenché une série de mesures visant à la réduction des émissions totales en équivalent  $CO_2$ . Cela est dû au fait



**Figure RT-8.** Forçage radiatif direct de toutes les SAO, comparé à celui des projections du RSSE pour les HFC. Le forçage radiatif direct se répartit en contributions provenant des émissions passées (ligne noire continue), de la libération des nouvelles productions autorisées dans le cadre du Protocole de Montréal (zone grisée) et de la libération provenant des stocks de SAO existants en 2004. Deux estimations sont données pour ces dernières émissions (voir le chapitre 2). Le forçage radiatif dû aux HFC est illustré pour les scénarios B1 et A1B du RSSE (limites de la zone hachurée en rouge). La contribution due à la libération retardée des SAO en stock est représentée à part. Elle est comparable à celle projetée, due aux HFC, dans les deux prochaines décennies. Les SAO ont d'autres effets indirects sur le forçage radiatif. [Figure 1.19]



**Figure RT-9.** Émissions directes pondérées par l'effet de serre (horizon = 100 ans) des CFC, HCFC et HFC comparées avec les émissions totales de CO<sub>2</sub> dues à la consommation des combustibles fossiles et la production de ciment. [Figure 2.11]

que les substituts ont généralement de plus faibles **potentiels de réchauffement global** (PRG) et que les émissions totales d'halocarbures ont diminué. Cette réduction est visible lorsqu'on compare les émissions entre 1990 et 2000 (tableau RT-2) et de façon plus générale sur la figure RT-9. Donc, les émissions combinées en équivalent CO<sub>2</sub> des CFC, HCFC et HFC ont diminué, passant de leur pic de  $7,5 \pm 0,4$  Gt éqCO<sub>2</sub>/an autour de 1990 à  $2,5 \pm 0,2$  Gt éqCO<sub>2</sub>/an vers 2000, ce qui correspond à environ 10 % de la contribution annuelle due à la combustion mondiale de carburants fossiles cette année-là. [2.3 et 2.5]

L'ammoniac et les hydrocarbures utilisés comme substituts des halocarbures ont des durées de vie allant de quelques jours à quelques mois. D'autre part, les forçages radiatifs direct et indirect associés à leur utilisation comme substituts ont *très probablement* un impact négligeable sur le climat mondial.

## 2.9 Que représente le potentiel de réchauffement global et à quoi sert-il?

Le PRG est un indice de l'effet radiatif futur d'une substance, lié aux émissions du même volume de CO<sub>2</sub> intégré sur le même horizon temporel. La valeur du PRG d'une matière donnée est proportionnelle à son rendement radiatif et augmente avec sa durée de vie dans l'atmosphère. Le PRG est

généralement utile en tant que mesure de la réponse climatique au forçage radiatif direct de GES bien mélangés dont la durée de vie dans l'atmosphère est contrôlée par des processus similaires, ce qui inclut la plupart des halocarbures. [2.5 et encadré 2.4]

Le choix de l'horizon temporel est une question politique. Il émane d'un compromis entre l'importance accordée aux effets à court et à long terme. Dans la pratique actuelle, la plupart des PRG sont calculés à 100 ans. Cela ne tient pas compte de l'effet complet des gaz à très longue durée de vie ayant un rendement radiatif élevé, comme les PFC, qui perdurent dans l'atmosphère bien au-delà de ces 100 ans. De la même manière, l'intégration au-delà de 100 ans réduit la contribution des matières plus volatiles qui ne durent qu'une faible fraction de cette période, par rapport à celle du CO<sub>2</sub> qui concoure au forçage radiatif pour toute cette période et même au-delà. [2.5]

Les valeurs du PRG direct sont indiquées dans le tableau RT-3. Elles ont été modifiées dans le troisième Rapport d'évaluation du GIEC en 2001 par rapport à la version précédente de 1996<sup>13</sup> pour tenir compte des corrections du rendement radiatif du CO<sub>2</sub>, d'une part, et de la durée de vie et du rendement radiatif d'autres matières, d'autre part. Les ajustements des valeurs fournies pour certaines matières dans ce rapport sont essentiellement dus à l'actualisation des durées de vie. Voir la section 2.5.4. [2.5]

Les potentiels indirects associés à l'appauvrissement de la couche d'ozone causé par les différentes SAO sont indiqués dans le tableau RT-3. Les effets de refroidissement indirects des SAO devraient cesser avec la reconstitution de la couche d'ozone, leur durée de vie dépendant non seulement de celle du gaz en soit, mais également de la durée de cette reconstitution. Les estimations de ces potentiels indirects englobent cette dépendance en gommant tous les effets indirects à partir du moment où l'équivalent chlore stratosphérique effectif sera revenu à son niveau d'avant 1980. Ces potentiels indirects dépendent donc de l'année d'émission et sont soumis à d'importantes contingences provenant: de l'incertitude dans le forçage radiatif causé par l'appauvrissement de la couche d'ozone, de l'incertitude dans les volumes d'équivalent chlore stratosphérique effectif attribués à chaque matière, et enfin de l'incertitude quant à la date à laquelle on aura retrouvé les valeurs d'avant 1980. [1.5 et 2.5]

Compte tenu des niveaux très différents de compréhension scientifique et des incertitudes relatives associées aux forçages radiatifs direct et indirect des SAO, de l'absence d'annulation de leurs effets sur le climat en surface et de la dépendance entre les PRG indirects et l'année d'émission, le présent rapport ne tient pas compte des indices PRG nets, associant effets directs et indirects. Lorsque les PRG directs sont utilisés en parallèle des émissions de SAO ou pour établir des valeurs en équivalent CO<sub>2</sub>, il convient de reconnaître qu'il existe également des effets indirects susceptibles de jouer un rôle notable dans les décennies à venir. [1.2, 1.5, encadré 1.4 et 2.5]

<sup>13</sup> GIEC (1996), *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Contribution du Groupe de travail I au deuxième Rapport d'évaluation du GIEC [Houghton, J. T., L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg et K. Maskell (éd.)], Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni) et New York (États-Unis d'Amérique), 572 pages.

**Tableau RT-3.** Potentiel de réchauffement global (PRG) des halocarbures régis par le Protocole de Montréal et par la CCNUCC et son Protocole de Kyoto (évalués dans le rapport en relation avec le CO<sub>2</sub> à un horizon de 100 ans), avec leur durée de vie et le potentiel de réchauffement de la planète (PRP) utilisé par la CCNUCC. Les gaz sur fond bleu (foncé) relèvent du Protocole de Montréal, les gaz sur fond jaune (clair) de la CCNUCC. [Tableaux 2.6 et 2.7]

Gaz	PRG, forçage radiatif direct <sup>a</sup>	PRG, forçage radiatif indirect (émissions en 2005 <sup>b</sup> )	Durée de vie (années)	PRP CCNUCC <sup>c</sup>
<b>CFC</b>				
CFC-12	10 720 ± 3 750	-1 920 ± 1 630	100	n.d. <sup>d</sup>
CFC-114	9 880 ± 3 460	Non disponible	300	n.d. <sup>d</sup>
CFC-115	7 250 ± 2 540	Non disponible	1 700	n.d. <sup>d</sup>
CFC-113	6 030 ± 2 110	-2 250 ± 1 890	85	n.d. <sup>d</sup>
CFC-11	4 680 ± 1 640	-3 420 ± 2 710	45	n.d. <sup>d</sup>
<b>HCFC</b>				
HCFC-142b	2 270 ± 800	-337 ± 237	17,9	n.d. <sup>d</sup>
HCFC-22	1 780 ± 620	-269 ± 183	12	n.d. <sup>d</sup>
HCFC-141b	713 ± 250	-631 ± 424	9,3	n.d. <sup>d</sup>
HCFC-124	599 ± 210	-114 ± 76	5,8	n.d. <sup>d</sup>
HCFC-225cb	586 ± 205	-148 ± 98	5,8	n.d. <sup>d</sup>
HCFC-225ca	120 ± 42	-91 ± 60	1,9	n.d. <sup>d</sup>
HCFC-123	76 ± 27	-82 ± 55	1,3	n.d. <sup>d</sup>
<b>HFC</b>				
HFC-23	14 310 ± 5 000	~0	270	11 700
HFC-143a	4 400 ± 1 540	~0	52	3 800
HFC-125	3 450 ± 1 210	~0	29	2 800
HFC-227ea	3 140 ± 1 100	~0	34,2	2 900
HFC-43-10mee	1 610 ± 560	~0	15,9	1 300
HFC-134a	1 410 ± 490	~0	14	1 300
HFC-245fa	1 020 ± 360	~0	7,6	- <sup>e</sup>
HFC-365mfc	782 ± 270	~0	8,6	- <sup>e</sup>
HFC-32	670 ± 240	~0	4,9	650
HFC-152a	122 ± 43	~0	1,4	140
<b>PFC</b>				
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	12 010 ± 4 200	~0	10 000	9 200
C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>	9 140 ± 3 200	~0	3 200	7 400
CF <sub>4</sub>	5 820 ± 2 040	~0	50 000	6 500
<b>Halons</b>				
Halon-1301	7 030 ± 2 460	-32 900 ± 27 100	65	n.d. <sup>d</sup>
Halon-1211	1 860 ± 650	-28 200 ± 19 600	16	n.d. <sup>d</sup>
Halon-2402	1 620 ± 570	-43 100 ± 30 800	20	n.d. <sup>d</sup>
<b>Autres halocarbures</b>				
Tétrachlorure de carbone (CCl <sub>4</sub> )	1 380 ± 480	-3 330 ± 2 460	26	n.d. <sup>d</sup>
Méthylchloroforme (CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> )	144 ± 50	-610 ± 407	5,0	n.d. <sup>d</sup>
Bromure de méthyle (CH <sub>3</sub> Br)	5 ± 2	-1 610 ± 1 070	0,7	n.d. <sup>d</sup>

Notes:

<sup>a</sup> Les incertitudes entourant le PRG, pour le forçage positif direct, sont estimées à ± 35 % (2 écarts types) (GIEC, 2001).

<sup>b</sup> Les incertitudes entourant le PRG, pour le forçage négatif indirect, tiennent compte de l'incertitude estimée quant à la durée de reconstitution de la couche d'ozone et de l'incertitude visant le forçage négatif dû à l'appauvrissement de la couche d'ozone.

<sup>c</sup> Les directives générales de notification de la CCNUCC prescrivent d'utiliser les valeurs du potentiel de réchauffement planétaire présentées dans le deuxième Rapport d'évaluation du GIEC (voir FCCC/SBSTA/2004/8, <http://unfccc.int/resource/docs/french/sbsta/0408f.pdf>).

<sup>d</sup> Les SAO ne sont pas régies par la CCNUCC.

<sup>e</sup> Le deuxième Rapport d'évaluation du GIEC ne donne pas d'indice de PRG pour le HFC-245fa et le HFC-365mfc. Cependant, les directives de la CCNUCC renferment des dispositions quant à la notification de tous les gaz à effet de serre pour lesquels de tels indices ont été évalués par le GIEC.

### **2.10 Les HCFC, les HFC ou leurs substituts devraient-ils avoir d'autres effets sur la future chimie de l'environnement?**

Les émissions de gaz organiques (y compris les HCFC, HFC, PFC et hydrocarbures) et d'ammoniac liées au remplacement des SAO dans les secteurs de la réfrigération et de la climatisation ne devraient pas avoir d'impact de grande envergure sur la qualité de l'air. L'impact local des substituts aux hydrocarbures et à l'ammoniac peut être déterminé en comparant les émissions envisagées avec les émissions locales provenant de toutes les sources. Des impacts faibles mais non négligeables peuvent apparaître près des sources d'émission localisées et de telles augmentations doivent être prises au sérieux, notamment dans les régions qui ne respectent actuellement pas les normes en vigueur. [2.4 et 2.6]

Les produits de dégradation persistants des HFC et HCFC (comme l'acide trifluoroacétique ou TFA) sont éliminés de l'atmosphère par des processus de déposition et de lavage par la pluie alors que le TFA est toxique pour certaines espèces aquatiques quand sa concentration avoisine 1 mg/l. Cependant, la dégradation des sources identifiées ne peut pas expliquer l'abondance constatée du TFA dans les océans, les eaux de surface et l'atmosphère, ce qui démontre qu'il en existe de vastes sources naturelles. Selon les observations actuelles, les concentrations océaniques avoisinent 0,2 µg/l, alors que ce chiffre atteint 40 µg/l dans la mer Morte ou dans les lacs du Nevada, suggérant un possible lien avec la chimie du sel. Les calculs fondés sur les extrapolations des émissions de HCFC et HFC suggèrent que la concentration de TFA dans les eaux de pluie liée à la dégradation de ces matières se situerait entre 0,1 et 0,5 µg/l en 2010. Les études actuelles n'envisagent donc pas que l'utilisation des halocarburés puisse entraîner une augmentation telle que les seuils toxiques de 1 mg/l soient atteints. [2.4]

## 3. Solutions envisageables pour l'élimination des SAO et la réduction des émissions de GES

### 3.1 Où se situent les émissions de GES liées à l'utilisation des SAO et de leurs substituts?

Les substances nocives pour la couche d'ozone (SAO) et leurs substituts sont utilisés dans de nombreux produits et procédés. Beaucoup de ces substances (ou des sous-produits libérés au cours de leur fabrication) sont des gaz à effet de serre (GES), dont les émissions participent au forçage positif direct du climat. Les émissions directes de ces GES peuvent se produire au cours de la fabrication desdites substances, de leur utilisation dans des produits et procédés et en fin de vie des produits (voir la figure RT-1). Les stocks représentent le volume total de substances contenues dans les équipements existants, les dépôts chimiques, les mousses et autres produits, et qui n'ont pas encore été libérées dans l'atmosphère.

Les émissions indirectes à effet de serre des applications de SAO et de leurs substituts sont celles liées à la consommation d'énergie (carburants et électricité) pendant le cycle de vie complet de l'application<sup>7</sup>. Cet effet est différent du forçage radiatif négatif indirect des SAO, traité dans les sections précédentes.

La CCNUCC porte sur les émissions anthropiques par source et les retraits par piégeage de tous les gaz à effet de serre qui ne sont pas régis par le Protocole de Montréal. Le Protocole de Kyoto statue sur les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), de méthane (CH<sub>4</sub>), d'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), de HFC, de PFC et d'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>). Le Protocole de Montréal, de son côté, s'intéresse, non pas aux émissions, mais plutôt à la production et la consommation des SAO. Donc, les émissions liées aux libérations des CFC et HCFC présents dans les stocks (comme les systèmes de réfrigération ou les mousses) ne sont traitées ni par le Protocole de Montréal ni par la Convention sur le climat et le Protocole de Kyoto. Ces émissions pourraient cependant contribuer de manière significative au réchauffement de la planète.

### 3.2 De quelle manière les émissions et les stocks estimés devraient-ils se développer entre 2002 et 2015?

#### Stocks et émissions actuels

Les profils d'émission actuels des SAO et de leurs substituts sont largement déterminés par les modèles d'utilisation historiques, résultant en une contribution relativement élevée (aujourd'hui et dans les prochaines décennies) des CFC et HCFC stockés dans les équipements et les mousses. Les émissions annuelles de ces CFC, HCFC, HFC et PFC<sup>14</sup> avoisinaient 2,5 Gt éqCO<sub>2</sub> en 2002 (voir le tableau RT-4,<sup>15,16</sup>). Les applications de réfrigération ainsi que les systèmes de climatisation fixes ou mobiles contribuent à l'essentiel des émissions directes de GES. Environ 80 % des émissions de 2002 sont constituées par les CFC et les HCFC.

Les stocks contenus dans les équipements et les mousses peuvent fuir durant la phase d'exploitation, ainsi qu'en fin de vie des produits dont ils font partie (s'ils ne sont pas récupérés ou détruits). Le délai de remplacement varie considérablement en fonction de l'application: de quelques mois (solvants) à plusieurs années (applications de réfrigération), voire plusieurs décennies (mousses isolantes).

Les stocks de CFC, HCFC, HFC et PFC ont été estimés à environ 21 Gt éqCO<sub>2</sub> (2002). Les trois premiers contribuent environ à 16, 4 et 1 Gt éqCO<sub>2</sub> respectivement (voir le tableau RT-5), tandis que les stocks de PFC utilisés comme substituts contribuent pour environ 0,005 Gt éqCO<sub>2</sub> seulement. La constitution des stocks des applications (relativement) nouvelles de HFC déterminera de façon significative les émissions futures (> 2015) sans mesure supplémentaire de gestion des stocks.

<sup>14</sup> Cela concerne uniquement les émissions de HFC et PFC utilisés comme substituts des SAO. Les émissions totales de HFC et notamment de PFC sont supérieures car ces produits sont utilisés dans d'autres applications en dehors du champ d'investigation du présent rapport – comme les émissions provenant de la production d'aluminium ou des fonderies de semi-conducteurs.

<sup>15</sup> Les émissions à effet de serre et les stocks exprimés en équivalent CO<sub>2</sub> font référence au PRG du forçage radiatif direct sur les 100 prochaines années. Sauf indication contraire, les valeurs scientifiques les plus récentes des PRG sont utilisées, comme évaluées dans ce rapport et présentées dans le tableau RT-3.

<sup>16</sup> Dans le cas des halons, le forçage négatif indirect est beaucoup plus grand que le forçage positif direct. Par souci de clarté, les effets de cette catégorie de substances ne sont pas indiqués dans les estimations des émissions totales et des stocks exprimées en Mt d'équivalent CO<sub>2</sub>.

**Tableau RT-4.** Émissions annuelles à effet de serre en équivalent CO<sub>2</sub> des halons, CFC, HCFC et HFC ainsi que des PFC utilisés en remplacement des SAO, pondérées en fonction de leur PRG: ventilation par groupe de GES et par secteur d'émissions. Données d'archives pour 2002 et projections d'émissions pour 2015 selon un scénario de poursuite des activités et un scénario de réduction de l'exploitation de ces gaz. Le potentiel de réduction représente l'écart entre ces deux schémas.

Note: Les potentiels de réchauffement global direct à 100 ans proviennent du GIEC (2001) et de l'OMM (2003) (voir le tableau RT-3). Le «total» peut différer de la somme des valeurs, compte tenu des arrondis.

2002	Émissions annuelles (Mt éqCO <sub>2</sub> /an)								
	Réfrigération <sup>a</sup>	Climatisation fixe <sup>b</sup>	Climatisation mobile <sup>c</sup>	Mousses	Aérosols médicaux	Protection contre l'incendie	Sous-produit HFC-23	Autres <sup>d</sup>	Total
Halons <sup>e</sup>	-	-	-	-	-	[47] <sup>e</sup>	-	-	[47] <sup>e</sup>
CFC	726	99	641	117	69	0	-	0	1 651
HCFC	232	164	15	32	-	0,1	-	6	447
HFC	102	9	93	3	6	1	195	25	434
PFC	0	0	0	0	-	0,1	-	1	1
<b>Total<sup>e</sup></b>	<b>1 060</b>	<b>271</b>	<b>749</b>	<b>152</b>	<b>75</b>	<b>1</b>	<b>195</b>	<b>32</b>	<b>2 534</b>

Scénario de poursuite des activités jusqu'en 2015	Émissions annuelles (Mt éqCO <sub>2</sub> /an)								
	Réfrigération	Climatisation fixe	Climatisation mobile	Mousses	Aérosols médicaux	Protection contre l'incendie	Sous-produit HFC-23	Autres	Total
Halons	-	-	-	-	-	[12] <sup>e</sup>	-	-	[12] <sup>e</sup>
CFC	136	50	49	85	17	0	-	0	338
HCFC	570	210	19	20	-	0,1	-	9	828
HFC	391	109	247	18	23	4	332	27	1 153
PFC	0	0	0	0	-	0,1	-	0,1	0,2
<b>Total<sup>e</sup></b>	<b>1 097</b>	<b>370</b>	<b>315</b>	<b>124</b>	<b>40</b>	<b>5</b>	<b>332</b>	<b>37</b>	<b>2 319</b>

Scénario de réduction jusqu'en 2015	Émissions annuelles (Mt éqCO <sub>2</sub> /an)								
	Réfrigération	Climatisation fixe	Climatisation mobile	Mousses	Aérosols médicaux	Protection contre l'incendie	Sous-produit HFC-23	Autres	Total
Halons	-	-	-	-	-	[12] <sup>e</sup>	-	-	[12] <sup>e</sup>
CFC	84	24	32	81	0	0	-	0	221
HCFC	359	86	12	17	-	0,1	-	9	484
HFC	164	60	92	9	26	4	33	27	416
PFC	0	0	0	0	-	0,1	-	0,1	0,2

Potentiel de réduction jusqu'en 2015	Réduction des émissions (Mt éqCO <sub>2</sub> /an)								
	Réfrigération	Climatisation fixe	Climatisation mobile	Mousses	Aérosols médicaux	Protection contre l'incendie	Sous-produit HFC-23	Autres	Total
Halons	-	-	-	-	-	n.q.	-	-	-
CFC	53	26	17	4	17	-	-	-	117
HCFC	210	124	7	3	-	n.q.	-	n.q.	344
HFC	227	49	155	10	-3	n.q.	299	n.q.	737
PFC	-	-	-	-	-	-	-	-	0
<b>Total<sup>e</sup></b>	<b>490</b>	<b>200</b>	<b>179</b>	<b>17</b>	<b>14</b>	<b>n.q.</b>	<b>299</b>	<b>n.q.</b>	<b>1 198</b>

Notes :

n.q. - non quantifié.

<sup>a</sup> «Réfrigération» regroupe les systèmes de refroidissement résidentiels, commerciaux et industriels, notamment dans l'agroalimentaire et le stockage froid, ainsi que dans les transports.

<sup>b</sup> «Climatisation fixe» regroupe les systèmes de chauffage et de climatisation résidentiels et commerciaux.

<sup>c</sup> «Climatisation mobile» s'applique aux systèmes de climatisation des véhicules automobiles, bus et cabines de camions.

<sup>d</sup> «Autres» regroupe les aérosols non médicaux et les solvants.

<sup>e</sup> Dans le cas des halons, le forçage radiatif négatif indirect est bien plus important que le forçage radiatif positif direct. Par souci de clarté, leurs effets ne sont pas inclus dans les totaux et apparaissent entre crochets dans ce tableau.

**Tableau RT-5.** Stocks en équivalent CO<sub>2</sub> à effet de serre des halons, CFC, HCFC et HFC ainsi que des PFC utilisés en remplacement des SAO, pondérés en fonction du PRG: ventilation par groupe de GES et par secteur d'émissions. Données d'archives pour 2002 et projections d'émissions pour 2015 selon un scénario de poursuite des activités et un scénario de réduction de leur exploitation.

Note: Les potentiels de réchauffement global direct à 100 ans proviennent du GIEC (2001) et de l'OMM (2003) (voir le tableau RT-3). Le «total» peut différer de la somme des valeurs, compte tenu des arrondis.

2002	Stocks (Mt éqCO <sub>2</sub> /an)							Total
	Réfrigération <sup>a</sup>	Climatisation fixe <sup>b</sup>	Climatisation mobile <sup>c</sup>	Mousses	Aérosols médicaux <sup>f</sup>	Protection contre l'incendie	Autres <sup>d,f</sup>	
Halons <sup>e</sup>	-	-	-	-	-	[531] <sup>e</sup>	-	[531] <sup>e</sup>
CFC	3 423	631	1 600	10 026	69	0	0	15 749
HCFC	810	1 755	36	1 229	-	5	6	3 841
HFC	518	123	350	16	6	65	25	1 103
PFC	0	0	0	0	-	4	1	5
<b>Total<sup>e</sup></b>	<b>4 751</b>	<b>2 509</b>	<b>1 987</b>	<b>11 270</b>	<b>75</b>	<b>74</b>	<b>32</b>	<b>20 698</b>

Scénario de poursuite des activités jusqu'en 2015	Stocks (Mt éqCO <sub>2</sub> /an)							Total
	Réfrigération	Climatisation fixe	Climatisation mobile	Mousses	Aérosols médicaux	Protection contre l'incendie	Autres	
Halons	-	-	-	-	-	[206] <sup>e</sup>	-	[206] <sup>e</sup>
CFC	653	208	138	7 286	17	0	0	8 302
HCFC	1 582	1 536	42	1 696	-	6	9	4 871
HFC	1 922	1 488	896	644	23	226	27	5 227
PFC	-	-	-	0	-	4	0,1	4
<b>Total<sup>e</sup></b>	<b>4 157</b>	<b>3 232</b>	<b>1 076</b>	<b>9 626</b>	<b>40</b>	<b>236</b>	<b>37</b>	<b>18 404</b>

Scénario de réduction jusqu'en 2015	Stocks (Mt éqCO <sub>2</sub> /an)							Total
	Réfrigération	Climatisation fixe	Climatisation mobile	Mousses	Aérosols médicaux	Protection contre l'incendie	Autres	
Halons	-	-	-	-	-	[206] <sup>e</sup>	-	[206] <sup>e</sup>
CFC	627	208	138	7 286	0	0	0	8 258
HCFC	1 466	1 134	41	1 696	-	6	9	4 352
HFC	1 455	1 586	712	494	26	226	27	4 527
PFC	-	-	-	0	-	4	0,1	4
<b>Total<sup>e</sup></b>	<b>3 548</b>	<b>2 928</b>	<b>891</b>	<b>9 475</b>	<b>26</b>	<b>236</b>	<b>37</b>	<b>17 141</b>

Notes :

<sup>a</sup> «Réfrigération» regroupe les systèmes de refroidissement résidentiels, commerciaux et industriels (notamment dans l'agroalimentaire et le stockage froid), ainsi que dans les transports.

<sup>b</sup> «Climatisation fixe» regroupe les systèmes de chauffage et de climatisation résidentiels et commerciaux.

<sup>c</sup> «Climatisation mobile» s'applique aux systèmes de climatisation des véhicules automobiles, bus et cabines de camions.

<sup>d</sup> «Autres» regroupe les aérosols non médicaux et les solvants.

<sup>e</sup> Dans le cas des halons, le forçage radiatif négatif indirect est bien plus important que le forçage radiatif positif direct. Par souci de clarté, leurs effets ne sont pas inclus dans les totaux et apparaissent entre crochets dans ce tableau.

<sup>f</sup> Les applications émissives sont considérées comme ayant un stock égal aux émissions annuelles.

## Projections pour 2015 en cas de poursuite des activités

Les chapitres sectoriels développent des projections en cas de **poursuite des activités** en ce qui concerne l'utilisation et les émissions de CFC, HCFC, halons, HFC et certains PFC (lorsque ceux-ci sont utilisés en remplacement des SAO). Ces projections sont parties du principe que toutes les mesures existantes vont se poursuivre, y compris les mesures d'élimination ratifiées par le Protocole de Montréal et les réglementations nationales correspondantes. Les pratiques habituelles et les taux d'émission restent les mêmes jusqu'en 2015. Le rendement de récupération en fin de vie n'augmenterait pas. Les principales hypothèses sur lesquelles se fondent les projections pour 2015 en cas de poursuite des activités sont présentées dans le tableau RT-6.

Les activités sous-jacentes aux émissions de **fluorocarbures** devraient augmenter considérablement entre 2002 et 2015. Ces activités et services (réfrigération, climatisation, isolation) seront associés à un certain nombre de technologies et matières, dont les CFC et les HCFC. Dans les pays industrialisés, l'utilisation et les émissions de CFC et HCFC sont appelées à diminuer en vertu des principes d'élimination du Protocole de Montréal, à mesure que les équipements obsolètes seront mis au rebut. Dans les pays en développement, la production de HCFC peut se poursuivre jusqu'en 2040, et l'on s'attend même à une augmentation importante. Ces changements et leurs impacts se reflètent dans les données du tableau RT-4. [11.6]

Le déclin des émissions de CFC ne s'accompagne pas d'une augmentation proportionnelle des HFC car la tendance vers des technologies et des substituts sans HFC, ayant un PRG plus faible, se poursuit. En outre, bien que cela ne soit pas inclus dans le scénario de la poursuite des activités, la capture et la mise au rebut «propre» des substances émises par le passé sont susceptibles d'augmenter en ce qui concerne les HFC, puisque ces substances sont contrôlées par le Protocole de Kyoto. Le scénario de la poursuite des activités se fonde sur le maintien de toutes les mesures existantes, tandis que le scénario d'atténuation envisage les progrès qui pourraient être réalisés en s'appuyant sur la mise en œuvre mondiale des meilleures techniques de réduction des émissions.

Dans le scénario de la poursuite des activités, les stocks sont censés diminuer jusqu'à 18 Gt  $\text{éqCO}_2$  en 2015. Les stocks de CFC associés aux systèmes de réfrigération<sup>17</sup> ou de climatisation (fixe comme mobile) devraient chuter d'environ 6 Gt  $\text{éqCO}_2$  en 2002 à 1 Gt  $\text{éqCO}_2$  en 2015, pour l'essentiel par libération dans l'atmosphère, et en partie par récupération et destruction en fin de vie. Les stocks de CFC dans les mousses restent importants (diminuant de 10 à 7 Gt  $\text{éqCO}_2$  sur la même période). Les stocks de HCFC vont augmenter de 4 à 5 Gt  $\text{éqCO}_2$ , essentiellement à cause de la hausse prévue de l'utilisation du HCFC-22 dans la réfrigération commerciale. Les stocks de HFC devraient augmenter pour atteindre 5 Gt  $\text{éqCO}_2$  en 2015. Ceux des mousses représentent seulement 0,6 Gt  $\text{éqCO}_2$  et devraient augmenter encore après 2015. [11.4 et 11.6]

Dans le scénario de la poursuite des activités, les émissions totales directes de CFC, HCFC, HFC et PFC devraient représenter environ 2,3 Gt  $\text{éqCO}_2/\text{an}$  d'ici 2015 (contre 2,5 Gt  $\text{éqCO}_2/\text{an}$  en 2002)<sup>16</sup>: les émissions combinées de CFC et de HCFC diminuent de 2,1 (2002) à 1,2 Gt  $\text{éqCO}_2/\text{an}$  (2015) tandis que celles des HFC augmentent de 0,4 (2002) à 1,2 Gt  $\text{éqCO}_2/\text{an}$  (2015)<sup>18</sup>. Les émissions de PFC provenant des substituts aux SAO avoisinent 0,001 Gt  $\text{éqCO}_2/\text{an}$  (2002) et devraient diminuer.

Le tableau RT-4 présente la contribution relative des secteurs aux émissions directes de GES à travers le monde, liées à l'utilisation des SAO et de leurs substituts. Les applications de réfrigération ainsi que les systèmes de climatisation (mobiles et fixes) contribuent à l'essentiel des émissions globales directes à effet de serre (77 % en 2015 avec poursuite des activités), ce qui correspond à l'augmentation des émissions associées aux stocks de **frigorigènes**. La majeure partie des émissions à effet de serre provenant des mousses devrait se produire après 2015, la majorité des libérations ayant lieu en fin de vie. Les émissions de HFC-23 (sous-produit) représentent 14 % de toutes les émissions directes à effet de serre (scénario de la poursuite des activités jusqu'en 2015).

Compte tenu des fuites de CFC des stocks vers l'atmosphère, les émissions de CFC diminueront de 1,7 (2002) à 0,3 Gt  $\text{éqCO}_2$  (2015). Les émissions de HCFC devraient augmenter de 0,4 (2002) à 0,8 Gt  $\text{éqCO}_2/\text{an}$  (2015), suite à une augmentation fulgurante de leur utilisation dans les systèmes de réfrigération (commerciaux) et de climatisation fixe. Le triplement estimé des émissions de HFC est le résultat de l'application croissante de ces gaz dans la réfrigération et la climatisation fixe et mobile, mais également de l'émission du sous-produit HFC-23 issu de la production accrue de HCFC-22. La production de ce dernier devrait progresser d'environ 40 % sur la période 2002-2015. [11.4 et 11.6]

La documentation existante ne permet pas d'évaluer les émissions à effet de serre indirectes totales liées à la consommation d'énergie. D'une application à l'autre, l'importance de ces émissions varie considérablement et, dans certains cas, elle peut avoir une ampleur supérieure à celle des émissions directes. Cela dépend en grande partie du secteur concerné et des caractéristiques du produit ou de l'application, de l'intensité carbonique de l'électricité ou des carburants consommés tout au long du cycle de vie de l'application, du confinement au cours de l'exploitation et du traitement en fin de vie des substances stockées. Le tableau RT-7 présente différentes plages de pourcentages trouvés dans la documentation existante, en ce qui concerne la proportion des émissions directes par rapport aux émissions totales à effet de serre des applications exploitant des HFC. Pour les applications utilisant d'autres substances, ces mêmes proportions peuvent être radicalement différentes. Le stock relativement ancien des appareils frigorifiques utilisant des CFC peut, en particulier, fournir une portion plus importante des émissions directes. [3.2, 4 et 5]

<sup>17</sup> Dans le résumé technique, «réfrigération» regroupe les systèmes de refroidissement résidentiels, commerciaux et industriels (notamment dans l'agroalimentaire et le stockage froid), ainsi que dans les transports. [4] «Climatisation fixe» regroupe les systèmes de chauffage et de climatisation résidentiels et commerciaux. [5] «Climatisation mobile» s'applique aux systèmes de climatisation des véhicules automobiles, bus et cabines de camions.

<sup>18</sup> Les valeurs retenues proviennent des calculs scientifiques du PRG les plus récents (voir le tableau RT-3). Les valeurs de la CCNUCC auraient conduit à des estimations des émissions de HFC (en tonnes d'équivalent  $\text{CO}_2$ ) inférieures d'environ 15 %.

**Tableau RT-6.** Principales hypothèses des scénarios de poursuite des activités et de réduction.

Secteur	Croissance annuelle du marché 2002-2015 dans les deux cas de figure (%/an)				Hypothèses les plus probantes								
					Type de réduction	UE		USA		Japon		PED <sup>a</sup>	
Réfrigération et climatisation	UE %/an	USA %/an	Japon %/an	PED <sup>a</sup> %/an		Poursuite des activités	Avec réduction	Poursuite des activités	Avec réduction	Poursuite des activités	Avec réduction	Poursuite des activités	Avec réduction
Réfrigération résidentielle	1	2,2	1,6	2-4,8	Substance	HFC-134a / HC-600a	HC-600a	HFC-134a	HFC-134a / HC-600a (50%)	HFC-134a	HC-600a	CFC-12 / HFC-134a	+ HC-600a (50 % en 2010)
					Récupération	0 %	80 %	0 %	80 %	0 %	80 %	0 %	50 %
Réfrigération commerciale	1,8	2,7	1,8	2,6-5,2	Substance	R-404A	R-404A / R-410A (50 %)	HCFC-22 / R-404A	R-404A / R-410A (50 %)	HCFC / R-404A	R-404A / R-410A (50 %)	CFC / HCFC	R-404A / R-410A (50 %)
					Récupération	50 %	90 %	50 %	90 %	50 %	90 %	25 %	30 %
					Charge		-30 %		-30%		-30%		-10%
Réfrigération industrielle	1	1	1	3,6-4	Substance	HFC-NH <sub>3</sub> (35 %)	HFC-NH <sub>3</sub> (70 %)	HCFC / HFC-NH <sub>3</sub> (60 %)	HCFC / HFC-NH <sub>3</sub> (80 %)	HCFC / HFC-NH <sub>3</sub> (35 %)	HCFC / HFC-NH <sub>3</sub> (70 %)	CFC / HCFC-22	NH <sub>3</sub> (40-70 %)
					Récupération	50 %	90 %	50 %	90 %	50 %	90 %	15-25 %	50 %
					Charge		-40 %		-40%		-40%		-10%
Réfrigération des transports	2	3	1	3,3-5,2	Substance	HFC	HFC	HCFC / HFC	HCFC / HFC	HCFC / HFC	HCFC / HFC	CFC / HCFC-22	+ HFC jusqu'à 30 %
					Récupération	50 %	80 %	50 %	70 %	50 %	70 %	0 %	20-30 %
Climatisation fixe	3,8	3	1	5,4-6	Substance	HFC	HFC	HCFC / HFC	HCFC / HFC	HCFC / HFC	HCFC / HFC	CFC / HCFC-22	CFC / HCFC-22 (HFC 30 % dans certains pays)
					Récupération	50 %	80 %	30 %	80 %	30 %	80 %	0 %	50 %
					Charge				-20 %		-20 %		

Tableau RT-6. (suite)

Secteur	Croissance annuelle du marché 2002-2015 dans les deux cas de figure (%/an)				Hypothèses les plus probantes								
					Type de réduction	UE		USA		Japon		PED <sup>a</sup>	
Réfrigération et climatisation (suite)	UE %/an	USA %/an	Japon %/an	PED <sup>a</sup> %/an		Poursuite des activités	Avec réduction	Poursuite des activités	Avec réduction	Poursuite des activités	Avec réduction	Poursuite des activités	Avec réduction
	Climatisation mobile	4	4	1	6-8	Substance	HFC-134a / CO <sub>2</sub> (10 %) dès 2008	HFC-134a / CO <sub>2</sub> (50 %) dès 2008	HFC-134a	HFC-134a / CO <sub>2</sub> (30 %) dès 2008	HFC-134a	HFC-134a / CO <sub>2</sub> (30 %) dès 2008	CFC / HFC-134a
					Récupération	50 %	80 %	0 %	70 %	0 %	70 %	0 %	50 %
					Charge	700 g	500 g	900 g	700 g	750 g	500 g	750-900 g	750-900 g
<b>Mousses</b>	Environ 2 %/an				Poursuite des activités Avec réduction	<p>Hypothèses d'utilisation des substances (voir le chapitre 7)</p> <p>Réduction de la consommation des HFC: diminution linéaire de l'utilisation des HFC entre 2010 et 2015 conduisant à une réduction de 50 % en 2015.</p> <p>Amélioration des installations/production: adoption de stratégies de réduction des émissions de production à partir de 2005 pour toutes les mousses en blocs, et à partir de 2008 pour tous les autres sous-secteurs des mousses.</p> <p>Options de gestion de la fin de vie: extension des mesures existantes de fin de vie à tous les appareils et panneaux galvanisés en 2010, associée à un taux de récupération de 20 % des autres mousses de la construction à partir de 2010.</p>							
<b>Aérosols médicaux</b>	1,5-3 %/an				Poursuite des activités Avec réduction	<p>Retrait progressif partiel des CFC</p> <p>Retrait progressif complet des CFC</p>							
<b>Protection contre l'incendie</b>	-4,5 %/an (toutes substances) +0,4 %/an (HCFC/HFC/PFC)				Poursuite des activités Avec réduction	<p>Retrait progressif des halons</p> <p>Non quantifiable</p>							
<b>Sous-produit HFC-23</b>	2,5 %/an				Poursuite des activités Avec réduction	<p>Émissions de HFC-23 de la capacité de production actuelle: 2 % de la production de HCFC-22 (en kt)</p> <p>Émissions de HFC-23 de la nouvelle capacité de production: 4 % de la production de HCFC-22 (en kt)</p> <p>Mise en œuvre totale des options de réduction (réduction des émissions à 90 %)</p>							
<b>Aérosols non médicaux et solvants</b>	16 % d'augmentation des émissions totales pondérées en CO <sub>2</sub> sur la période 2002-2015				Poursuite des activités Avec réduction	<p>Voir le chapitre 10</p> <p>Non quantifiable</p>							

Notes:

<sup>a</sup> PED: pays en développement

**Tableau RT-7.** Contribution en pourcentage des émissions directes aux émissions de GES sur la durée de vie totale dans diverses applications (émissions associées à l'unité fonctionnelle): sélection d'exemples indicatifs des applications utilisant des HFC.

Secteur d'application	Méthode appliquée	Pourcentage d'émissions des HFC sur les émissions de GES pendant toute la vie du système (selon PRG-100)	Caractérisation du système et hypothèses clés
Climatisation mobile	TEWI	<b>40–60 %</b> – Systèmes actuels (moteur à essence) <b>50–70 %</b> – Systèmes actuels (moteur diesel)	Véhicule de tourisme HFC-134a; Séville (Espagne)
Réfrigération commerciale	LCCP	<b>20–50 %</b> – Pour une large gamme de tests de sensibilité sur les pertes de gaz, le rendement et l'approvisionnement énergétiques	Groupe frigorifique à détente directe; supermarché (1000 m <sup>2</sup> ) R-404A; Allemagne
Réfrigération résidentielle	TEWI	<b>2–3 %</b> – Aucune récupération en fin de vie	Réfrigérateur grand public aux normes européennes; HFC-134a Moyenne sur plusieurs exemples à travers le monde
Mousse isolante des réfrigérateurs grand public	LCCP	<b>6 %</b> – Avec 90 % de l'agent gonflant récupéré à la mise au rebut <b>17 %</b> – Avec 50 % de l'agent gonflant récupéré à la mise au rebut	HFC-24fa Europe
Mousse isolante dans un camion réfrigéré	LCCP	<b>2 %</b> – Avec récupération totale du HFC à la mise au rebut <b>13 %</b> – Sans récupération du HFC à la mise au rebut	Camion réfrigéré diesel Allemagne
Mousse pistolée Toit-terrasse "chaud" industriel	ACV	<b>13 %</b> – Avec récupération totale du HFC à la mise au rebut <b>20 %</b> – Sans récupération du HFC à la mise au rebut	4 cm d'épaisseur HFC-365 mfc Allemagne
Cartonnage dans un bâtiment privé Mur creux	ACV	<b>4 %</b> – Avec récupération totale du HFC à la mise au rebut <b>17 %</b> – Sans récupération du HFC à la mise au rebut	5 cm d'épaisseur HFC-365 mfc Allemagne
Cartonnage dans un bâtiment privé Toiture chaude inclinée	ACV	<b>10 %</b> – Avec récupération totale du HFC à la mise au rebut <b>33 %</b> – Sans récupération du HFC à la mise au rebut	10 cm d'épaisseur HFC-365 mfc Allemagne

### Projections du scénario avec réduction jusqu'en 2015

Les options de réduction sont identifiées et décrites pour chaque secteur dans le chapitre correspondant. En outre, la section 4 du présent résumé fournit un complément d'informations sur les perspectives sectorielles de réduction. D'un point de vue plus général, les potentiels de réduction sectoriels globaux sont déterminés pour 2015 suivant le scénario de poursuite des activités. Les estimations se fondent sur un scénario de réduction, qui s'appuie sur l'application mondiale des [meilleures pratiques](#) en termes d'utilisation, de récupération et de destruction des SAO et de leurs substituts. Ces hypothèses sont reprises dans le tableau RT-6 et les émissions sectorielles à effet de serre selon le scénario de diminution jusqu'en 2015 sont présentées dans le tableau RT-4.

Grâce à l'application mondiale des meilleures pratiques et méthodes de récupération, on pourrait faire disparaître environ

1,2 Gt éqCO<sub>2</sub> des émissions annuelles directes à effet de serre d'ici 2015, par rapport au scénario de la poursuite des activités. Environ 60 % de ce potentiel relève de la réduction des émissions de HFC, tandis que les HCFC et les CFC y contribuent pour 30 % et 10 % respectivement. Presque 75 % du potentiel de réduction concerne les secteurs de la réfrigération et de la climatisation — fixe ou mobile — et 25 % la destruction du HFC-23 libéré par la production de HCFC-22. Cette dernière option représente environ 40 % du potentiel de réduction des HFC. [11.6]

Les émissions liées aux stocks qui peuvent être évitées d'ici 2015 relèvent essentiellement des applications à base de frigorigènes dont les taux d'émission, en cas de poursuite des activités, sont infiniment plus importants que ceux des mousses sur la même période. En agissant plus tôt, la majeure partie des stocks de CFC peut être capturée.

La plupart des émissions à effet de serre indirectes, liées à l'énergie, se produisent pendant la phase d'utilisation des applications et, dans bien des cas, l'amélioration de leur rendement énergétique peut entraîner des réductions notables des GES, en particulier sur les applications de longue durée. Ces améliorations peuvent être rentables et réduire les coûts nets des options de réduction des émissions, bien que le potentiel de réduction dépende encore une fois largement de circonstances spécifiques. Même si les documents consultés ne permettent pas une estimation globale de ce potentiel de réduction, plusieurs études de cas sectorielles ou régionales illustrent ce propos.

### Incertitudes

Les incertitudes en matière de projections des émissions sont considérables. Une comparaison des mesures atmosphériques avec calculs des stocks montre des différences par groupe de substances — CFC, HCFC, HFC et PFC — de l'ordre de 10 à 25 %. Pour chaque gaz, ces différences peuvent être encore supérieures. Elles sont dues aux applications émissives non identifiées — comme celles des CFC-11, HCFC-141b, HCFC-142b — qui ne sont pas prises en compte dans le calcul des stocks, et aux incertitudes au niveau des données distribuées géographiquement relatives aux équipements utilisés. [11.3.4]

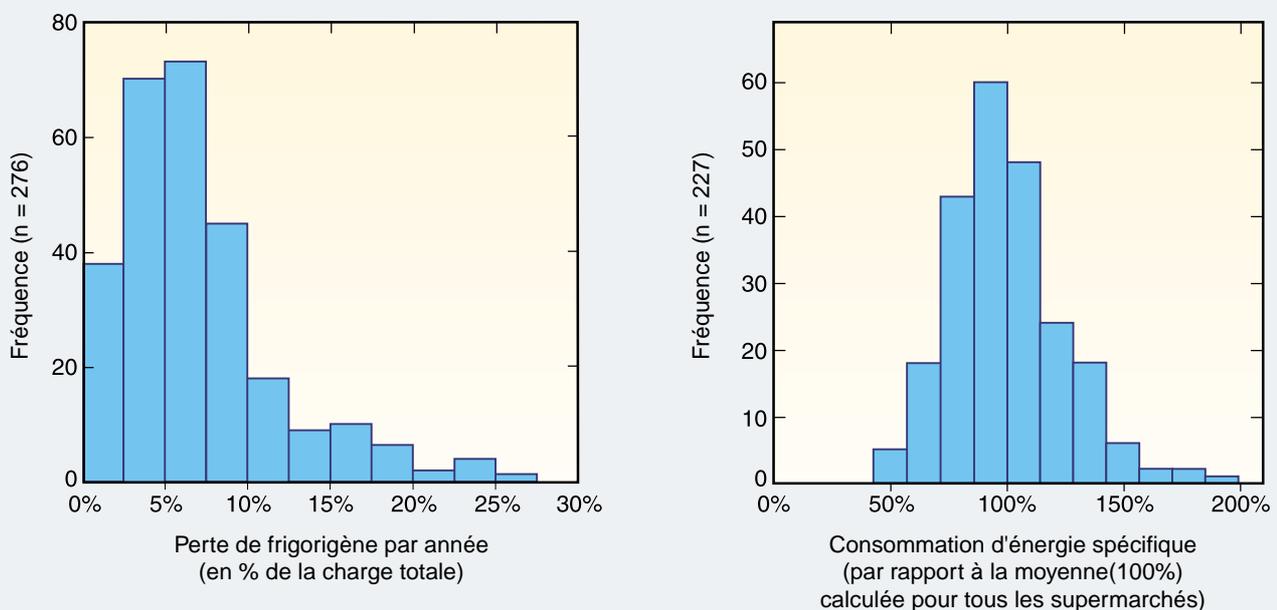
### 3.3 Quelles sont les options de réduction des émissions à effet de serre?

En règle générale, les options techniques permettant de réduire les émissions directes de GES passent par :

- L'amélioration du confinement des substances;

- La réduction de la charge des substances dans les équipements et les produits;
- La récupération et le recyclage ou la destruction des substances en fin de vie;
- L'utilisation accrue de substances de remplacement offrant un potentiel de réchauffement global faible ou négligeable;
- Des [technologies de remplacement](#).

Les réductions des émissions indirectes à effet de serre peuvent provenir de l'amélioration du rendement énergétique des produits et des procédés (et de la réduction des émissions spécifiques de GES du système énergétique). Pour déterminer l'option technologique dont le potentiel de réduction est le plus intéressant, il faut évaluer les émissions directes et indirectes. La comparaison des options n'est pas un exercice simple car, même au sein de l'application d'une technologie, il peut y avoir des variations significatives dans les émissions directes et indirectes. La figure RT-10 illustre la distribution des émissions directes des climatiseurs mobiles dans le parc des automobiles de tourisme et des émissions indirectes, liées à l'énergie, des systèmes frigorifiques de supermarchés. Les graphiques indiquent qu'au sein même d'une classe de technologie, des différences considérables existent dans les potentiels de réduction des émissions directes et/ou indirectes. Un suivi, des tests comparatifs et une compréhension appropriés des performances des systèmes constituent une première étape cruciale pour parvenir à une réduction des émissions sur le court et le moyen terme. Toutefois, pour réduire de façon significative les émissions sur le long terme, il faut faire des choix parmi les différentes options technologiques établies et, par conséquent, se préparer et s'informer à l'aide d'outils d'évaluation standardisés.



**Figure RT-10.** Variation des émissions directes et indirectes dans les parcs d'équipements. Fuites annuelles des systèmes de climatisation mobile dans le parc des véhicules de tourisme (partie gauche, n = 276). Consommation d'énergie spécifique, exprimée en pourcentage de la moyenne d'un groupe représentatif d'unités frigorifiques intégrées de supermarchés (partie droite, n = 227).

### 3.4 Quels sont les outils d'évaluation qui peuvent fournir des informations sur les choix technologiques?

La protection de la couche d'ozone stratosphérique et du climat exige des technologies qui diffèrent en termes d'impact sur le climat, la santé, la sécurité et d'autres enjeux environnementaux, ainsi que sur les coûts privés et sociaux. Les analyses de ces différents impacts peuvent aider les décideurs à faire leur choix parmi des technologies de remplacement concurrentes. Cependant, les résultats de telles analyses peuvent varier en fonction des facteurs pris en compte, qui ne sont pas intrinsèques aux technologies — notamment l'approche analytique (ascendante ou descendante), le degré d'optimisation du produit ou du processus, les pratiques de maintenance et de déclassement, les conditions régionales, ainsi qu'une foule d'autres hypothèses. Pour faire des choix intelligents, les décideurs doivent donc être conscients des sensibilités, des incertitudes et des limites inhérentes à chaque type d'analyse et être en mesure d'évaluer si l'approche et les hypothèses utilisées dans l'analyse semblent raisonnables par rapport aux régions et périodes auxquelles s'appliquent les technologies concurrentes.

Pour faire face à de tels enjeux, il est indispensable d'établir des méthodologies précises. Ce rapport présente ainsi les différents types d'analyses et propose une orientation concise sur la façon de les évaluer et les appliquer. Pour chaque type d'analyse, il examine les approches et les variables analytiques les plus importantes, ainsi que leurs sensibilités, incertitudes et limites.

Toute étude des options techniques permettant de réduire les impacts des émissions implique l'évaluation de multiples facteurs. Cela inclut l'influence des émissions directes et indirectes sur le forçage radiatif, les coûts, la santé, la sécurité et les impacts environnementaux de chaque application et composé; les pratiques d'entretien et de conception qui permettraient de réduire les fuites; les effets de la récupération et du recyclage. Ces facteurs peuvent être soumis à de grandes incertitudes et varient d'une application à l'autre et d'une région à l'autre. Il faut aussi tenir compte des facteurs non techniques, comme les différences dans les environnements législatifs et administratifs dans les diverses régions du monde, la disponibilité de l'infrastructure, les financements et les considérations historiques. Les informations sur ces facteurs sont cependant rarement complètes, ce qui rend l'évaluation approximative.

Le rapport traite des émissions directes d'halocarbures associées à leur production, leur utilisation et leur déclassement, ainsi que des émissions indirectes liées à l'énergie nécessaire. De telles émissions sont quantifiées et les coûts inhérents à leur réduction sont évalués en fonction des méthodologies présentées ici. Pour une évaluation précise, il ne suffit pas de quantifier les coûts privés: il faut aussi tenir compte des coûts externes qui ne sont pas pris en charge par le secteur privé mais qui constituent une charge pour la société.

L'objectif du chapitre sur les méthodologies de ce rapport (chapitre 3) est de décrire les procédures de calcul des émissions

de SAO et de GES et des coûts associés à la réduction de ces émissions. Un large éventail d'outils d'évaluation existe, de ceux associés à des procédures bien établies au niveau global à ceux définis et appliqués de manière plus informelle. Le tableau RT-8 présente les méthodologies identifiées comme importantes dans ce rapport.

Pour évaluer les impacts des changements climatiques et environnementaux, les décideurs préfèrent avoir un panorama complet de tous les aspects environnementaux impliqués. Hormis les données sur les émissions à effet de serre directes et indirectes, les autres informations sont toutefois souvent difficiles à quantifier. Par conséquent, les indices TEWI ([impact total équivalent sur le réchauffement planétaire](#), qui mesure les émissions à effet de serre au cours de l'utilisation et de la mise au rebut) et LCCP ([impact sur le climat au cours du cycle de vie](#), qui intègre également les émissions à effet de serre directes au cours de la fabrication et les émissions indirectes associées au contenu énergétique des substances impliquées) sont beaucoup plus utiles d'un point de vue pratique que des méthodologies plus exhaustives comme l'[analyse du cycle de vie](#) (ACV), la charge environnementale, etc. À noter qu'il n'existe aucune base scientifique établie permettant de réduire les différents résultats obtenus (comme l'ACV) à un nombre ou une valeur unique.

Par le passé, personne ne s'est vraiment attaché à assurer la comparabilité des résultats issus de différentes évaluations. Nous disposons donc d'un grand nombre de résultats sur les performances des GES, mais souvent sans comparaison possible. Le traitement des incertitudes est fréquemment incomplet et les recommandations émises ne sont pas suffisamment fiables pour être comparées entre secteurs. Face aux nombreuses hypothèses et méthodologies divergentes, un rôle important est désormais accordé à la comparaison des technologies dans des conditions convenues selon un ensemble commun de méthodes et d'hypothèses. Le développement de méthodologies standard, simples et pragmatiques, et de leurs critères respectifs de qualité, est recommandé. Les prochains travaux devront réduire le fossé entre l'application de comparaisons spécifiques et des résultats suffisamment fiables pouvant servir à élaborer des mesures dans des sous-secteurs entiers.

Les analyses des émissions et de leur potentiel de réduction, au niveau sectoriel comme global, s'appuient sur de vastes bases de données sur les parcs d'équipements et les autres distributions de produits, qui intègrent des informations primaires sur les émissions de substances et la consommation d'énergie. Dans l'absolu, ces bases de données devraient être cohérentes et compatibles avec les inventaires nationaux d'émissions de GES. Il faudra aussi disposer des données sur les ventes de fluides aux diverses parties impliquées dans le sous-secteur. Améliorer ces sources relativement complètes à des fins d'analyses débouchant sur des mesures sectorielles conséquentes nécessite des ressources considérables et pose un certain nombre de contraintes en termes de confidentialité, appelant la plus grande prudence. Pour atteindre des résultats acceptables sur les futurs développements entre les sous-secteurs, les décideurs devraient notamment s'attacher à impliquer davantage les parties prenantes et à introduire des mesures favorisant la transparence vis-à-vis des utilisateurs externes, en documentant de manière complète leurs méthodes et hypothèses.

**Tableau RT-8.** Présentation des méthodes d'évaluation examinées dans le présent rapport.

Méthode d'évaluation	Présentation
<b>Émissions directes</b>	
Production	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Identification de toutes les matières premières requises et des étapes de traitement chimique nécessaires pour les transformer en produit intermédiaire et final.</li> <li>2) Comptabilisation de toutes les émissions produites à chaque étape (mesures ou modélisation).</li> </ol>
Utilisation	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Mesures pour extrapoler les pertes de fluides au cours de la durée de vie d'un équipement, qui entraînent des émissions directes.</li> <li>2) Les pertes de transport et de distribution sont intégrées aux émissions d'utilisation directes.</li> </ol>
Déclassement	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Les émissions sont prises en compte en fonction de la destination finale des produits.</li> <li>2) Si aucune récupération n'intervient, les fluides restant sont évalués comme des émissions directes.</li> <li>3) En cas de récupération, des émissions peuvent également se produire pendant le retraitement de ces fluides.</li> </ol>
<b>Émissions indirectes</b>	
Production	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Modélisation et/ou mesure de l'énergie embarquée dans l'équipement utilisé pour s'approvisionner en matières premières, les prétraiter, les transporter et les transformer en produits finaux dans les usines.</li> <li>2) Modélisation et/ou mesure de la consommation énergétique totale pour produire une unité d'un fluide particulier à partir des matières premières.</li> <li>3) Consommation énergétique associée à l'émission de GES, extrapolée des données nationales ou régionales.</li> </ol>
Utilisation	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Évaluation de la consommation énergétique au cours de la vie d'un équipement. <ol style="list-style-type: none"> <li>a) Applications de réfrigération, de chauffage et de climatisation: modélisation et/ou mesure de la consommation énergétique des équipements.</li> <li>b) Mousses isolantes: <ol style="list-style-type: none"> <li>b1) Modélisation de la compensation d'épaisseur, et/ou</li> <li>b2) Mesure de la consommation énergétique de la ligne de base et de l'application calorifugée.</li> </ol> </li> </ol> </li> <li>2) Consommation énergétique associée à l'émission de GES, extrapolée des données nationales ou régionales.</li> </ol>
Déclassement	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Consommation énergétique nécessaire au recyclage des produits ou à leur destruction en fin de vie.</li> <li>2) Consommation énergétique associée à l'émission de GES, extrapolée des données nationales ou régionales.</li> </ol>
<b>Coûts</b>	
Dépenses privées	Ces coûts sont calculés à partir des informations fournies par les entreprises privées. Ils regroupent essentiellement les dépenses d'investissement, la main-d'œuvre, le foncier, les matières, la maintenance et les frais administratifs.
Coûts sociaux	Coûts généralement supportés par la société - pollution de l'air et de l'eau - associés à la production de biens par le secteur privé. Ces coûts sont évalués à partir de la quantification des avantages et des dommages induits par le produit final.
Taux d'actualisation	Ce taux permet de tenir compte de la date d'échéance des coûts. La valeur actuelle - ou coût étalé - est calculée à partir des taux d'actualisation sociaux ou économiques utilisés respectivement pour les coûts sociaux et les dépenses privées.
Développement durable	Quantification (ou, au moins, qualification) des impacts positifs et négatifs sur le bien-être de la société des modifications apportées à la production et à l'utilisation des fluides.
<b>Santé et sécurité</b>	
Santé et sécurité	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Concentration sur l'évaluation du risque lié aux produits chimiques, puis minimisation des impacts négatifs sur la santé et la sécurité, via la gestion du risque des systèmes.</li> <li>2) Pour les substances concernées, utiliser les références aux bases de données et sources existantes.</li> </ol>
<b>Impacts environnementaux</b>	
<b>TEWI</b> (impact total équivalent sur le réchauffement planétaire). Comptabilise les GES à partir des émissions directes de fluides d'exploitation ainsi que le CO <sub>2</sub> lié à l'énergie	$TEWI = \sum(a_i * b_i + a_i * c_i) + d$ <p> <math>a_i</math> = Potentiel de réchauffement global du gaz <math>i</math> émis.  <math>b_i</math> = Masse de gaz <math>i</math> libéré au cours de la durée de vie opérationnelle du système.  <math>c_i</math> = Masse de gaz <math>i</math> libéré lors du déclassement du système en fin de vie.  <math>d</math> = Émission de CO<sub>2</sub> résultant de l'énergie utilisée pour faire fonctionner le système (pendant toute sa vie). </p>
<b>LCCP</b> (impact sur le climat au cours du cycle de vie). Tient compte des facteurs du TEWI auxquels s'ajoutent les émissions fugaces au cours de la fabrication (des fluides opérationnels uniquement) et du CO <sub>2</sub> avec leur contenu énergétique.	$LCCP = TEWI \text{ (voir ci-dessus)} + \sum x_i * y_i + z$ <p> <math>x_i</math> = Potentiel de réchauffement global du gaz <math>i</math> émis au cours de la fabrication du fluide;  <math>y_i</math> = Masse du gaz <math>i</math> libéré au cours de la fabrication du fluide;  <math>z</math> = Contenu énergétique de toutes les matières utilisées pour produire le fluide (l'énergie spécifique utilisée pour la fabrication d'une unité de masse de chaque matière multipliée par la masse totale émise) exprimé en équivalent CO<sub>2</sub>. </p>
<b>ACV</b> (analyse du cycle de vie). Décrit les impacts sur l'environnement des systèmes, depuis l'acquisition des matières premières jusqu'à la mise au rebut.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Décrire le système en termes de processus individuels et de leurs interrelations.</li> <li>2) Constituer un inventaire des entrées et sorties concernées pour chaque processus et des systèmes impliqués dans ces entrées et sorties (analyse de l'inventaire du cycle de vie).</li> <li>3) Évaluer les impacts potentiels sur l'environnement de ces entrées/sorties. Les catégories les plus évidentes d'impact sont le changement climatique et l'appauvrissement de la couche d'ozone, mais certaines, voire toutes les catégories peuvent être importantes.</li> </ol>

### 3.5 Quelles sont les différences régionales?

Les différents stades de développement économique constituent un facteur important, expliquant les écarts régionaux dans les évaluations. Les hypothèses-clés sur les indicateurs de performances techniques, comme la durée de vie des équipements ou le coût d'exploitation des systèmes et produits, varient considérablement entre pays industrialisés et pays en développement, probablement du fait du coût du capital.

Dans les pays en développement, les dépenses privées traditionnelles sont généralement prises en compte tandis que les autres coûts cachés (recherche-développement (R-D), formation, responsabilité environnementale) sont souvent ignorés. Les coûts externes sont rarement pris en considération puisqu'il n'existe généralement pas de réglementations traitant des enjeux de l'externalité et que les populations y sont peu sensibles. Les législations sur la santé et la sécurité sur le lieu de travail sont généralement admises compte tenu de l'existence et du respect des lois sur le travail dans la plupart de ces pays.

Entre pays développés et pays en développement, il existe des écarts notables également au niveau des intervalles d'incertitudes sur les émissions estimées (directes et indirectes), qui sont à leur tour exploitées dans d'autres analyses. Dans le cas des émissions directes, des progrès ont été réalisés dans la diffusion des méthodologies d'inventaire des émissions grâce aux investissements du Fonds multilatéral du Protocole de Montréal dans les pays en développement. Cependant, que les pays soient développés ou non, les incertitudes demeurent importantes. L'amélioration des quantifications des émissions à effet de serre indirectes, qui jouent un rôle important dans les émissions totales, reste une gageure pour tous les pays. Les difficultés se

concentrent sur des questions telles que la disponibilité des données sur la consommation énergétique, la détermination de l'intensité carbonique de l'énergie consommée et les émissions estimées liées au contenu énergétique en amont des productions. Cela conduit à la nécessité d'un effort mondial concerté pour que les décideurs disposent des informations nécessaires et puissent ainsi choisir les orientations adéquates en faveur de la couche d'ozone et du climat.

À ces questions s'ajoute le fait que chaque technologie à l'origine d'émissions directes ou indirectes fait appel à des données spécifiques pour déterminer ses impacts sur le climat et l'ozone. Se posent alors des questions de capacité, de standards, de mesures et de réglementations, pour lesquelles les pays développés ont établi de meilleures (bien qu'incomplètes) infrastructures de réponse. Cela illustre bien la nécessité de développer des méthodologies simples et standard et des critères correspondants de qualité, comme le recommande le présent rapport. [3.6]

### 3.6 Quelles sont les principales perspectives identifiées en termes de réduction des émissions à effet de serre liées à l'utilisation des SAO, de leurs substituts et des émissions indirectes associées?

Les principales perspectives de réduction des émissions directes par secteur et par groupe de substances sont quantifiées au tableau RT-4. Le tableau RT-9 résume, quant à lui, les caractéristiques sectorielles et les perspectives de réduction spécifiques. La section 4 du présent résumé technique traite en détail des perspectives de réduction des émissions à effet de serre.

**Tableau RT-9.** Présentation des conclusions spécifiques aux secteurs ou applications.

Secteur	Description et statut du secteur	Statut des émissions, tendances dans le scénario de la poursuite des activités et perspectives de réduction des émissions
<b>Réfrigération résidentielle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>À la fabrication, le retrait des CFC-12 est terminé dans les nations développées et en cours dans les pays en développement.</li> </ul>	<p><u>Statut des émissions et tendances dans le scénario de la poursuite des activités</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Les fuites de frigorigènes calculées selon l'approche ascendante suggèrent un taux d'émission annuel de 6 % de la charge stockée, lié à l'importance du stock de CFC dans les vieux équipements. Les nouveaux systèmes non-CFC ont un taux de fuite d'environ 1 % par an.</li> <li>Les émissions extrapolées pour ce sous-secteur d'ici 2015 sont d'environ 65 Mt <math>\text{eqCO}_2</math> par an selon le scénario de la poursuite des activités.</li> </ul> <p><u>Perspectives de réduction des émissions</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>L'HFC-134a et l'isobutane (HC-600a) sont les deux principaux frigorigènes de substitution au CFC-12 utilisé auparavant. Chacun a prouvé qu'il était possible de le produire en masse à des fins d'utilisation économique, fiable, efficace et sûre. La préférence pour l'un ou l'autre varie selon les régions et dépend en large partie de l'environnement réglementaire.</li> <li>Pour les deux, les émissions indirectes dominent les émissions totales, sans même tenir compte de l'intensité en carbone de la production d'électricité. À rendement énergétique égal, les réfrigérateurs grand public au HC-600a ont un meilleur indice LCCP, qu'il y ait ou non récupération du gaz en fin de vie. La différence avec le HFC-134a est minime et peut encore se réduire en cas de récupération en fin de vie.</li> <li>Les produits de réfrigération à la pointe du progrès ont un rendement énergétique au moins 50 % plus important que les équipements d'une vingtaine d'années qu'ils remplacent généralement.</li> </ul>
<b>Réfrigération commerciale</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La réfrigération commerciale recouvre trois grands groupes d'équipements: les équipements autonomes, les groupes frigorifiques et les rayonnages frigorifiques intégrés.</li> <li>Les frigorigènes les plus utilisés dans ce secteur sont les HCFC-22, R-404A et HFC-134a.</li> </ul>	<p><u>Statut des émissions et tendances dans le scénario de la poursuite des activités</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Les fuites de frigorigènes calculées selon l'approche ascendante suggèrent un taux d'émission annuel de 30 % de la charge stockée, soit des émissions de frigorigènes qui représentent 60 % des émissions totales de GES résultant du fonctionnement des systèmes.</li> <li>Les valeurs des fuites de frigorigènes ont été calculées à partir des résultats obtenus sur 1 700 rayonnages aux États-Unis et en Europe. Ces valeurs se répartissaient sur une fourchette de 3 à 22 %, avec une moyenne à 18 %.</li> <li>En 2002, tous les types de frigorigènes stockés dans les équipements frigorifiques commerciaux – essentiellement des CFC, des HCFC et des HFC – représentaient 606 kt sur un total de 2 691 kilotonnes pour tous les systèmes de réfrigération et de climatisation et tous les types de frigorigènes, soit 22,5 % des stocks totaux de réfrigération et de climatisation.</li> <li>Les émissions extrapolées pour ce sous-secteur d'ici 2015 sont d'environ 902 Mt <math>\text{eqCO}_2</math> par an selon le scénario de la poursuite des activités.</li> </ul> <p><u>Perspectives de réduction des émissions</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Des réductions importantes des émissions totales, soit une amélioration de l'impact sur le climat au cours du cycle de vie, peuvent être obtenues par l'utilisation de frigorigènes de types HFC, hydrocarbures, ammoniac ou <math>\text{CO}_2</math>, par la réduction de la charge, un confinement plus efficace et une amélioration du rendement énergétique global, via la conception de nouveaux systèmes.</li> <li>Dans les systèmes frigorifiques intégrés, il est possible de réduire l'impact sur le climat au cours du cycle de vie jusqu'à 60 % par rapport aux systèmes directs centralisés de conception classique, par l'utilisation des frigorigènes de substitution, l'amélioration du confinement, le recours à des systèmes distribués, indirects ou en cascade. Les résultats publiés indiquent que les solutions de remplacement présentent un surcoût initial de 0-35 % et une consommation d'énergie 0-20 % plus élevée que celle des systèmes actuels.</li> <li>Selon les calculs, le coût d'abattement des émissions de frigorigènes se situerait entre 20 et 280 dollars <math>\text{É.-U.}</math> par t <math>\text{eqCO}_2</math> (avec un taux d'actualisation annuel de 10 %). Les efforts de développement sur les nouveaux systèmes se poursuivent afin d'en réduire le coût initial et la consommation énergétique. Cela permettrait de réduire davantage les coûts d'abattement. La prise en compte d'une possible augmentation du rendement énergétique peut également entraîner des coûts d'abattement négatifs (donc des économies).</li> </ul>

Tableau RT-9. (2) (suite)

Secteur	Description et statut du secteur	Statut des émissions, tendances dans le scénario de la poursuite des activités et perspectives de réduction des émissions
<b>Réfrigération commerciale</b> (suite)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pour les installations commerciales plus modestes, comme les équipements autonomes et les groupes frigorifiques (distributeurs, congélateurs à glaces, chambres froides, etc.), les multinationales ont commencé à exploiter des produits ayant un PRG nul à faible, à la place des HFC (hydrocarbures et CO<sub>2</sub>), et des technologies de remplacement, qui promettent des émissions directes réduites et des émissions indirectes plus faibles ou comparables.</li> </ul>
<b>Agroalimentaire, stockage froid et réfrigération industrielle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ce vaste secteur regroupe les équipements frigorifiques pour la transformation et le stockage des produits agroalimentaires ultra-frais et surgelés, ainsi que ceux des applications industrielles dans les domaines de la chimie, la pétrochimie, l'air liquide ainsi que la production de glace à des fins industrielles ou récréatives.</li> <li>• Les frigorigènes dominants de ce secteur sont l'ammoniac et le HCFC-22, suivis à moindre échelle par les CFC et les HFC. Des hydrocarbures sont utilisés par l'industrie pétrochimique.</li> </ul>	<p><u>Statut des émissions et tendances dans le scénario de la poursuite des activités</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• En 2002, tous les types de frigorigènes stockés dans ce secteur représentaient 298 kilotonnes (35 % d'ammoniac et 43 % de HCFC-22). Les émissions annuelles de frigorigènes s'élevaient à 17 % de la charge stockée dans les systèmes.</li> <li>• Les émissions extrapolées pour ce sous-secteur d'ici 2015 sont d'environ 104 Mt éqCO<sub>2</sub> par an selon le scénario de la poursuite des activités.</li> </ul> <p><u>Perspectives de réduction des émissions</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Il est prévu que l'utilisation de l'ammoniac augmente dans l'avenir, les HFC 404A, 507A, 410A et 134a remplaçant le HCFC-22 et les CFC. Les systèmes CO<sub>2</sub> et ammoniac/ CO<sub>2</sub> en cascade apparaissent dans les applications où la température de l'évaporateur est inférieure à - 40 °C.</li> <li>• Il est possible d'obtenir des réductions importantes des émissions totales par l'utilisation de frigorigènes ayant un PRG plus faible, la réduction de la charge des systèmes, un meilleur confinement, l'amélioration de la récupération des frigorigènes et l'augmentation du rendement énergétique total, via la conception de nouveaux systèmes. Le calcul de l'impact sur le climat au cours du cycle de vie permet de choisir le frigorigène en meilleure connaissance de cause et de concevoir un système dont l'influence sur l'environnement est minimisée.</li> <li>• Selon les calculs, les coûts d'abattement des émissions de frigorigènes dans le secteur de la réfrigération industrielle se situeraient entre 27 et 37 dollars É.-U. (2002) par t éqCO<sub>2</sub> (avec un taux d'actualisation annuel de 8 %).</li> </ul>
<b>Réfrigération des transports</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ce secteur couvre les systèmes permettant le transport, par route, rail, mer et air, des produits ultra-frais ou surgelés. Ces systèmes utilisent actuellement du CFC-12, du R-502 (un mélange CFC/HCFC), du HCFC-22 et des HFC (HFC-134a, R-404A, R-507A, R-410A et R-407C) comme frigorigènes, ainsi que, à moindre échelle, de l'ammoniac, des hydrocarbures et du CO<sub>2</sub> dans les machines frigorifiques à compression. Le CO<sub>2</sub> – à l'état solide, liquide ou de glace carbonique – sert également à la réfrigération dans ce secteur.</li> <li>• Plusieurs types de configurations existent, notamment les bateaux réfrigérés, les conteneurs frigorifiques autonomes qui peuvent être transportés par mer, rail ou route, ou encore les camions ou fourgons réfrigérés. La réfrigération du transport aérien s'effectue essentiellement à l'aide de CO<sub>2</sub> solide ou de glace carbonique.</li> </ul>	<p><u>Statut des émissions et tendances dans le scénario de la poursuite des activités</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Du fait des conditions relativement rudes imposées par certains environnements d'exploitation – températures extérieures très basses ou très élevées, forte hygrométrie, corrosion à l'eau salée, vibrations routières, chocs dans la manipulation des conteneurs – les fuites de frigorigènes atteignent 25 à 35 % par an.</li> <li>• Les émissions extrapolées pour ce sous-secteur d'ici 2015 sont d'environ 22 Mt éqCO<sub>2</sub> par an selon le scénario de la poursuite des activités.</li> </ul> <p><u>Perspectives de réduction des émissions</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Amélioration du confinement des frigorigènes grâce à une conception améliorée des systèmes – par exemple, la récente application de systèmes de compression hermétiques à faibles fuites pour le transport frigorifique par route ou par conteneur.</li> <li>• Réduction de la consommation d'énergie par l'amélioration de l'isolation, le contrôle de la fréquence des moteurs de compression pour satisfaire aux conditions de charge partielle, les condenseurs à eau sur les navires frigos et la maintenance préventive permettant de réduire l'encrassement des échangeurs de chaleur.</li> <li>• Utilisation de frigorigènes à faible PRG, comme l'ammoniac ou le mélange ammoniac/CO<sub>2</sub> dans la réfrigération des navires et les machines à compression se servant d'hydrocarbures ou de CO<sub>2</sub> pour la réfrigération sur route, rail ou dans les conteneurs. Les raisons d'utiliser ces frigorigènes plutôt que des fluorocarbures englobent les mesures sécuritaires nécessaires, les coûts du rendement énergétique de ces systèmes et le statut de commercialisation. Les systèmes au CO<sub>2</sub> sont encore au stade des tests et des démonstrations.</li> </ul>

Tableau RT-9. (3) (suite)

Secteur	Description et statut du secteur	Statut des émissions, tendances dans le scénario de la poursuite des activités et perspectives de réduction des émissions
<b>Climatisation fixe et pompes à chaleur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ce secteur regroupe les climatiseurs autonomes (montés sur fenêtre, à deux blocs), les systèmes centralisés de refroidissement par eau froide (compresseurs frigorifiques) et les pompes à chaleur réchauffant l'eau.</li> <li>• Le HCFC-22 est le frigorigène le plus utilisé pour les systèmes air/air. Des mélanges de HFC ont fait leur apparition sur une échelle notable en Europe et au Japon. Au niveau mondial, 90 % des climatiseurs sont toujours produits à base de HCFC-22. Au cours des 5 dernières années, la Chine est devenue le premier producteur et consommateur de climatiseurs au monde. Sa production avoisine celle du reste des autres pays.</li> <li>• Actuellement, la plupart des condenseurs frigorifiques centrifuges utilisent du HCFC-123 ou du HFC-134a.</li> <li>• La fabrication de ceux au CFC a été arrêtée au niveau mondial en 1993, mais environ 50 % des systèmes utilisés exploitent encore du CFC-11 ou 12, en raison de la longue durée de vie de ces équipements.</li> <li>• Les systèmes de chauffage et de climatisation résidentiels et commerciaux consomment beaucoup d'électricité et sont donc à l'origine d'émissions indirectes de GES, dans un schéma qui coïncide généralement avec les pics de demande en électricité. Ils comptent pour plus de 50 % de la consommation énergétique des bâtiments dans certaines régions tropicales. Dans la plupart des cas, les émissions de GES indirectes liées à l'énergie dépassent considérablement les émissions directes du frigorigène.</li> </ul>	<p><u>Statut des émissions et tendances dans le scénario de la poursuite des activités</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les petits condenseurs frigorifiques utilisant des compresseurs volumétriques se servaient généralement du HCFC-22 comme frigorigène. Celui-ci est actuellement remplacé par du HFC-134a, des mélanges de HFC et, dans une moindre mesure, par des hydrocarbures et de l'ammoniac.</li> <li>• Les émissions extrapolées pour ce secteur d'ici 2015 sont d'environ 370 Mt éqCO<sub>2</sub> par an selon le scénario de la poursuite des activités.</li> </ul> <p><u>Perspectives de réduction des émissions</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'amélioration de l'intégrité de l'enveloppe des bâtiments (réduisant l'accumulation ou les pertes de chaleur) peut avoir un impact notable sur les émissions indirectes.</li> <li>• Les mélanges de HFC (R-407C/R-410A) et les hydrocarbures (pour les petits systèmes, essentiellement portables, en Europe) sont utilisés en remplacement du HCFC-22 dans les pays développés. Dans les domaines où il est possible d'utiliser des hydrocarbures en toute sécurité, le rendement énergétique est comparable à celui du HCFC-22 et du R-410A. De futurs développements techniques pourraient conduire à une réduction de la charge en frigorigène, et donc à une extension du champ d'application des hydrocarbures.</li> <li>• Les limites d'application des hydrocarbures sont définies par des normes, réglementations et codes de construction nationaux et internationaux.</li> <li>• Les pompes à chaleur résidentielles ouvrent des perspectives d'économie d'énergie considérables en matière de chauffage des bâtiments. Le CO<sub>2</sub> présente certains avantages pour les pompes à eau courante car il bénéficie de l'utilisation d'un échange thermique à contre-courant et de hautes températures d'exploitation.</li> <li>• Les équipements à haut rendement sont commercialisés là où le marché des climatiseurs est important et le prix de l'électricité élevé. En comparaison avec le parc moyen installé, des améliorations substantielles peuvent donc être obtenues: jusqu'à 33 % d'économie d'énergie, par exemple.</li> <li>• Les coûts spécifiques des options d'abattement s'étalent de - 3 à 170 dollars É.-U. par tonne d'équivalent CO<sub>2</sub>. L'amélioration du rendement énergétique du système peut réduire considérablement les émissions indirectes de GES, conduisant dans certains cas à des économies globales de 75 dollars É.-U. par t éqCO<sub>2</sub>.</li> </ul>
<b>Climatisation mobile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les systèmes de climatisation mobiles ont été produits en masse à partir du début des années 1960 aux États-Unis et des années 1970 au Japon. Le principal frigorigène était le CFC-12. L'augmentation notable du nombre de véhicules climatisés en Europe est intervenue plus tard – vers 1995 – et coïncide avec l'introduction du HFC-134a.</li> </ul>	<p><u>Statut des émissions et tendances dans le scénario de la poursuite des activités</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les émissions extrapolées pour ce sous-secteur d'ici 2015 sont d'environ 315 Mt éqCO<sub>2</sub> par an selon le scénario de la poursuite des activités.</li> </ul> <p><u>Perspectives de réduction des émissions</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les options pour réduire l'impact effet de serre direct des climatiseurs mobiles sont: 1) passage à des frigorigènes à faible PRG; 2) meilleur confinement du HFC-134a; 3) amélioration du rendement et réduction de la charge en frigorigène.</li> <li>• Les HFC-152a et le CO<sub>2</sub> (R-744) sont les deux principales options de substitution du HFC-134a. Le HFC-152a, hormis son inflammabilité, est très similaire à la technologie du HFC-134a existante. Les systèmes au CO<sub>2</sub> nécessitent des composants et des technologies de conception récente. Aucun constructeur automobile n'envisage l'option hydrocarbures pour ses nouveaux véhicules; pourtant, ceux-ci servent de frigorigènes de maintenance dans plusieurs pays, malgré les recommandations défavorables des constructeurs (et souvent à l'encontre de la réglementation en vigueur).</li> </ul>

Tableau RT-9. (4) (suite)

Secteur	Description et statut du secteur	Statut des émissions, tendances dans le scénario de la poursuite des activités et perspectives de réduction des émissions
<b>Climatisation mobile</b> (suite)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les systèmes améliorés au HFC-134a affichent une réduction des GES directs de 50 %, ceux au HFC-152a de 92 % et ceux au CO<sub>2</sub> de presque 100 % sur une base d'équivalent CO<sub>2</sub> relative aux systèmes HFC-134a actuels.</li> <li>• Il est faisable, d'un point de vue technique et économique, de réduire les émissions indirectes en améliorant le rendement énergétique des systèmes et en réduisant la charge de chaleur, quel que soit le frigorigène employé.</li> <li>• Il n'y a actuellement aucune différence notable entre les indices LCCP techniquement possibles des systèmes au HFC-152a et au CO<sub>2</sub>.</li> <li>• La commercialisation des HFC-152a et CO<sub>2</sub> est toujours entravée par:             <ul style="list-style-type: none"> <li>o le risque d'inflammation et l'assurance d'un approvisionnement commercial du HFC-152a;</li> <li>o le risque de suffocation;</li> <li>o les questions résiduelles en termes de coût et de techniques sur la technologie du CO<sub>2</sub>.</li> </ul> </li> <li>• Le coût de référence d'un système européen type au HFC-134a est d'environ 215 dollars É.-U. avec un compresseur à commande interne. Le surcoût d'un système au CO<sub>2</sub> est évalué entre 48 et 180 dollars É.-U.. Celui d'un système au HFC-152a est évalué à 48 dollars É.-U. (système sécuritaire complémentaire).</li> </ul>
<b>Mousses</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les mousses se répartissent en deux grands groupes: l'isolation – bâtiments, équipements, stockage froid, etc. – et les autres applications – literie, mobilier, conditionnement, sécurité, etc.</li> <li>• Les matériaux de remplacement, tels que les fibres minérales, sont majoritaires sur le marché de l'isolation thermique depuis 40 ans. Cependant, l'isolation à l'aide de mousses a accru sa part de marché sur ces quinze dernières années, en partie grâce à l'essor du préfabriqué, pour lequel le poids et l'intégrité structurelle sont des facteurs importants. La longévité des performances thermiques est également de plus en plus importante. Néanmoins, les dépenses d'investissement et les performances au feu jouent toujours en faveur de la fibre minérale.</li> </ul>	<p><u>Statut des émissions et tendances dans le scénario de la poursuite des activités</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pour des raisons de sécurité à la fabrication, les entreprises les plus modestes utilisent des agents gonflants au HFC lorsque les investissements sécuritaires ont un impact proportionnellement plus important sur le coût du produit. La sécurité du produit peut amener à choisir un HFC pour certaines applications du bâtiment, notamment lorsque les assurances rentrent en ligne de compte.</li> <li>• Pour les mousses non isolantes, rigides ou souples, les agents gonflants sans halons sont désormais largement utilisés. Les technologies aux hydrocarbures ou au CO<sub>2</sub> (aqueux et semi-aqueux) se sont avérées techniquement viables pour différentes catégories de mousses, impliquant une très faible consommation continue de halons.</li> <li>• Les émissions extrapolées pour ce secteur d'ici 2015 sont d'environ 124 Mt éqCO<sub>2</sub> par an selon le scénario de la poursuite des activités.</li> </ul> <p><u>Perspectives de réduction des émissions</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les mousses isolantes sont censées contribuer de manière significative à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans les bâtiments et les équipements, grâce à l'amélioration des rendements énergétiques. Le choix de l'agent gonflant peut affecter sensiblement les performances thermiques.</li> <li>• Les analyses de l'impact sur le climat au cours du cycle de vie peuvent faciliter la comparaison des différents types d'isolants. Cependant, les calculs sont très sensibles à l'intensité en carbone de l'énergie utilisée, à la durée de vie escomptée du produit, à l'épaisseur du calorifugeage et au degré de récupération/destruction en fin de vie.</li> <li>• En 2015, les hydrocarbures devraient s'imposer comme le principal agent gonflant utilisé dans le secteur des mousses rigides, représentant presque 60 % de la consommation totale. À une échelle plus modeste, les HFC (24 %) et HCFC (16 %) seront également utilisés. L'utilisation du HCFC sera limitée aux pays en développement et concentrée sur les équipements. Les estimations actuelles sur l'utilisation des HFC ont été revues à la baisse, principalement en raison de leur coût. L'association avec le CO<sub>2</sub> est apparue comme un moyen important de limiter le recours au HFC dans certaines applications-clés.</li> <li>• Les mesures destinées à réduire l'utilisation des HFC de 50 % entre 2010 et 2015 conduiraient à la réduction des émissions d'environ 10 Mt éqCO<sub>2</sub> par an, puis à une remontée, à un coût de 15-100 dollars É.-U. par tonne.</li> <li>• Bien que l'efficacité de la récupération reste à prouver, particulièrement dans le secteur du bâtiment, cette pratique est déjà en place pour les équipements à 10-50 dollars É.-U. par tonne éqCO<sub>2</sub>. La réduction des émissions avoisinerait 7 Mt éqCO<sub>2</sub> par an en 2015. Cependant, ce potentiel pourrait s'accroître sensiblement sur la période 2030-2050, lorsqu'une grande partie des mousses de construction sera mise au rebut.</li> </ul>

Tableau RT-9. (5) (suite)

Secteur	Description et statut du secteur	Statut des émissions, tendances dans le scénario de la poursuite des activités et perspectives de réduction des émissions
<b>Aérosols médicaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>L'asthme et les broncho-pneumopathies obstructives chroniques sont des maladies graves qui touchent plus de 300 millions de personnes de par le monde. Les inhalateurs doseurs constituent le principal traitement. Les inhalateurs à poudre sèche qui ne contiennent pas de propulseurs sont de plus en plus largement commercialisés, mais ne conviennent pas à tous les patients et sont plus chers.</li> </ul>	<p><u>Statut des émissions et tendances dans le scénario de la poursuite des activités</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Les émissions extrapolées pour ce secteur d'ici 2015 sont d'environ 40 Mt <math>\text{eqCO}_2</math> par an selon le scénario de la poursuite des activités.</li> <li>Aucun progrès majeur n'est attendu sur le marché des médicaments en aérosol dans les 10–15 prochaines années, compte tenu de l'état actuel des technologies et de l'échelle temporelle de développement dont il est question.</li> </ul> <p><u>Perspectives de réduction des émissions</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Le principal impact de la réduction des émissions de GES en ce qui concerne les inhalateurs doseurs est la fin de la transition des CFC aux HFC au-delà de la tendance dégagée par un scénario de poursuite des activités (17 Mt <math>\text{eqCO}_2</math>/an en 2015).</li> <li>La santé et la sécurité du patient sont des enjeux primordiaux dans le choix d'un traitement et dans les protocoles qui peuvent influencer ces choix. Cela peut limiter le recours aux inhalateurs à poudre sèche.</li> <li>En effet, si hypothétiquement la molécule la plus inhalée – à savoir le salbutamol – passait d'un conditionnement en inhalateur doseur à un inhalateur à poudre sèche, conduisant à une réduction modeste d'environ 10 Mt <math>\text{eqCO}_2</math> par an, les coûts récurrents annuels avoisineraient les 1,7 milliards de dollars É.-U. tandis que le coût effectif de la diminution serait de 150-300 dollars É.-U. par t <math>\text{eqCO}_2</math>.</li> </ul>
<b>Protection contre l'incendie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>75 % des halons initialement utilisés ont déjà été remplacés par des agents sans impact climatique. 4 % des applications initialement aux halons perdurent. Les 21 % restants sont passés aux HFC et, dans une faible proportion, aux PFC et aux HCFC.</li> <li>Les HFC et les gaz inertes sont devenus les agents gazeux les plus répandus et ont atteint un certain équilibre en termes d'applications et de part de marché.</li> <li>Une nouvelle fluorocétone avec un impact climatique quasi nul a été commercialisée mais il est encore impossible de quantifier son adoption.</li> </ul>	<p><u>Statut des émissions et tendances dans le scénario de la poursuite des activités</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Les émissions extrapolées pour ce secteur d'ici 2015 sont d'environ 5 Mt <math>\text{eqCO}_2</math> par an selon le scénario de la poursuite des activités (hors halons).</li> <li>Le coût reste le principal frein à l'adoption des HFC, HCFC et PFC sur les extincteurs mobiles par rapport à ceux plus traditionnels utilisant du <math>\text{CO}_2</math>, des poudres ou de l'eau. Les PFC ne constituent actuellement qu'un composant infime, mélangé au HCFC.</li> </ul> <p><u>Perspectives de réduction des émissions</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Les halons et les HFC sont les seules options disponibles dans de nombreuses applications fixes lorsqu'il faut tenir compte de la sécurité, de l'espace, du poids, du coût, du délai d'extinction et de certaines capacités particulières, comme la possibilité de fonctionner à très basse température ou sur des véhicules et navires militaires. Les PFC et HCFC n'offrent aucun avantage par rapport à ces solutions. Une nouvelle fluorocétone ayant un faible PRG, mais qui n'a pas encore été testée dans des applications spécifiques, offrira une autre alternative dans l'avenir, permettant de réduire l'impact climatique mais avec un surcoût. Compte tenu de la durée des procédures de test, d'homologation et d'adoption des nouveaux agents et types d'équipements de protection contre l'incendie, aucune autre option n'est susceptible d'offrir un impact favorable d'ici 2015.</li> <li>Lorsque ce sera possible, l'utilisation d'agents sans impact climatique permettra de réduire les émissions de GES dans ce secteur, à condition qu'ils répondent aux contraintes spécifiques à la protection contre l'incendie de manière rentable.</li> <li>La gestion des stocks de halons, de HFC, de HCFC et de PFC nécessite une attention particulière de sorte que des incitations économiques sont déployées pour veiller à ce que les intentions politiques – notamment en termes d'obligation de déclassement – soient atteintes.</li> <li>La mise en œuvre de pratiques de gestion impliquant un agent responsable réduira les émissions annuelles des stocks des systèmes fixes de <math>2 \pm 1</math> % et de ceux des systèmes portables de <math>4 \pm 2</math> %.</li> </ul>

Tableau RT-9. (6) (suite)

Secteur	Description et statut du secteur	Statut des émissions, tendances dans le scénario de la poursuite des activités et perspectives de réduction des émissions
<b>Aérosols non médicaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ce secteur regroupe les aérosols techniques, sécuritaires, grand public et fantaisie.</li> <li>Plus de 98 % de ces aérosols dans les pays industrialisés sont passés des CFC à des substituts moins nocifs pour l'ozone et le climat.</li> <li>Le secteur dans lequel prédominent les HFC, hormis les aérosols médicaux, est celui des produits ménagers dans lesquels le gaz sous pression sert à repousser les particules présentes sur les surfaces ou les appareils.</li> </ul>	<p><u>Statut des émissions et tendances dans le scénario de la poursuite des activités</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Les émissions extrapolées pour ce secteur d'ici 2015 sont d'environ 23 Mt éqCO<sub>2</sub> par an selon le scénario de la poursuite des activités.</li> </ul> <p><u>Perspectives de réduction des émissions</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Le potentiel de réduction est incertain mais estimé relativement faible.</li> <li>Le remplacement du HFC-134a par le HFC-152a dans les aérosols ménagers techniques est la principale option pour la réduction des émissions de GES. Pour les nettoyeurs pour contacts et les agents de démoulage du plastique, le passage des HCFC aux HFE et HFC avec un plus faible PRG ouvre une perspective de réduction des émissions. Les aérosols de défense, dans lesquels propulseurs et composants inflammables ne peuvent être utilisés, font toujours appel au HFC-134a ininflammable. Certains pays ont interdit l'usage des HFC dans les aérosols fantaisie. Le HFC-134a reste cependant utilisé dans de nombreux pays pour des raisons de sécurité.</li> </ul>
<b>Solvants</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Avant le Protocole de Montréal, le CFC-113 et le méthylchloroforme étaient largement utilisés comme solvants de nettoyage des métaux et composants électroniques, pour le nettoyage de précision et les textiles. Les SAO utilisées alors ont été éliminées ou considérablement réduites. La plupart des applications de nettoyage font désormais appel à des substituts de remplacement. Une petite proportion est passée ou va passer aux HFC ou aux HFE. L'utilisation des PFC est en déclin et devrait disparaître d'ici 2025.</li> </ul>	<p><u>Statut des émissions et tendances dans le scénario de la poursuite des activités</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Les émissions extrapolées pour ce secteur d'ici 2015 sont d'environ 14 Mt éqCO<sub>2</sub> par an selon le scénario de poursuite des activités.</li> </ul> <p><u>Perspectives de réduction des émissions</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Différents solvants organiques peuvent remplacer les HFC, PFC et SAO dans diverses applications.</li> <li>Ces fluides de remplacement incluent des composants à faible PRG, comme les solvants chlorés traditionnels, les hydrofluoroéthères (HFE) et le bromure de polypropyle. De nombreuses technologies de remplacement, dont les solvants oxygénés ou à hydrocarbures, sont également des alternatives viables pour certaines applications.</li> <li>La sécurité, notamment la toxicité, joue un rôle important dans le choix des solvants. La précaution est de mise avant l'adoption de toute option dont le profil toxicologique n'est pas complet.</li> <li>Les solvants aux HFC sont principalement utilisés dans les applications spécifiques à haut degré de technicité, et dans certains pays seulement. Leur utilisation tend à se limiter aux applications critiques où aucun substitut n'est possible. Leur consommation devrait décliner dans l'avenir.</li> <li>L'usage de solvants au PFC est limité à certaines niches, compte tenu de leur faible pouvoir solvant, de leur coût élevé et de leur possible remplacement par des solvants à plus faible PRG.</li> <li>L'amélioration du confinement est importante dans les utilisations existantes car l'optimisation des équipements peut réduire la consommation des solvants jusqu'à 80 % dans certains cas. Compte tenu de leur coût élevé et de la facilité de purification au cours du recyclage, les solvants fluorés peuvent être, et sont souvent, récupérés et réexploités.</li> </ul>
<b>Sous-produit HFC-23</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le HFC-23 est un produit annexe issu de la production du HCFC-22</li> <li>Bien que la production de HCFC-22 pour les utilisations directes s'arrête dans les pays développés, et sera stoppée ultérieurement dans les pays en développement, sa production en tant que matière première devrait continuer à croître.</li> </ul>	<p><u>Statut des émissions et tendances dans le scénario de la poursuite des activités</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Les émissions extrapolées pour ce secteur d'ici 2015 sont d'environ 332 Mt éqCO<sub>2</sub> par an selon le scénario de la poursuite des activités.</li> <li>La limite supérieure des émissions de HFC-23 se situe à 4 % de la production de HCFC-22. L'optimisation des processus peut permettre de réduire les émissions moyennes à 2 % ou moins. Cependant, la réduction réelle dépend des sites.</li> </ul> <p><u>Perspectives de réduction des émissions</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>La capture et la destruction du HFC-23 par oxydation thermique constituent une option très efficace pour réduire les émissions à des coûts spécifiques inférieurs à 0,2 dollars É.-U. par t éqCO<sub>2</sub>. Les émissions peuvent être réduites à plus de 90 %.</li> </ul>

### 3.7 Quels sont les instruments politiques existants permettant d'encadrer la réduction des émissions des GES traités dans ce rapport?

Comme l'aborde le troisième Rapport d'évaluation du GIEC, il existe un grand nombre de politiques, de mesures et d'instruments permettant de réduire les émissions à effet de serre, notamment:

- Par voie réglementaire – comme des normes de performances ou de technologies obligatoires ou l'interdiction de certains produits;
- Par des incitations financières – comme la fiscalisation des émissions, de la production, de l'importation ou de la consommation, les subventions et investissements publics directs, les systèmes de consignation, les licences cessibles ou non cessibles;
- Par des accords volontaires.

La majeure partie des types d'instruments cités ci-avant ont été envisagés ou mis en œuvre pour réduire l'utilisation ou les émissions de SAO et de leurs substituts, comme les HFC et les PFC. Par ailleurs, les politiques générales sur l'énergie et le climat affectent les émissions à effet de serre indirectes des applications avec des SAO, leurs substituts ou les options de remplacement. En outre, des politiques spécifiques destinées à réduire les émissions à effet de serre des substituts aux SAO (HFC, PFC) ont été formulées. Voir les exemples cités dans le tableau RT-10.

### 3.8 Que dire à propos de la future disponibilité des HFC/PFC aux fins de leur utilisation dans les pays en développement?

Aucune projection des capacités de production à venir n'a été publiée. Cependant, comme il n'existe aucune limitation technique ou légale à la production de HFC et de PFC, on peut supposer que la capacité mondiale de production continuera de manière globale à satisfaire voire excéder la demande. La production future est donc calculée dans ce rapport en cumulant la demande des différents secteurs.

Selon le scénario de la poursuite des activités, la capacité de production mondiale devrait s'accroître, surtout dans les pays en développement et par le biais de coentreprises. La capacité mondiale de production des HFC et PCF dépasse le plus souvent la demande actuelle. Il existe de nombreuses usines de HFC-134a dans les pays développés et une seule dans les pays en développement, d'autres étant planifiées. Pour les autres HFC, les quelques usines existantes sont concentrées quasiment exclusivement dans les pays développés. L'élimination proposée par l'Union européenne du HFC-134a dans les climatiseurs mobiles des voitures neuves et le programme volontaire de l'industrie visant à réduire les émissions de HFC-134a de 50 % se répercuteront sur la demande ainsi que sur la capacité et le volume de production. L'expansion rapide des marchés dans les pays en développement, en particulier pour le remplacement des CFC, crée de nouveaux débouchés pour les gaz fluorés, la demande étant actuellement satisfaite par l'expansion de la capacité de production de HCFC-22 et 141b. [11]

**Tableau RT-10.** Instruments disponibles pour la réduction des émissions à effet de serre des substituts aux SAO.

Type d'instrument	Exemples spécifiques
Réglementations	<p>Normes de performances obligatoires: Plusieurs pays ont mis en place des normes de rendement énergétique et d'étanchéité, notamment dans les secteurs de la réfrigération et de la climatisation. Nombreux sont ceux qui ont également légiféré sur l'interdiction des dégazages et l'obligation de recyclage mais ces réglementations sont souvent difficiles à mettre en œuvre. Pour être appliquées correctement, elles doivent en effet s'accompagner de programmes d'homologation complémentaires et d'une formation obligatoire des techniciens. Les normes en matière d'émissions des véhicules (comme la limitation du volume de GES émis par les véhicules de tourisme, au niveau du carburant comme de la climatisation) sont à l'étude (notamment en Californie).</p> <p>Obligation de faire appel à des entreprises agréées pour l'entretien des installations et des équipements (comme le programme «STEK» aux Pays-Bas).</p> <p>Interdictions et restrictions d'usage de substances spécifiques pour certaines applications: des programmes de retrait progressif des HFC sont en place ou à l'étude dans plusieurs pays, comme l'Autriche, le Danemark ou la Suisse. La directive européenne proposée vise à modifier la législation sur l'homologation CE des types de véhicules en introduisant un PRG-plafond pour les HFC utilisés dans les climatisations.</p> <p>Mesures de gestion en fin de vie, rendant par exemple obligatoire le recyclage et interdisant les dégazages.</p>
Incitations financières et mécanismes du marché	<p>Les coûts relatifs des HFC/PFC et des autres options de substitution aux SAO vont influencer le choix des utilisateurs comme des producteurs de ces substances. Les HFC et les PFC, modèles chimiques complexes, ont tendance à être plus onéreux que les SAO qu'ils remplacent. Cela encourage la substitution par des options d'autres natures. Les incitations financières peuvent encore creuser cet écart de coûts entre les substances et les technologies.</p> <p>Plusieurs pays perçoivent des consignes ou des taxes sur l'importation et la production de HFC. Cela augmente le coût de ces produits, incitant au confinement et favorisant le recyclage.</p> <p>Les réductions d'impôts pour le dépôt des HFC et PFC usagés auprès de centres de destruction constituent une incitation à la minimisation des émissions. En Norvège, cette réduction s'élève à 183 couronnes, soit 26 dollars É.-U. par t éqCO<sub>2</sub>.</p> <p>Subventions: outre les subventions internationales issues du Fonds multilatéral du Protocole de Montréal et, par exemple, du Fonds pour l'environnement mondial, les administrations nationales soutiennent financièrement la recherche et le développement, ainsi que la mise en œuvre de nouvelles technologies à faibles émissions de GES.</p> <p>Ainsi, une subvention de 50 % sur le coût de collecte et de destruction des halons et des CFC a été établie aux Pays-Bas afin de décourager les dégazages, juste avant que les stocks de ces substances ne soient légalement interdits en 2004.</p> <p>La réduction des émissions de HFC et de PFC peut également être financée par le Mécanisme pour un développement propre du Protocole de Kyoto. De tels projets ont d'ores et déjà été déployés en Corée et en Chine; d'autres sont en cours de développement en Inde et au Mexique.</p> <p>Les sources importantes de HFC peuvent être incluses dans des systèmes d'échanges de quotas d'émission. À l'heure actuelle, ces sources (comme les émissions de HFC-23 à la production de HCFC-22) ne sont généralement pas incluses dans de tels systèmes, à l'exception notable du système anglais. La surveillance de l'utilisation et des émissions de telles substances peut être moins pratique pour les sources d'émissions plus diffuses.</p>
Volontariat	<p>Il existe plusieurs programmes d'utilisation responsable et de réduction des émissions, soutenus par les administrations ou les industries. L'adhésion à des principes d'utilisation responsable peut conduire à la réduction des émissions de HFC au-delà des projections actuelles. Ces principes incluent:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'utilisation des HFC uniquement dans les applications où ils présentent un avantage sécuritaire, énergétique, environnemental, économique ou de santé publique;</li> <li>• La limitation des émissions de HFC au plus bas niveau possible au cours de la fabrication, l'utilisation et la mise au rebut des équipements et des produits;</li> <li>• La sélection, si des HFC doivent être utilisés, d'un composant ou d'un système ayant le plus faible impact climatique parmi ceux répondant aux autres spécifications de l'application.</li> </ul> <p>Des consignes de bonne pratique ont été élaborées pour la sélection et l'entretien des équipements, y compris sur le confinement des substances et leur récupération pendant les entretiens et en fin de vie.</p>

## 4. Découvertes majeures dans les secteurs exploitant des SAO et leurs substituts

### 4.1 Quelles sont les découvertes majeures dans le secteur de la réfrigération?

Les frigorigènes sont les plus gros contributeurs aux émissions à effet de serre directes. Dans ce rapport, le secteur de la réfrigération est organisé selon les sous-secteurs suivants: réfrigération résidentielle, réfrigération commerciale, réfrigération industrielle, agroalimentaire et stockage froid et enfin, transport réfrigéré. Les secteurs de la climatisation fixe et mobile, résidentielle et commerciale sont présentés dans des sections distinctes (4.2 et 4.3) de ce résumé technique. Le tableau RT-11 présente la décomposition détaillée des stocks et des émissions à effet de serre directes de tous les secteurs utilisant des frigorigènes.

Les cinq options générales pour réduire les émissions directes du secteur de la réfrigération sont les suivantes:

- Amélioration du confinement, par des systèmes plus étanches;
- Récupération, recyclage et destruction des frigorigènes pendant la maintenance et en fin de vie des équipements;
- Application de systèmes à charge réduite impliquant:
  - o L'allègement de la charge en frigorigène par unité de capacité de refroidissement,
  - o La réduction de la demande en capacités de réfrigération;
- Utilisation de frigorigènes de substitution ayant un potentiel de réchauffement global réduit ou négligeable – hydrocarbures (HC), dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), ammoniac, etc;
- Technologies de remplacement.

Ces principes s'appliquent de la même façon aux secteurs de la climatisation fixe et mobile.

#### 4.1.1 Réfrigération résidentielle

Les réfrigérateurs et congélateurs résidentiels servent à la conservation alimentaire dans les foyers et dans les lieux non commerciaux (comme les bureaux) à travers le monde. La production annuelle dépasse les 80 millions d'unités, dont la capacité varie entre 20 et 850 litres. Avec une durée de vie moyenne estimée à 20 ans, cela signifie que le parc des appareils existants compte environ 1,5 milliard d'unités. Suite au Protocole de Montréal, les fabricants ont initié le retrait des applications à base de CFC frigorigène au début des années 90. Cette transition est désormais terminée dans les pays industrialisés et a fait des progrès marquants dans les pays en développement. Toutefois, compte tenu de la durée de vie moyenne des réfrigérateurs domestiques, le parc existant se compose encore essentiellement d'appareils à base de CFC-12. Cela retarde donc considérablement la réduction de la demande de CFC-12 dans le secteur de la maintenance.

L'isobutane (HC-600a) et le HFC-134a sont les deux principaux frigorigènes de substitution du CFC-12 dans les nouveaux équipements (voir le tableau RT-12). Ils ont chacun prouvé qu'il était possible de les produire en masse à des fins d'utilisation économique, fiable, efficace et sûre. Ils se révélèrent aussi d'un rendement similaire. Des études indépendantes ont conclu que

la conception du produit représente un facteur de variation plus important sur ce rendement que la nature du frigorigène. Le choix de ce dernier doit s'articuler autour des critères sécuritaires, environnementaux, fonctionnels, économiques et de rendement. Il est en outre considérablement influencé par les réglementations locales et les dispositions en matière de litige. Chaque appareil contient entre 50 et 250 g de frigorigène confiné dans un système hermétiquement soudé en usine. Pour résumer simplement les questions techniques liées à ces deux frigorigènes:

- Le HC-600a utilise une huile minérale bien connue comme lubrifiant du système hermétique. Les processus de fabrication et la conception doivent tenir compte de la nature inflammable de ce frigorigène. Cela se répercute notamment sur la ventilation et l'équipement électrique de l'usine, la prévention des fuites et de l'accès aux composants électriques, l'utilisation de composants électriques soudés, sans étincelle, lorsqu'il y a accessibilité au frigorigène libéré, et l'utilisation de techniques de brasage appropriées ou, dans la mesure du possible, l'absence de toute soudure sur les systèmes chargés. Les procédures de maintenance sur site doivent également tenir compte de cette inflammabilité du frigorigène.
- Le HC-134a utilise une huile d'ester de polyol hydrosensible comme lubrifiant du système hermétique. Les processus de fabrication et les procédures de maintenance doivent veiller au respect d'une hygrométrie basse. La fiabilité à long terme nécessite d'éviter les contaminants au cours de la production et de la maintenance, dans des proportions supérieures aux précautions prises avec les CFC-12 et HC-600a.

L'utilisation de mélanges propane (HC-290)/isobutane (HC-600a) permet d'obtenir une capacité volumétrique comparable au CFC-12 et d'éviter le surcoût d'une reconfiguration des compresseurs. Ces mélanges se traduisent cependant par une sophistication de la fabrication et nécessitent des techniques de chargement adaptées compte tenu des différents points d'ébullition des gaz impliqués. Leur application en Europe pendant les années 90 a constitué une étape transitoire vers le HC-600a avec des compresseurs réétudiés. Les enjeux sécuritaires liés aux mélanges d'hydrocarbures sont les mêmes qu'avec l'isobutane pur.

D'autres technologies de refroidissement – cycle de Stirling, cycle à absorption et systèmes thermoélectriques, thermoélectroniques et thermoacoustiques – sont toujours à l'étude pour des applications ou des situations particulières, dans des environnements différents de la réfrigération résidentielle traditionnelle. Ces alternatives ne devraient pas altérer notablement la position des systèmes à compression qui domineront toujours ce secteur.

Cette technologie est en effet bien établie et déjà disponible partout dans le monde. Les équipements actuellement conçus, à base de HC-600a ou de HFC-134a, consomment généralement 50 % d'électricité en moins que les équipements qu'ils remplacent. Ce gain de performances n'entraîne cependant pas de surcoût ou de sophistication de la conception. On envisage en outre une poursuite des améliorations en termes de performances et de rendement énergétique des nouveaux appareils.

**Tableau RT-11.** Stocks de frigorigènes et émissions directes de CFC, HCFC, HFC et autres substances (hydrocarbures, ammoniac et dioxyde de carbone) en 2002, scénarios de poursuite des activités et de réduction jusqu'en 2015 pour les secteurs de la réfrigération, du chauffage et de la climatisation fixes et mobiles, de nature commerciale et résidentielle.

	Stocks (kt)					Émissions (kt/an)					Émissions (Mt éqCO <sub>2</sub> /an) selon DRE/TRE <sup>b</sup>	Émissions (Mt éqCO <sub>2</sub> /an) selon le rapport <sup>c</sup>
	CFC	HCFC	HFC	Autres	Total	CFC	HCFC	HFC	Autres	Total		
<b>2002</b>												
Réfrigération	330	461	180	108	1 079	71	132	29	18	250	848	1 060
– résidentielle	107	-	50	3	160	8	-	0,5	0,04	9	69	91
– commerciale	187	316	104	-	606	55	107	23	-	185	669	837
– industrielle <sup>a</sup>	34	142	16	105	298	7	24	2	18	50	92	110
– des transports	2	4	10	-	16	1	1	3	-	6	19	22
Climatisation fixe	84	1 028	81	1	1 194	13	96	6	0,2	115	222	271
Climatisation mobile	149	20	249	-	418	60	8	66	-	134	583	749
<b>Total 2002</b>	<b>563</b>	<b>1 509</b>	<b>509</b>	<b>109</b>	<b>2 691</b>	<b>144</b>	<b>236</b>	<b>100</b>	<b>18</b>	<b>499</b>	<b>1 653</b>	<b>2 080</b>
<b>Scénario de poursuite des activités jusqu'en 2015</b>												
Réfrigération	64	891	720	136	1 811	13	321	115	21	471	919	1 097
– résidentielle	37	-	189	13	239	5	-	8	1	13	51	65
– commerciale	6	762	425	-	1 193	5	299	89	-	393	758	902
– industrielle <sup>a</sup>	21	126	85	123	356	4	21	11	21	56	88	104
– des transports	0,1	2,8	20,3	-	23,2	0,1	1,3	7,4	-	9	22	26
Climatisation fixe	27	878	951	2	1 858	7	124	68	0	199	314	370
Climatisation mobile	13	23	635	4	676	5	11	175	1	191	281	315
<b>Total 2015</b>	<b>104</b>	<b>1 792</b>	<b>2 306</b>	<b>143</b>	<b>4 345</b>	<b>25</b>	<b>455</b>	<b>359</b>	<b>23</b>	<b>861</b>	<b>1 514</b>	<b>1 782</b>
<b>Scénario de réduction jusqu'en 2015</b>												
Réfrigération	62	825	568	186	1 641	8	202	52	15	278	508	607
– résidentielle	35	-	105	60	200	3	-	3	1	6	27	35
– commerciale	6	703	378	-	1 087	3	188	40	-	230	414	494
– industrielle <sup>a</sup>	21	120	65	126	331	3	13	5	14	36	53	63
– des transports	0,1	2,8	20,3	-	23,2	0,0	0,9	4,3	-	5	13	15
Climatisation fixe	27	644	1 018	2	1 691	3	50	38	0	91	145	170
Climatisation mobile	13	23	505	70	611	3	7	65	7	82	119	136
<b>Total 2015</b>	<b>102</b>	<b>1 493</b>	<b>2 090</b>	<b>259</b>	<b>3 943</b>	<b>14</b>	<b>259</b>	<b>155</b>	<b>22</b>	<b>451</b>	<b>772</b>	<b>914</b>

Notes:

<sup>a</sup> Avec l'agroalimentaire et le stockage froid.

<sup>b</sup> Émissions en équivalent CO<sub>2</sub> à effet de serre, à partir du potentiel de réchauffement global extrait du GIEC (1996, 2001) (Deuxième/Troisième Rapport d'évaluation – DRE/TRE).

<sup>c</sup> Émissions en équivalent CO<sub>2</sub> à effet de serre, à partir du potentiel de réchauffement global extrait du chapitre 2 du présent rapport.

**Tableau RT-12.** Réfrigération résidentielle: statut actuel et options d'abattement.

Configuration des produits	Paroi froide		Évaporateur à tubes ouvert	Sans givre
Capacité de refroidissement	De À	60 W 140 W	60 W 140 W	120 W 250 W
Charge de frigorigène (HFC)	De À	40 g 170 g	40 g 170 g	120 g 180 g
Pourcentage approximatif des stocks de frigorigènes du secteur (160 kt) dans la configuration		20 unités à 100 g moy. 18 % des 160 kt	15 unités à 100 g moy. 14 % des 160 kt	50 unités à 150 g moy. 68 % des 160 kt
Pourcentage approximatif des émissions de frigorigènes du secteur (8 950 tonnes) dans le sous-secteur		18 % des 8 950 tonnes	14 % des 8 950 tonnes	68 % des 8 950 tonnes
Technologie dominante		HC-600a	HFC-134a	HFC-134a
Autres technologies commercialisées		HFC-134a, CFC-12	HFC-600a, CFC-12	HFC-600a, CFC-12
Technologies à faible PRG avec un potentiel correct de substitution aux HCFC/HFC sur les marchés		HC-600a	HC-600a	HC-600a
Statut des options de remplacement		Développées et en production	Développées et en production	Développées et en production
Surcoût de production HC-600a		Aucun	3–5 dollars É.-U.	8–30 dollars É.-U.
Investissements		0	45–75 millions de dollars É.-U.	400–1 500 millions de dollars É.-U.
Réduction des émissions		1 432 tonnes	1 253 tonnes	6 086 tonnes

Les dispositions réglementaires et les conventions volontaires sur le rendement énergétique et les programmes de labels ont prouvé leur efficacité à promouvoir la commercialisation de produits plus performants dans plusieurs pays.

Les efforts consentis en matière de conception des produits, de fabrication et de maintenance vont permettre de réduire les émissions de frigorigènes pendant les phases de production et d'utilisation. Il faut néanmoins faire preuve de vigilance au niveau de la mise au rebut du vaste parc d'appareils contenant du CFC-12. Avec une durée de vie utile de 20 ans, c'est environ 5 % des appareils qui arrivent en fin de vie chaque année. Cela signifie qu'environ 75 millions des réfrigérateurs contenant chacun 100 g, soit globalement 7 500 tonnes de frigorigènes, sont mis au rebut tous les ans. Or, pendant encore au moins 10 ans, le frigorigène prédominant sera le CFC-12, alors que la petite charge en frigorigène de chaque appareil ne permet pas d'en justifier la récupération d'un point de vue économique. Les administrations de régulation à travers le monde ont donc mis en œuvre des incitations et des sanctions pour promouvoir la récupération de cette SAO.

Le taux d'émission annuel actuel (données de 2002) du HFC-134a des réfrigérateurs résidentiels représente 1,0 % pendant la phase d'utilisation du produit. Les émissions de HFC de la

réfrigération résidentielle sont évaluées à 480 tonnes en 2002, avec une augmentation à 7 800 tonnes en 2015 dans un scénario de poursuite des activités. Selon le scénario de réduction, les émissions en 2015 sont de 2 800 tonnes grâce à l'amélioration du confinement et de la récupération des frigorigènes. Le tableau RT-12 résume les perspectives d'abattement des émissions liées à l'augmentation de l'application du HC-600a. De la même manière, les surcoûts de production, ainsi que les dépenses d'investissement et de développement nécessaires à cette mise en œuvre sont présentés dans ce tableau pour les trois configurations les plus répandues.

#### 4.1.2 Réfrigération commerciale

La réfrigération commerciale regroupe trois types d'équipements: les équipements autonomes, les groupes frigorifiques et les rayonnages frigorifiques intégrés. Une grande variété de systèmes frigorifiques appartient au sous-secteur de la réfrigération commerciale – des congélateurs à glaces, avec une capacité de froid d'environ 200 W très similaire à celle des appareils domestiques, jusqu'aux chambres froides contenant plusieurs groupes de compresseurs qui consomment quelques centaines de kilowatts. Les frigorigènes les plus utilisés dans ce sous-secteur sont les HCFC-22, R-404A et HFC-134a.

En 2002, tous les types de frigorigènes stockés dans les équipements frigorifiques commerciaux – essentiellement des CFC, des HCFC et des HFC – représentaient 605 kt sur un total de 2 690 kilotonnes pour tous les systèmes de réfrigération et de climatisation et tous les types de frigorigènes, soit 22 % des stocks totaux de réfrigération et de climatisation.

Au niveau mondial, la réfrigération commerciale est le sous-secteur de la réfrigération provoquant les plus fortes émissions de frigorigènes, calculées en équivalent CO<sub>2</sub>, soit 40 % des émissions totales (de la réfrigération et la climatisation mobile et fixe). Les niveaux d'émission, y compris les émissions fugaces, les ruptures et les émissions en cours de maintenance et en fin de vie, sont généralement très élevés, spécialement dans les supermarchés et les hypermarchés. Plus la charge est élevée, plus le niveau d'émission est haut, du fait de la longueur de la tuyauterie et du nombre de raccordements et de valves, qui provoquent des émissions importantes en cas de rupture.

Les fuites de frigorigènes extrapolées selon l'approche ascendante suggèrent un taux d'émissions annuelles mondiales de 30 % de la charge stockée. Ces émissions représentent normalement 60 % des émissions totales à effet de serre provenant de l'exploitation des systèmes, le reste étant des émissions indirectes causées par la production d'énergie. Ces pourcentages indiquent à quel point il est important de réduire les émissions dans ce secteur.

Les fuites annuelles de frigorigènes ont été calculées à partir des résultats obtenus sur 1 700 systèmes frigorifiques intégrés aux États-Unis et en Europe. Ces valeurs se répartissaient sur une fourchette de 3 à 22 % de la charge, avec une moyenne à 18 %. On pourrait donc en déduire que, si l'estimation de 30 % à l'échelle mondiale est fiable, cette fourchette reflète la situation d'entreprises triées sur le volet dans des pays où des efforts sont déjà menés à bien pour réduire les émissions.

Les projections des émissions d'halocarbures frigorigènes selon les différents scénarios sont présentées dans le tableau RT-11. L'essor économique de certains pays en développement aura un impact notable sur la croissance des stocks et des émissions de frigorigènes.

Des réductions importantes des émissions totales, soit une amélioration de l'impact sur le climat au cours du cycle de vie, peuvent être obtenues par l'utilisation de frigorigènes comme les HFC, les hydrocarbures, l'ammoniac ou le CO<sub>2</sub>, par la réduction de la charge, un confinement plus efficace et une amélioration du rendement énergétique global, dès la conception des systèmes. Tout ceci est récapitulé dans le tableau RT-13. L'utilisation de frigorigènes toxiques ou inflammables soulève des questions sécuritaires, traitées par les réglementations nationales et parfois locales qui peuvent limiter l'ampleur d'application de ces réfrigérants.

Dans les systèmes frigorifiques intégrés des grandes surfaces, il est possible de réduire l'impact sur le climat au cours du cycle de vie jusqu'à 60 % par rapport aux systèmes directs centralisés de conception classique, par l'utilisation des frigorigènes de substitution, l'amélioration du confinement, le recours à des systèmes distribués, indirects ou en cascade.

Les résultats publiés indiquent que les solutions de remplacement présentent un surcoût initial de 0–35 % et une consommation d'énergie 0–20 % plus élevée que celle des systèmes actuels.

Le coût d'abattement des émissions de frigorigènes se situe entre 20 et 280 dollars É.-U./t éqCO<sub>2</sub><sup>19,20</sup>. Le développement de nouveaux systèmes se poursuit afin de réduire le coût et la consommation énergétique de ces systèmes, et ainsi continuer à diminuer les coûts d'abattement. La prise en compte d'une possible augmentation du rendement énergétique peut également entraîner des coûts d'abattement négatifs (donc des économies).

Pour les installations commerciales plus modestes, comme les équipements autonomes et les groupes frigorifiques (distributeurs, congélateurs à glaces, chambres froides, etc.), les multinationales ont commencé à exploiter, en remplacement des HFC, des produits ayant un PRG nul à faible (hydrocarbures et CO<sub>2</sub>) et des variantes technologiques, qui promettent des émissions directes réduites et des émissions indirectes plus faibles ou comparables.

#### 4.1.3 Agroalimentaire, stockage froid et réfrigération industrielle

L'agroalimentaire et le stockage froid représentent l'une des applications importantes de la réfrigération. Il s'agit de la conservation et de la distribution des aliments assurant l'intégrité des nutriments. Cette application est très conséquente en volume et revêt une grande importance économique dans tous les pays, y compris ceux en développement. Elle regroupe les secteurs du stockage frigorifique (entre –1 et –10 °C), la surgélation (entre –30 et –35 °C) et la conservation à long terme des produits surgelés (entre –20 et –30 °C). Le volume de l'ultra-frais est entre 10 et 12 fois supérieur à celui des produits surgelés.

La majorité des systèmes frigorifiques de ce secteur fonctionnent à l'aide de compresseurs à piston ou de compresseurs rotatifs à vis. L'ammoniac, le HCFC-22, le R-502 et le CFC-12 sont les frigorigènes habituellement utilisés. Les HFC commencent à remplacer le CFC-12, le R-502 et le HCFC-22 dans certaines régions. Parmi ces gaz, la préférence va au HFC-134a et aux mélanges de HFC avec de faibles variations thermiques comme le R-404A, le R-507A et le R-410A. Il existe également des systèmes à l'ammoniac/CO<sub>2</sub> en cascade ainsi qu'aux hydrocarbures qui constituent les premiers frigorigènes des systèmes indirects.

On manque cependant de données sur les indices TEWI et LCCP dans cette catégorie. Une étude récente des performances des systèmes a montré qu'il y avait peu de différence entre des systèmes frigorifiques à 11 kW fonctionnant avec du R-404A, du R-410A ou du HC-290 au niveau de l'indice LCCP, selon les hypothèses de calcul utilisées.

Un complément d'information sur les options de réduction des fuites et des émissions de frigorigènes dans le secteur total de l'agroalimentaire, du stockage froid et de la réfrigération industrielle est proposé à la fin de la section suivante.

<sup>19</sup> Les coûts dans ce rapport sont exprimés en dollars des États-Unis d'Amérique (dollars É.-U.). Ils datent de 2002, sauf mention contraire.

<sup>20</sup> Les coûts présentés concernent uniquement les réductions des émissions directes. La prise en compte des améliorations du rendement énergétique peut produire des coûts négatifs, soit des économies.

**Tableau RT-13.** Synthèse sectorielle concernant la réfrigération commerciale: statut actuel et options d'abattement.

Sous-secteur	Équipements autonomes	Groupes frigorifiques	Système frigorifique intégré				
			Centralisé direct	Centralisé indirect	Distribué	Mixte	
Capacité de refroidissement	De À	0,2 kW 3 kW	2 kW 30 kW	20 kW > 1 000 kW			
Charge de frigorigène	De À	0,5 kg ~2 kg	1 kg 15 kg	100 kg 2 000 kg	20 500 kg	* *	* *
Pourcentage approximatif des stocks de frigorigènes du secteur dans le sous-secteur		11 % de 606 kt	46 % de 606 kt	43 % de 606 kt	* D'autres options dans ces catégories sont déjà commercialisées mais, le nombre de systèmes étant limité, elles ne sont évoquées que comme options ci-dessous.		
Pourcentage approximatif des émissions de frigorigènes du secteur dans le sous-secteur		3 % de 185 kt	50 % de 185 kt	47 % de 185 kt			
Stocks de frigorigènes en 2002 – Pourcentage du poids	CFC = 33 %; HCFC = 53 %; HFC = 14 %						
Taux d'émission de charge annuel moyen	30 %						
Sous-secteur	Équipements autonomes	Groupes frigorifiques	Centralisé direct	Centralisé indirect	Distribué	Mixte	
<b>Technologies à indice LCCP réduit</b>	<b>HFC amélioré</b> DI/ND	<b>HFC amélioré</b> DI/ND	<b>HFC amélioré</b> REm 30 % ChUE 0 % ChCt 0±10 %	<b>Ammoniac</b> REm 100 % ChUE 0-20 % ChCt 20-30 %	<b>HFC</b> REm 75 % ChUE 0-10 % ChCt 0-10 %	<b>HFC/CO<sub>2</sub> en cascade</b> REm 50-90 % ChUE 0 % ChCt 0-15 %	
		<b>R-410A</b> REm 100 %	<b>CO<sub>2</sub> (tous)</b> REm 100 % ChUE 0±10 % ChCt 0±10 %	<b>HC économisé</b> ChUE 0-20 % ChCt 20-30 %	<b>R-404A CO<sub>2</sub> en</b> DI/ND	<b>Ammoniac/cascade</b> DI/ND	
	<b>HC</b> DI/ND	<b>HC</b> DI/ND		<b>HFC</b> REm 50-90 % ChUE 0-20 % ChCt 10-25 %	<b>R-404A économisé</b> DI/ND	<b>HC/CO<sub>2</sub> en cascade</b> DI/ND	
	<b>CO<sub>2</sub></b> DI/ND	<b>CO<sub>2</sub></b> DI/ND			<b>CO<sub>2</sub></b> DI/ND		
Potentiel de réduction du LCCP (en utilisant le facteur d'émission planétaire moyen pour la production électrique)	DI/ND		35-60 %				
Estimation du coût d'abattement (durée de vie 10 ans, taux d'intérêt 10 %)	DI/ND		20-280 dollars É.-U. par tonne d'équivalent CO <sub>2</sub> réduit.				

Notes:

REm (%): Réduction des émissions directes (par rapport aux systèmes installés)

ChUE (%): Changement dans l'utilisation de l'énergie (+ ou -) (par rapport à la situation actuelle)

ChCt (%): Changement au niveau du coût (+ ou -) (par rapport à la situation actuelle)

DI/ND: Données sur la réduction des émissions, l'utilisation de l'énergie ou les changements dans les coûts insuffisantes ou non disponibles dans la documentation existante

**La réfrigération industrielle** regroupe diverses applications de réfrigération et de congélation, comme celles des industries chimiques et pétrochimiques, de la production de glace à vocation industrielle et récréative et de la liquéfaction de l'air. La plupart des systèmes s'appuient sur des cycles à compression, avec des températures d'évaporation entre 15 °C et -70 °C. Les applications cryogéniques fonctionnent même à des températures encore plus basses. La capacité de ces appareils varie de 25 kW à 30 MW, ces systèmes étant généralement conçus sur mesure et construits sur site. Les frigorigènes généralement employés sont des monocomposants ou des azéotropes car de nombreux systèmes utilisent des évaporateurs noyés pour obtenir de hauts rendements. Certaines configurations s'appuient sur des systèmes indirects avec fluides caloporteurs pour réduire la charge en frigorigène et/ou réduire le risque de contact direct avec ce dernier.

Ces systèmes sont généralement situés sur des sites industriels auxquels le public a peu accès. L'ammoniac est le produit dominant et en pleine croissance, suivi en volume par le HCFC-22 bien que ce dernier soit interdit dans les nouveaux systèmes par la réglementation européenne depuis janvier 2001 dans tous les équipements frigorifiques. Les CFC frigorigènes (CFC-12 et R-502) plus modestes en volume sont remplacés par le HFC-134a et les mélanges R-404A, R-507A et R-410A. Les CFC-13 et R-503 sont remplacés par le HFC-23 et les mélanges R-508A et R-508B. Le HCFC-22 est remplacé par le R-410A dont le rendement énergétique est légèrement supérieur et dont la température d'évaporation atteint -40 °C, à l'instar de l'ammoniac. Les hydrocarbures sont des frigorigènes qui ont été traditionnellement utilisés dans les grandes implantations frigorifiques de l'industrie pétrochimique.

Le CO<sub>2</sub> est en train de se faire une place dans ce sous-secteur, comme réfrigérant à faible température et dans les systèmes en cascade, l'ammoniac en phase haute et le CO<sub>2</sub> en phase basse. Le rendement énergétique des systèmes au CO<sub>2</sub> est similaire à celui des systèmes au HCFC-22, à l'ammoniac et au R-410A, dans la fourchette d'évaporation comprise entre -40 et -50 °C. Le CO<sub>2</sub> est également exploité dans les systèmes indirects comme fluide caloporteur.

Les fuites annuelles de frigorigènes dans les systèmes industriels sont estimées entre 7 et 10 %, tandis que celles cumulées de l'agroalimentaire, du stockage froid et de la réfrigération industrielle représentaient 17 % des stocks de produits dans ces systèmes en 2002. Ce stock est constitué à 35 % d'ammoniac et

43 % de HCFC-22 (en masse), le reste regroupant CFC, HFC et hydrocarbures. La répartition en 2002 entre les principaux frigorigènes et leurs émissions dans ce secteur total est présentée dans le tableau RT-14.

Les options de réduction des émissions consistent à utiliser des frigorigènes ayant de plus faibles PRG, à améliorer la conception des systèmes et de leur fonctionnement pour réduire la charge de produit, à améliorer le confinement et la récupération du frigorigène et à améliorer le rendement énergétique par de nouvelles configurations. Le calcul de l'impact sur le climat au cours du cycle de vie permet de choisir le frigorigène en meilleure connaissance de cause et de concevoir un système dont l'influence sur l'environnement est minimisée. Selon les calculs, le coût d'abattement des émissions de frigorigènes dans le secteur de la réfrigération industrielle se situerait entre 27 et 37 dollars É.-U./t éqCO<sub>2</sub> (avec un taux d'actualisation annuel de 8 %).

#### 4.1.4 Transport réfrigéré

Ce sous-secteur couvre les systèmes permettant le transport, par route, rail, mer et air, des produits ultra frais ou surgelés. Plusieurs types de configurations existent, notamment les bateaux réfrigérés ou les conteneurs frigorifiques autonomes qui peuvent ensuite être transportés par mer, rail ou route, ou encore les camions ou fourgons réfrigérés. Ce sous-secteur couvre ainsi également l'utilisation de la réfrigération dans les bateaux de pêche où les systèmes frigorifiques servent au traitement et au stockage des poissons.

Les impératifs techniques du transport frigorifique sont plus stricts que ceux des autres applications de la réfrigération. Les équipements doivent supporter de plus grandes variations des températures ambiantes et des conditions météorologiques (rayonnement solaire, pluie, etc.). Ils doivent être en mesure de supporter des chargements très hétéroclites avec des spécifications thermiques très différentes et être suffisamment robustes et fiables pour faire face aux conditions souvent rudes du monde du transport. Malgré cette robustesse, les systèmes de réfrigération des transports subissent des fuites liées aux vibrations, aux chocs et aux collisions avec d'autres objets, ainsi qu'à l'érosion de l'eau salée. Il est donc essentiel de s'assurer qu'il n'y a aucun risque entre les fluides en présence, surtout lorsqu'il n'est pas facile d'évacuer le frigorigène en cas de fuite, par exemple sur les bateaux. La sécurité doit être au cœur du choix

**Tableau RT-14.** Agroalimentaire, stockage froid et réfrigération industrielle (2002).

	CFC (CFC-12 et R-502)	HCFC-22	NH <sub>3</sub>	HFC (HFC-134a, R-404A, R-507A, R-410A)
Capacité de refroidissement	25 kW-1 000 kW	25 kW-30 MW	25 kW-30 MW	25 kW-1000 kW
Émissions (t/an)	9 500	23 500	17 700	1 900
Réfrigérants en stock (t)	48 500	127 500	105 300	16 200
Émissions (%/an)	14 %	18 %	17 %	12 %

des fluides et être assurée par un certain nombre de mesures techniques. Il faut aussi veiller à la continuité en matière de maintenance, les équipements de transport pouvant nécessiter une intervention un peu partout à travers le monde.

Ces systèmes frigorifiques utilisent généralement du CFC-12, du R-502, du HCFC-22, du HFC-134a, du R-404A, du R-507A, du R-410A et du R-407C. Des options à plus faible PRG – comme l'ammoniac, les hydrocarbures, l'association ammoniac/CO<sub>2</sub> –

ont été commercialisées dans certaines applications à compression. Certains secteurs (la route, le rail et les airs) utilisent aussi le CO<sub>2</sub> à l'état solide, liquide ou de glace carbonique. Le tableau RT-15 propose un panorama des différentes applications utilisées, ainsi que du stade de développement des options de remplacement. Le stock de frigorigènes est actuellement estimé à 3 300 tonnes de CFC, 3 200 tonnes d'HCFC-22 et 9 500 tonnes d'HFC et de mélanges. Ce stock total devrait passer de 16 000 tonnes actuellement à 23 200 tonnes en 2015

**Tableau RT-15.** Réfrigération des transports, caractéristiques et options de remplacement.

Sous-secteur		Transport maritime et pêche	Transport routier	Transport ferroviaire	Transport en conteneurs
Capacité de refroidissement	De À	5 kW 1 400 kW	2 kW 30 kW	10 kW 30 kW	Environ 5 kW
Charge de frigorigène	De À	1 kg Plusieurs tonnes	1 kg 20 kg	10 kg 20 kg	Environ 5 kg
Pourcentage approximatif des stocks de frigorigènes du secteur dans le sous-secteur		52 % de 15 900 tonnes	27 % de 15 900 tonnes	5 % de 15 900 tonnes	16 % de 15 900 tonnes
Pourcentage approximatif des émissions de frigorigènes du secteur dans le sous-secteur		46 % de 6 000 tonnes	30 % de 6 000 tonnes	6 % de 6 000 tonnes	18 % de 6 000 tonnes
Technologie dominante		HCFC-22	HFC-134a, R-404A, R-410A	HFC-134a, R-404A, R-410A	R-404A
Autres technologies commercialisées		Divers HFC, ammoniac, ammoniac/CO <sub>2</sub> pour les basses températures; systèmes à hydrocarbures pour les citernes à gaz; systèmes à sorption pour une partie de la charge de refroidissement	Hydrocarbures, CO <sub>2</sub> liquide ou solide, coulis de glace, plaques eutectiques	CO <sub>2</sub> solide	HFC-134a, HCFC-22
Technologies à plus faible PRG avec un potentiel correct de substitution aux HCFC/HFC sur les marchés		Ammoniac, ammoniac/CO <sub>2</sub> pour les basses températures	Hydrocarbures, systèmes de compression de CO <sub>2</sub> ; pour les courtes distances, une combinaison d'hydrocarbure stable ou d'ammoniac avec CO <sub>2</sub> liquide, coulis de glace ou plaques eutectiques	Hydrocarbures, systèmes de compression de CO <sub>2</sub> ; pour des transports particuliers (ex. certains fruits), une combinaison d'hydrocarbure stable ou d'ammoniac avec CO <sub>2</sub> liquide, coulis de glace ou plaques eutectiques	Système de compression de CO <sub>2</sub>
Statut des options de remplacement		Totalement développées. Certains surcoûts liés à la sécurité des installations à l'ammoniac sur les bateaux. Les hydrocarbures sont la principale solution pratique pour les navires construits selon des normes anti-explosion (comme les gaziers).	Les systèmes à hydrocarbures ont réussi leurs tests <i>in situ</i> , mais la demande manque et leur utilisation est soumise à certaines conditions supplémentaires (formation des chauffeurs, stationnement). Systèmes à CO <sub>2</sub> liquide commercialisés. La compression de CO <sub>2</sub> a été testée sur les prototypes mais des difficultés au niveau des compresseurs à pilotage externe nécessaires à la plupart des systèmes (fuites).	Le CO <sub>2</sub> solide est le standard mais il n'a pas un très bon rendement énergétique, il est difficile à manipuler et nécessite des infrastructures très particulières. Il est donc présentement en voie d'abandon. Utilisation croissante de systèmes destinés aux remorques avec optimisation pour le rail (résistance aux chocs).	En cours de développement. Test des prototypes. Pourraient être disponibles dans un avenir proche si la demande existe.

(selon le scénario de la poursuite des activités). On s'attend à ce que les émissions actuelles, tous frigorigènes confondus, de 6 000 tonnes par an atteignent 8 700 tonnes en 2015 selon le même scénario, ou tombent à 5 250 tonnes grâce aux efforts notablement accrus en matière de récupération et de recyclage et à un meilleur confinement dû à l'utilisation de compresseurs soudés hermétiquement. Ces options permettraient de réduire sensiblement les émissions d'équivalent CO<sub>2</sub> au même titre que le remplacement des fluorocarbures par d'autres options à plus faible PRG.

Il existe des options de remplacement à plus faible PRG pour toutes les applications frigorifiques du transport impliquant actuellement des CFC, HCFC ou HFC (voir le tableau RT-15). Dans plusieurs cas, ces options peuvent entraîner un surcoût du système de réfrigération lié à l'équipement et la sécurité. Il convient de rappeler que, pour les propriétaires d'équipements de transport et en l'absence d'aide financière externe, le coût initial du moyen de transport et du site de réfrigération est considérablement plus important que le coût d'exploitation de l'installation.

Compte tenu des fuites de frigorigènes à hauteur de 25 à 35 %, le passage d'un HFC comme le R-404A à un gaz à faible PRG permet généralement une réduction de l'indice TEWI, si la consommation énergétique n'est pas substantiellement plus forte que dans les systèmes actuels. Dans plusieurs applications, cette réduction serait très significative.

Il existe de nombreuses perspectives de réduction de la consommation d'énergie dans les transports réfrigérés, à commencer par l'amélioration du calorifugeage pour réduire les pertes et la charge calorifique, le contrôle de la fréquence des moteurs de compression pour satisfaire aux conditions de charge partielle, les condenseurs à eau sur les navires frigorifiques et la maintenance préventive permettant de réduire l'encrassement des échangeurs de chaleur.

## 4.2 Quelles sont les découvertes majeures dans le secteur du chauffage et de la climatisation résidentiels et commerciaux?

Les applications, les équipements et les produits du secteur du chauffage et de la climatisation résidentiels et commerciaux peuvent se répartir en trois groupes: les climatiseurs fixes (regroupant à la fois les appareils qui refroidissent l'air et les thermopompes qui le réchauffent directement), les refroidisseurs d'eau et les thermopompes à eau.

Parmi les climatiseurs fixes, il existe 6 catégories distinctes: 1) les systèmes montés sur fenêtre ou à travers les murs; 2) les climatiseurs à deux blocs sans conduits, à destination résidentielle ou commerciale; 3) les monoblocs sans conduits; 4) les systèmes à boucle d'eau sans conduits; 5) les bi- et monoblocs résidentiels avec conduits; 6) les bi- et monoblocs commerciaux avec conduits. Les systèmes à refroidissement par eau froide avec traitement et distribution de l'air permettent en général de climatiser les grandes surfaces commerciales. Les thermopompes à eau sont fabriquées pour utiliser diverses sources de chaleur: l'air, l'eau provenant de nappes ou de rivières et le sol.

*Quels étaient les frigorigènes utilisés auparavant?*

- HCFC-22 dans les climatiseurs autonomes;
- HCFC-22 et R-502 dans les thermopompes à réchauffement d'eau;
- CFC-11, CFC-12, HCFC-22 et R-500 dans les condenseurs centrifuges;
- HCFC-22 et CFC-12 (en bien moindre proportion) dans les condenseurs à compression volumétrique.

**Climatisation fixe:** La grande majorité des climatiseurs fixes (et des thermopompes) utilise la technologie de la compression avec le HCFC-22 comme frigorigène. C'est également le frigorigène de la quasi-totalité des systèmes à refroidissement par air fabriqués avant 2000.

**Refroidisseurs d'eau:** Les refroidisseurs avec compresseur à vis, à spirale ou à piston emploient généralement du HCFC-22. Certains petits refroidisseurs à piston (sous les 100 W) ont été commercialisés avec du CFC-12 comme frigorigène. Les refroidisseurs centrifuges sont fabriqués aux États-Unis, en Asie et en Europe. Avant 1993, ces refroidisseurs étaient vendus avec du CFC-11, CFC-12, R-500 ou HCFC-22 comme frigorigènes.

**Thermopompes à eau:** Auparavant, les frigorigènes les plus fréquents dans les thermopompes à compression étaient le R-502 et le HCFC-22.

*Quelles sont les pratiques actuelles?*

**Climatisation fixe:** En estimation brute, plus de 90 % des climatiseurs à air (et des thermopompes) actuellement produits utiliseraient le HCFC-22, mais ce produit commence à être retiré du marché dans certains pays, en avance sur le calendrier du Protocole de Montréal. Les options de remplacement sont les mêmes pour toutes les catégories de climatiseurs fixes: le HFC-134a, les mélanges de HFC et les hydrocarbures. Le CO<sub>2</sub> est également envisagé. Présentement, les mélanges de HFC sont exploités dans la vaste majorité des systèmes sans SAO, tandis que les hydrocarbures concernent un petit pourcentage de systèmes à faible charge.

**Refroidisseurs d'eau:** Les HFC et les mélanges de HFC (notamment les R-407C et R-410A) commencent à remplacer le HCFC-22 dans les nouveaux refroidisseurs à compression volumétrique commercialisés. De plus grands refroidisseurs à eau avec compresseurs à vis (au-delà de 350 kW) ont été développés avec du HFC-134a plutôt que du HCFC-22. L'ammoniac concerne certains refroidisseurs en Europe et quelques petits modèles utilisant des hydrocarbures y sont également produits chaque année. Le HCFC-123 et le HFC-134a remplacent les CFC-11 et CFC-12 dans les refroidisseurs centrifuges depuis 1993.

**Thermopompes à eau:** Dans les pays développés, le HCFC-22 domine encore mais des alternatives HFC apparaissent. Dans les pays en développement, le CFC-12 est toujours utilisé dans un nombre limité de cas. Dans les petits systèmes à eau commerciaux et résidentiels, les HFC sont parfois remplacés par des hydrocarbures ou du CO<sub>2</sub>. Les premiers concernent l'Europe et le second l'Europe et l'Asie.

*Quelles sont les tendances futures possibles?*

Les options pour réduire les émissions à effet de serre des équipements de chauffage et de climatisation résidentiels et

commerciaux impliquent le confinement à l'échelle mondiale dans les systèmes à compression utilisant des CFC/HCFC/HFC et l'utilisation d'équipements qui n'exploitent pas ces frigorigènes. Cette dernière option n'est cependant pas réalisable de manière systématique compte tenu des enjeux économiques, sécuritaires et énergétiques.

Le confinement est possible, d'une part, grâce à l'amélioration de la conception, l'installation et la maintenance des systèmes pour en réduire les fuites et minimiser la charge de frigorigène nécessaire, et d'autre part, grâce à la récupération, le recyclage et le reclassement du frigorigène lors des entretiens ou de la mise au rebut des équipements. Pour réduire les émissions lors de l'installation, de la maintenance et de la mise hors service, il faut du personnel formé et disposant d'un équipement spécifique. Le tableau RT-11 présente les émissions actuelles et les émissions en 2015 selon un scénario de réduction.

*Quels sont les frigorigènes de remplacement ayant un faible PRG?*

Selon l'application, les HFC des systèmes de chauffage et de climatisation résidentiels et commerciaux peuvent être remplacés par des hydrocarbures, l'ammoniac, l'eau ou le CO<sub>2</sub>.

**Climatisation fixe:** L'utilisation des hydrocarbures dans les climatiseurs à air dont la charge de frigorigène est supérieure à 1 kg a fait l'objet d'analyses des risques détaillées et entraîné des efforts de normalisation (comme la norme EN 378 dans l'Union européenne). L'enjeu majeur pour un fabricant qui voudrait utiliser des hydrocarbures comme frigorigène consiste à déterminer le niveau acceptable de risque et la responsabilité associée.

Le CO<sub>2</sub> dispose de nombreuses propriétés appréciables en tant que frigorigène: disponibilité, faible toxicité, faible PRG direct et faible coût. Les systèmes à base de CO<sub>2</sub> sont également potentiellement moins encombrants que ceux utilisant les frigorigènes conventionnels. Ces avantages sont contrebalancés par le fait que l'utilisation du CO<sub>2</sub> dans les climatiseurs nécessite des pressions élevées, qui se traduisent par de faibles rendements, contribuant ainsi aux émissions indirectes de CO<sub>2</sub> liées à une consommation d'énergie plus importante. Les tests sur systèmes réels des climatiseurs à air non optimisés ont démontré des coefficients de performance<sup>21</sup> pouvant atteindre 2,25 à une température d'entrée de 35 °C, comparé au coefficient maximal de 4.0 d'un équipement au HCFC-22.

**Refroidisseurs d'eau:** Les refroidisseurs à compression volumétrique utilisant l'ammoniac comme frigorigène existent dans l'intervalle des capacités 100 – 2 000 kW, certains dépassant ce seuil. Les recommandations pratiques limitent leur utilisation dans les bâtiments publics aux situations dans lesquelles l'ammoniac est confinée à une salle des machines où la sécurité est renforcée par la présence d'alarmes, de systèmes d'aération et de laveurs de gaz. Il existe également des recommandations pour concevoir et utiliser les systèmes à l'ammoniac de façon sécurisée. Les appareils modernes et compacts fabriqués en série sont bien plus efficaces que les anciens sur ce point.

Les hydrocarbures frigorigènes sont utilisés depuis très longtemps dans les refroidisseurs industriels des usines pétrochimiques. Avant 1997, les réserves sécuritaires en prohibaient l'utilisation dans les refroidisseurs résidentiels, mais les fabricants

européens proposent désormais une ligne de refroidisseurs à compression volumétrique fonctionnant aux hydrocarbures. Les ventes tournent autour de 100 à 150 unités par an, essentiellement en Europe du Nord. Ce chiffre est faible comparé au parc existant des quelque 77 000 refroidisseurs au HCFC ou HFC en Europe. En général, les mesures de sécurité englobent l'emplacement et/ou l'étanchéisation du refroidisseur, l'application d'une configuration à faible charge, des systèmes de ventilation de secours et des détecteurs de gaz avec alarmes. Le rendement est similaire à celui des produits équivalents chargés au HCFC-22. Le coût des refroidisseurs aux hydrocarbures est toutefois supérieur à celui des systèmes aux HCFC ou HFC comparables.

Le CO<sub>2</sub> est à l'étude dans de nombreuses applications potentielles. Cependant, ce gaz ne développe pas un rendement énergétique comparable à celui des fluorocarbures pour ce qui est des refroidisseurs à eau. Il ne présente donc aucun avantage de substitution aux HFC. Il n'y a d'ailleurs aucune application commerciale en ce sens actuellement.

L'eau est une option intéressante car elle est non toxique et ininflammable. Cependant, c'est un frigorigène à très basse pression. Ces faibles pressions et les débits volumiques élevés dans les systèmes à compression utilisant l'eau nécessitent des compresseurs dont la configuration est inhabituelle dans le secteur de la climatisation. Les quelques applications existantes exploitent l'eau pour refroidir de l'eau ou produire des coulis de glace par évaporation directe d'une poche d'eau. Ces systèmes sont aujourd'hui plus de 50 % plus coûteux que les systèmes conventionnels. Ces coûts élevés sont dus et associés à la taille physique des refroidisseurs à compression d'eau et à la complexité de leur technologie de compression.

**Thermopompes à eau:** Certains fabricants européens utilisent le propane (HC-290) ou le propylène (HC-1270) comme frigorigène dans les petites thermopompes à faible charge destinées à un usage résidentiel ou commercial. Le circuit à hydrocarbures est généralement situé à l'extérieur des bâtiments ou dans un espace intérieur ventilé, et exploite l'air ambiant, la géothermie ou les réserves d'eau souterraines.

Dans les applications à réchauffement d'eau, le propane développe un rendement similaire voire légèrement supérieur à celui du HCFC-22. La conception de nouveaux systèmes à thermopompes chargés en propane ou d'un autre frigorigène inflammable doit s'accompagner de précautions pour en assurer un fonctionnement et une maintenance en toute sécurité. Diverses normes destinées à réguler l'utilisation des hydrocarbures dans les thermopompes existent ou sont à l'étude en Europe, en Australie et en Nouvelle-Zélande. C'est notamment le cas de la mise à jour de la norme européenne EN 378.

Le cycle transcritique du CO<sub>2</sub> montre un glissement de température important dès que celle-ci s'élève. Un tel glissement peut constituer un avantage dans un échangeur thermique à contre-courant. Les thermopompes exploitant le CO<sub>2</sub> comme frigorigène peuvent générer de l'eau chaude jusqu'à 90 °C et ont été développées au Japon à des fins domestiques. Leur capacité nominale de chauffage est de 4,5 kW.

L'ammoniac a été utilisé sur des thermopompes de moyennes et grandes tailles, essentiellement en Scandinavie, en Allemagne,

<sup>21</sup> Le coefficient de performance est un indice du rendement énergétique d'un système réfrigérant.

en Suisse et aux Pays-Bas. Les impératifs sécuritaires entourant ces thermopompes sont les mêmes que pour les refroidisseurs chargés à l'ammoniac.

*Quelles sont les technologies de remplacement?*

Un certain nombre d'autres technologies non conventionnelles ont été étudiées pour leur potentiel de réduction de la consommation et des émissions de HFC. Elles englobent notamment la dessiccation, le cycle de Stirling et les systèmes de réfrigération thermoélectriques, thermoacoustiques et électromagnétiques. À l'exception des deux premières, ces technologies souffrent toutes de la faiblesse de leur rendement, les effets indirects annulant tout avantage en termes de réduction des émissions directes. Malgré l'intérêt qu'il suscite chez les chercheurs, le cycle de Stirling reste limité à certaines niches et n'a jamais eu de débouché commercial dans la climatisation. Dans les applications à forte charge latente, des systèmes à dessiccation ont été appliqués pour compléter les performances latentes des climatiseurs à mécanisme conventionnel.

*Quel est le potentiel de réduction total?*

Les émissions à effet de serre directes des systèmes de chauffage et de climatisation résidentiels et commerciaux peuvent être réduites d'environ 200 Mt  $\text{eqCO}_2/\text{an}$  par rapport au scénario de la poursuite des activités (2015). Les **coûts associés** s'établissent entre - 3 et 170 dollars É.-U./t  $\text{eqCO}_2$ . L'amélioration du rendement énergétique du système peut réduire considérablement les émissions indirectes de GES, conduisant dans certains cas à des économies globales de 75 dollars É.-U./t  $\text{eqCO}_2$ . Les perspectives de réduction des émissions à effet de serre directes (c'est à dire de frigorigènes) se trouvent dans 1) une récupération plus efficace du frigorigène en fin de vie du produit (selon le scénario de réduction, cela s'élèverait à respectivement 50 % et 80 % dans les pays développés et en développement); 2) la réduction de la charge (jusqu'à 20 %); 3) un meilleur confinement; 4) l'utilisation de frigorigènes sans fluorocarbures quand les applications s'y prêtent.

**4.3 Quelles sont les découvertes majeures dans le secteur de la climatisation mobile?**

*Quelles sont les tendances passées et actuelles du secteur de la climatisation mobile?*

Les systèmes de climatisation mobiles ont été produits en masse depuis le début des années 60 aux États-Unis et les années 70 au Japon. L'augmentation notable du nombre de véhicules climatisés en Europe, ainsi que dans les pays en développement, est plus tardive – vers 1995.

Comme le montre le tableau RT-16, le parc total équipé au CFC-12 est passé d'environ 212 millions de véhicules en 1990 à 119 millions en 2003, tandis que celui équipé au HFC-134a passait de moins d'un million en 1992 à 338 millions en 2003.

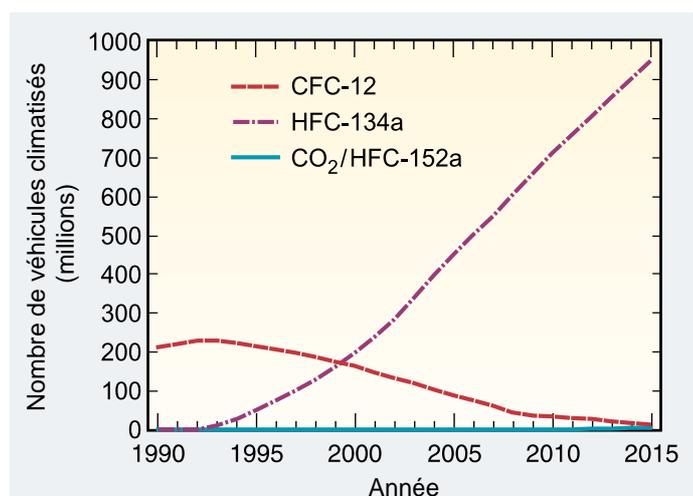
Sur les bases du scénario de la poursuite des activités, et en tenant compte du taux de croissance économique élevé des pays en pleine expansion, la figure RT-11 illustre que le nombre de véhicules climatisés devraient atteindre environ 965 millions en 2015.

**Tableau RT-16.** Évolution du parc de véhicules climatisés et choix du frigorigène entre 1990 et 2003.

Année	Nombre de véhicules climatisés (millions)	
	CFC-12	HFC-134a
1990	212	-
1991	220	-
1992	229	0,7
1993	229	10
1994	222	27
1995	215	49
1996	206	74
1997	197	100
1998	186	128
1999	175	161
2000	163	198
2001	149	238
2002	134	285
2003	119	338

*Quelles sont les émissions et les projections actuelles?*

Les émissions des véhicules toujours climatisés au CFC-12 sont d'environ 531 g par an et par véhicule, tous types d'émissions inclus – les émissions fugaces représentant 220 g par an et par véhicule. La récupération et le recyclage sont de mise pour le CFC-12 en fin de vie des véhicules dans certains pays, mais ce gaz continuera à être libéré dans l'atmosphère après ces opérations à moins d'être détruit. Les émissions annuelles (2002) du parc mondial de véhicules climatisés au CFC-12 avoisinent les 514 Mt  $\text{eqCO}_2/\text{an}$  (les émissions fugaces représentant 213 Mt  $\text{eqCO}_2/\text{an}$ ). Les projections suggèrent que l'effet du sous-secteur de la climatisation mobile sur le forçage radiatif du système climatique va continuer à être dominé par les émissions de CFC-12 jusqu'en 2006 au moins.



**Figure RT-11.** Évolution du parc de véhicules climatisés entre 1990 et 2015 selon le scénario de la poursuite des activités.

Les émissions directes du parc de véhicules climatisés au HFC-134a sont évaluées à environ 220 g par an et par véhicule, dont 130 g d'émissions fugaces par an et par véhicule. Exprimé en équivalent CO<sub>2</sub>, cela représente 96 Mt éqCO<sub>2</sub>/an dont 56 d'émissions fugaces. Les kits de recharge à installer soi-même, dans lesquels les fluides sont conditionnés en bidons jetables, conduiraient au moins au doublement des émissions dans l'atmosphère par rapport au rechargement par un professionnel qui utilise des composants plus efficaces pour livrer les fluides.

Le tableau RT-11 met l'accent sur les mutations rapides dans le choix du frigorigène après la mise en œuvre du Protocole de Montréal.

*Quelles sont les émissions de CO<sub>2</sub> indirectes liées à la consommation d'énergie des climatiseurs mobiles?*

Au niveau mondial, le fonctionnement des climatiseurs mobiles entraîne un effet indirect substantiel lié à l'augmentation de la consommation de carburant et des émissions de CO<sub>2</sub> associées. Les tests actuels de consommation et les normes de l'industrie automobile ne tiennent pas compte explicitement de cet effet, qui varie selon les zones climatiques. En fonction des conditions climatiques en effet, les climatiseurs mobiles représenteraient une consommation de carburant supplémentaire de 2,5 à 7,5 %, soit environ de 126 kg (Tokyo) à 369 kg (Phoenix) de CO<sub>2</sub> par an et par véhicule. Avec un nombre total de véhicules équipés estimé à 457 millions (en 2003), l'effet indirect correspond à au moins 114 Mt éqCO<sub>2</sub>/an – à partir d'une moyenne de tous les véhicules et en s'appuyant sur une valeur moyenne annuelle de 250 kg de CO<sub>2</sub> par véhicule –, à rapprocher des 750 Mt éqCO<sub>2</sub>/an d'émissions directes.

*Quelles sont les tendances futures possibles dans la climatisation mobile?*

Il existe des options pour réduire les émissions à effet de serre: 1) augmenter le nombre de systèmes au HFC-134a; 2) passer à des frigorigènes à plus faible PRG – le HFC-152a ou le CO<sub>2</sub>. Les hydrocarbures, même s'ils ont un bon rendement et un faible PRG lorsqu'ils sont bien utilisés, ne sont pas des options envisageables par les constructeurs automobiles et les équipementiers du fait des enjeux sécuritaires qu'ils soulèvent.

Des systèmes au HFC-134a améliorés ont été progressivement lancés sur le marché, avec un surcoût de 24 à 36 dollars É.-U. par système. Ils fonctionnent avec des durits, des compresseurs et des soupapes d'alimentation plus étanches, réduisant ainsi les fuites. Des études récentes suggèrent que ces systèmes et une meilleure maintenance pourraient permettre d'atteindre des émissions d'environ 70 g par an et par véhicule, soit une réduction d'environ 60 % par rapport aux systèmes actuels. Les améliorations dans les pratiques de récupération et la formation en matière de maintenance permettraient de réduire encore les émissions. Des économies d'énergie importantes pourraient également être dégagées par l'utilisation de compresseurs volumiques variables avec contrôle externe, qui font également leur apparition sur le marché. D'autres économies potentielles

sont liées à une conception des systèmes qui intégrerait des contraintes de rendement énergétique.

Plusieurs études récentes suggèrent que des améliorations dans le rendement énergétique par l'intermédiaire de mesures telles que des commandes marche/arrêt au lieu du fonctionnement conventionnel en continu, l'isolation des portes et des toits, etc., pourraient permettre de réduire les émissions d'environ 30 à 40 %, ce qui représente entre 30 et 40 Mt éqCO<sub>2</sub>/an.

Les climatiseurs à base de CO<sub>2</sub> ont fait leurs preuves dans les véhicules de tourisme et les autocars commerciaux. Le CO<sub>2</sub> a un PRG qui est 1 300 fois plus faible que celui du HFC-134a, ce qui limite donc les effets directs par charge. Cependant, les systèmes au CO<sub>2</sub> fonctionnent à des pressions environ huit fois plus importantes que celles des CFC-12 et HFC-134a (pressions de décharge de l'ordre de 12 MPa) et, comme les fuites sont proportionnelles au carré de la pression, ces systèmes nécessitent un confinement d'autant plus complexe. À l'heure actuelle, les systèmes au CO<sub>2</sub> ont démontré qu'ils avaient un rendement énergétique comparable voire supérieur à celui des systèmes au HFC-134a améliorés sous les climats plus froids, bien qu'ils puissent être moins performants dans les climats plus chauds. Néanmoins, comme le montre le tableau RT-17, compte tenu de son effet direct quasi négligeable, l'indice TEWI des systèmes au CO<sub>2</sub> est substantiellement meilleur que celui des systèmes au HFC-134a améliorés. Il existe encore certaines barrières à la commercialisation, notamment l'enjeu du surcoût et les questions sécuritaires liées à l'échappement de CO<sub>2</sub> dans l'habitacle du véhicule, les questions de maintenance ainsi que le coût de conversion du système de révision.

Le HFC-152a donne également de bons résultats dans les climatiseurs mobiles. Cependant, même si les systèmes qui en sont chargés nécessitent les mêmes composants que ceux au HFC-134a, il requiert des précautions sécuritaires supplémentaires liées à son inflammabilité alors que le HFC-134a est ininflammable. Les émissions directes (en équivalent CO<sub>2</sub>) sont très faibles (92 % de réduction par rapport au HFC-134a en standard) et le rendement énergétique affiché par les systèmes au HFC-152a est comparable voire supérieur à celui des systèmes au HFC-134a améliorés. Cependant, ce gain énergétique peut être perdu s'il faut installer un circuit secondaire pour répondre aux enjeux sécuritaires. Néanmoins, l'impact climatique général de ce gaz, exprimé sous la forme de l'indice TEWI, est toujours sensiblement plus faible que celui du HFC-134a et du même ordre de grandeur que celui des systèmes au CO<sub>2</sub>. La principale barrière à la commercialisation de nos jours est liée à son inflammabilité et à sa disponibilité à travers le monde.

Le tableau RT-17 propose une comparaison des systèmes de climatisation mobiles déjà commercialisés, à l'étude et au stade des essais. Pour chaque option, la question du coût relatif est indiquée, ainsi que les points à prendre en compte pour évaluer les effets sur le forçage radiatif du système climatique, y compris les effets indirects. Il faut mettre l'accent sur le fait que le choix de telle ou telle option technique à une date donnée n'aura qu'un effet limité pendant les premières années suivant son introduction, compte tenu du volume de frigorigènes stockés et émis par les véhicules en circulation.

Tableau RT-17. Comparaison des options de climatisation mobile.

	HFC-134a (référence)	HFC-134a amélioré	CFC-12 (ancien type)	CO <sub>2</sub> (en développement)	HFC-152a (système direct en développement)
<b>Caractéristiques des substances</b>					
Rendement radiatif (W m <sup>-2</sup> ppb <sup>-1</sup> )	0,16	0,16	0,32	Voir chap. 2	0,09
Durée de vie dans l'atmosphère (an)	14	14	100	Voir chap. 2	1,4
PRG direct (horizon à 100 ans)					
– selon le présent rapport	1 410	1 410	10 720	1	122
– selon la CCNUCC <sup>a</sup>	1 300	1 300	8 100	1	140
<b>Données techniques</b>					
Étape de développement	Commerciale	Bientôt commerciale	Commerciale	Démonstration	Démonstration
Durée de vie du système	12-16	12-16	12-16	12-16	12-16
Capacité de refroidissement (kW)	6	5	6	6	6
Charge (kg par système)					
– intervalle	0,7-0,9	0,6-0,75	1-1,2	0,5-0,7	0,45-0,55
– valeurs relatives (%)	100	80	125	70	70
Nombre de charges sur la durée de vie	2-3	1-2	4	2-4	1-2
Coefficient de performances	0,9-1,6	1,2-2,5	0,9-1,2	0,9-2,0	1,2-2,0
Consommation énergétique (valeur relative) (%)	100	80	130	70	70
<b>Émissions par unité fonctionnelle</b>					
Émissions directes					
– en % de la charge annuelle	15	7	20	15	7
– en kg éqCO <sub>2</sub> /an	166	64	1 782	0,09	4,9
– valeurs relatives (%)	100	40	1 043	0,05	2,9
Émissions indirectes de CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /an)					
– Séville	184	147	239	129	129
– Tokyo	126	101	163	88	88
– Phœnix	369	295	480	258	258
Efficacité de la récupération des émissions en fin de vie <sup>b</sup> (%)	0	50	0	0	50
TEWI (kg éqCO <sub>2</sub> sur 14 ans)					
– Séville	4 900	2 954	28 294	1 807	1 875
– Tokyo	4 088	2 310	27 230	1 233	1 301
– Phœnix	7 490	5 026	31 668	3 613	3 681
(sans récupération) <sup>b</sup>					
<b>Coûts par unité fonctionnelle</b>					
Dépenses d'investissement (dollars É.-U.)	215	24-36	n.d.	48-180	48

Notes:

<sup>a</sup> Les valeurs de PRG utilisées pour les calculs sont celles de la CCNUCC.<sup>b</sup> En raison des importantes incertitudes sur l'efficacité de la récupération, les calculs de l'impact total équivalent sur le réchauffement planétaire (TEWI) ne tiennent pas compte de cette récupération. C'est pourquoi les émissions directes moyennes annuelles des «systèmes à HFC-134a améliorés» sont de 100 g/an.

### 4.4 Quelles sont les découvertes majeures dans le secteur des mousses?

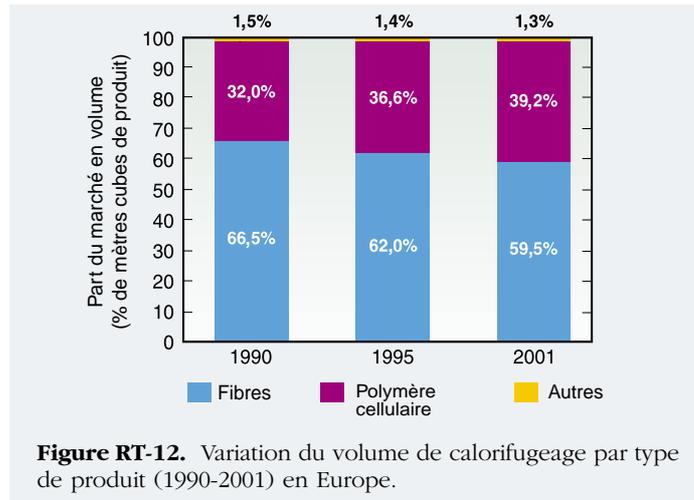
*Dans quelles applications les mousses servent-elles et pourquoi?*

Par le passé, les polymères expansés ou cellulaires ont servi dans de nombreuses applications qui exploitent le potentiel de création de structures souples ou rigides. Les mousses souples continuent à servir pour le rembourrage d'ameublement, le conditionnement et la gestion des impacts (sécurité). Les mousses rigides sont essentiellement utilisées dans le calorifugeage nécessaire à certains appareils, au transport et dans les bâtiments. En outre, elles permettent de consolider l'intégrité structurelle ou la flottabilité.

Dans les applications de calorifugeage (l'essentiel du secteur des mousses rigides), la principale technologie de remplacement était et reste l'utilisation de fibres minérales (comme la fibre de verre ou la laine minérale). Le tableau RT-18 illustre les principaux avantages et limites des deux technologies.

Les implications de ces avantages et limites relatifs varient substantiellement en fonction, d'une part, des produits dans une même catégorie et d'autre part, des applications – interdisant toute possibilité de conclusion générique en termes de préférence. Le marché actuel du calorifugeage compte une vaste palette de solutions (au moins 15 grands types de produits), reflétant l'étendue des spécifications requises pour chaque application. Il n'existe malheureusement que peu d'informations sur ce marché au niveau mondial comme régional. L'une des difficultés d'analyse vient de la diversité des pratiques de construction à travers le monde, souvent conditionnées par la disponibilité des matières et les conditions climatiques.

À titre purement illustratif, une analyse systématique et périodique du marché européen du calorifugeage a permis de dégager certaines tendances sur la période 1990-2001 (figure RT-12). Cette analyse indique qu'une confiance croissante est accordée aux produits expansés dans le calorifugeage, favorisée en partie par l'utilisation accrue des panneaux métallisés en Europe, qui a leur tour reposent de plus en plus sur des noyaux expansés. Cependant, l'harmonisation des classifications des feux en



**Figure RT-12.** Variation du volume de calorifugeage par type de produit (1990-2001) en Europe.

Europe dans les cinq années à venir risque d'interrompre cette tendance, voire de l'inverser. Voilà un bon exemple de la versatilité de ces marchés, qui explique également l'importance de maintenir des gammes complètes de divers types de produits.

Il est important, dans le cadre de l'étude des options de remplacement, de tenir compte du développement continu. Par exemple, il semble possible que l'utilisation de panneaux d'isolation sous vide (matrices de mousse scellées et sous vide) augmente dans les réfrigérateurs et congélateurs résidentiels. En fait, la plupart des appareils au Japon intègrent déjà au moins un de ces panneaux à des emplacements stratégiques. Parmi les autres perspectives, citons l'utilisation de feuilles réfléchissantes multicouche dont le rendement thermique n'a cependant pas encore été prouvé.

La relation entre les produits à base de mousse, les processus de fabrication et les applications est complexe. Le tableau RT-19 résume les principales interrelations entre les types de produits génériques et les applications des mousses destinées ou non à l'isolation, tandis que le chapitre principal traite de la superposition supplémentaire des processus de fabrication.

**Tableau RT-18.** Avantages et limites de l'utilisation des fibres minérales et des polymères cellulaires dans les applications d'isolation thermique.

	<i>Fibre minérale</i>	<i>Polymères cellulaires</i>
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût initial</li> <li>• Disponibilité</li> <li>• Haute température maximale</li> <li>• Performance au feu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propriétés thermiques fondées sur un agent gonflant</li> <li>• Résistance à l'humidité</li> <li>• Intégrité structurelle</li> <li>• Légereté</li> </ul>
<b>Limites</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propriétés thermiques de l'air</li> <li>• Résistance à l'humidité<sup>a</sup></li> <li>• Faible intégrité structurelle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Performance au feu (organique)</li> <li>• Température maximale limitée</li> <li>• Coût initial (dans certains cas)</li> </ul>

Notes:

<sup>a</sup> Impact potentiel sur les performances thermiques à long terme.

**Tableau RT-19.** Principales interrelations entre les types de produits génériques et les applications des mousses isolantes et destinées à d'autres fins.

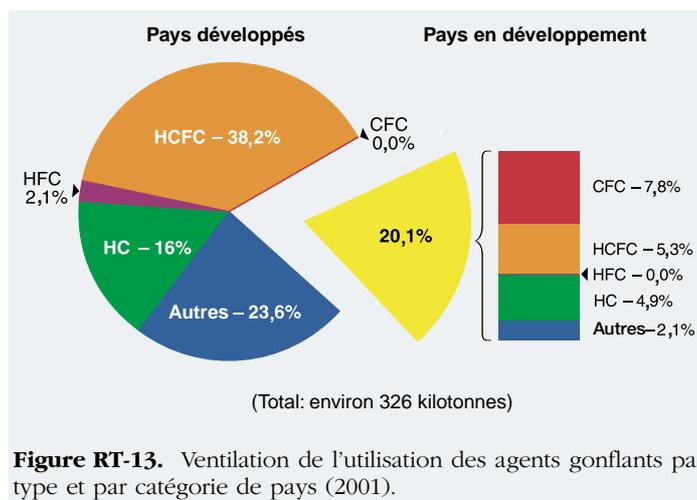
Type de mousses (isolantes)	Domaine d'application							
	Réfrigération et transport				Bâtiment et construction			
	Appareils grand public	Autres appareils	Navires réfrigérés et transport	Isolation de murs	Isolation de toits	Isolation de plafonds	Isolation de tuyauterie	Zones froides
Polyuréthane	√	√	√	√	√	√	√	√
Polystyrène extrudé			√	√	√	√	√	√
Phénols				√	√		√	√
Poyéthylène						√	√	

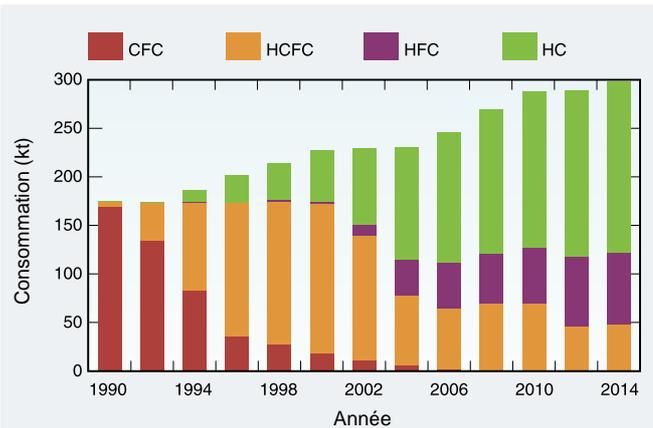
Type de mousses (non isolantes)	Domaine d'application					
	Transport		Confort		Conditionnement	Flottabilité
	Sièges	Sécurité	Literie	Mobilier	Alimentation, etc.	Marine et loisirs
Polyuréthane	√	√	√	√	√	√
Polystyrène extrudé					√	√
Polyéthylène					√	√

*Quels agents gonflants étaient traditionnellement utilisés et quelles sont les tendances pour l'avenir?*

Lorsque le trou dans la couche d'ozone a été découvert au début des années 80, la quasi-totalité des types de produits et des applications susmentionnés utilisaient des CFC, soit comme agent gonflant principal (mousses rigides), soit comme agent gonflant auxiliaire (mousses souples). La consommation de CFC par le secteur des mousses en 1986 avoisinait 250 kilotonnes (165 kt pour les mousses rigides, 85 kt pour les mousses souples). L'utilisation d'un agent gonflant a augmenté d'encore 30 % sur les quinze années suivantes malgré l'amélioration du rendement et la réduction des pertes. Dans le même temps, néanmoins, divers produits de remplacement ont été étudiés et adoptés, parmi lesquels des HCFC (substances transitionnelles), des hydrocarbures, des HFC, le chlorure de méthylène (pour les mousses souples) et diverses formes de CO<sub>2</sub>. La figure RT-13 récapitule la situation en 2001.



**Figure RT-13.** Ventilation de l'utilisation des agents gonflants par type et par catégorie de pays (2001).



**Figure RT-14.** Croissance projetée de la consommation des agents gonflants dans les mousses rigides – après 2000.

La figure RT-14 illustre la croissance projetée de la consommation d'agents gonflants dans le secteur des mousses rigides d'ici à 2015.

*Quelles sont les implications des modèles d'utilisation passés, présents et futurs?*

Les modèles d'utilisation passés, présents et futurs conditionnent à la fois les émissions et l'accumulation des agents gonflants en stock. La figure RT-15 illustre les émissions projetées entre 1990 et 2015 en fonction de l'utilisation habituelle et future de des agents gonflants dans les mousses. Le graphique indique l'émission annuelle projetée de tous les types d'agents jusqu'en 2015. Le tableau RT-20 évalue le développement projeté des stocks par région et par domaine d'application. Il est clair que la majeure partie des émissions à partir des mousses utilisées dans la construction sont encore à venir.

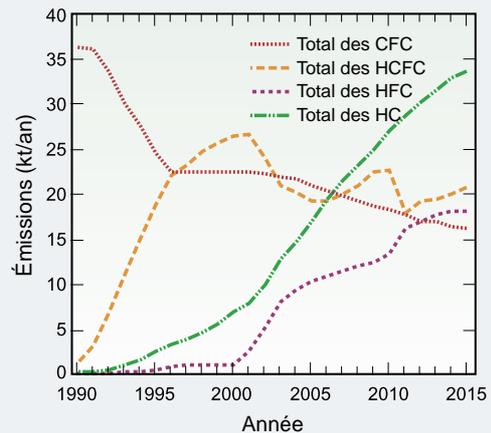
*Quels sont les facteurs de sélection des agents gonflants?*

#### Conductivité thermique

La capacité de retenir les agents gonflants dans les mousses permet d'envisager une amélioration des performances isolantes par rapport aux produits remplis d'air. Cependant, de tels bénéfices sont uniquement possibles lorsque la conductivité thermique de l'agent gonflant en question est inférieure à celle de l'air. C'est le cas de tous ceux présentés sur la figure RT-15. Toutefois, les performances relatives des divers types d'agents varient en fonction de la température. Ainsi, les avantages comparés des HFC sur les hydrocarbures sont plus importants dans les réfrigérateurs (température moyenne de 5 °C) que dans les chauffe-eau (température moyenne de 40 °C). En outre, la taille et la forme des cellules affectent également les performances générales des mousses et, donc, les comparaisons entre produits ne sont pas toujours évidentes.

#### Inflammabilité (produits et procédés)

L'inflammabilité d'une mousse est influencée par le choix de la matrice polymérique et du matériau de surface autant que par celui de l'agent gonflant. Cependant, il est fréquent que la contribution de l'agent gonflant modifie la classification



**Figure RT-15.** Émissions annuelles globales d'agents gonflants par groupe (1990-2015).

d'un produit ou la position des assureurs par rapport au risque posé. En outre, le traitement de certains agents inflammables peut soulever d'autres questions fondamentales dans certains procédés à base de mousses. C'est notamment le cas dans les PME (petites et moyennes entreprises) qui ne peuvent pas développer d'économies d'échelles et continuent à fonctionner selon des processus discontinus. Dans le cas des agents inflammables, les critères d'investissement varient considérablement selon qu'il s'agit d'investir dans une nouvelle installation ou d'en modifier une. Dans ce dernier cas, les coûts sont souvent prohibitifs lorsque le site est déjà vieux ou qu'il s'agit d'une PME. Les questions liées à la responsabilité de l'employeur peuvent également entrer en ligne de compte, surtout dans les régions habituées aux conflits sociaux.

*Quels efforts ont déjà été consentis pour minimiser l'utilisation?*

Lorsque les trois aspects présentés ci-avant entrent en considération, les HFC apparaissent comme l'option privilégiée de nombreux secteurs-clés, bien que les progrès réalisés dans le développement d'autres technologies aient permis de ralentir leur croissance. Citons comme exemple l'expansion continue des technologies aux hydrocarbures. Cependant, même dans les cas où les HFC ont été adoptés, il reste deux autres points à considérer:

- 1) Quelle quantité de HFC faut-il dans la formule pour obtenir les performances requises?
- 2) Quel HFC faut-il choisir?

Le coût des HFC en limite la croissance. Le coût des agents gonflants constitue généralement un poste important des coûts variables totaux. Ainsi, toute augmentation notable du coût d'un agent gonflant peut accroître jusqu'à 15 % ces coûts variables. Sur un marché très concurrentiel, de telles augmentations sont prohibitives, à moins de pouvoir modifier les formules et réduire la dépendance à un agent devenu plus cher. La co-expansion des mousses polyuréthanes à base de HFC par du CO<sub>2</sub> généré à partir de la réaction entre l'isocyanate et l'eau en est un exemple.

Néanmoins, la décision générale est complexe et repose sur la combinaison de plusieurs facteurs, comme le coût direct

Tableau RT-20. Stocks cumulés au niveau mondial des types d'agents gonflants par groupe (1990-2015).

Domaine d'application	Agent gonflant	1990 (tonnes)		2000 (tonnes)		2015 (tonnes)	
		Pays développés	Pays en développement	Pays développés	Pays en développement	Pays développés	Pays en développement
<i>Équipements et transport</i>	<i>CFC</i>	378 000	108 000	238 000	222 000	450	15 500
	<i>HCFC</i>	0	0	177 000	32 100	75 700	265 000
	<i>HFC</i>	0	0	1 150	0	154 000	0
	<i>HC</i>	0	0	87 100	31 600	354 000	329 000
	<i>Tous les agents</i>	378 000 (24,6 %)	108 000 (53,7 %)	503 250 (20,1 %)	285 700 (58,1 %)	584 150 (17,2 %)	609 500 (58,5 %)
<i>Panneaux en polyuréthane – Sous-total</i>	<i>CFC</i>	233 000	34 300	283 000	70 500	262 000	75 100
	<i>HCFC</i>	0	0	96 000	3 700	142 000	94 800
	<i>HFC</i>	0	0	2 150	0	135 000	0
	<i>HC</i>	0	0	43 800	250	238 000	0
	<i>Tous les agents</i>	233 000 (15,1 %)	34 300 (17,1 %)	424 950 (16,9 %)	74 450 (15,1 %)	777 000 (22,9 %)	169 900 (16,3 %)
<i>Constructions et autres – Sous-total</i>	<i>CFC</i>	921 000	58 800	964 000	127 300	769 000	106 000
	<i>HCFC</i>	5 200	0	568 000	4 650	683 000	156 000
	<i>HFC</i>	0	0	200	0	269 000	150
	<i>HC</i>	1 150	0	47 500	50	311 000	0
	<i>Tous les agents</i>	927 350 (60,3 %)	58 800 (29,2 %)	1 579 700 (63,0 %)	132 000 (26,8 %)	2 032 000 (59,9 %)	262 150 (25,2 %)
<i>Total</i>	<i>CFC</i>	1 532 000	201 100	1 485 000	419 800	1 031 450	196 600
	<i>HCFC</i>	5 200	0	841 000	40 450	900 700	515 800
	<i>HFC</i>	0	0	3 500	0	558 000	150
	<i>HC</i>	1 150	0	178 400	31 900	903 000	329 000
	<i>Tous les agents</i>	1 538 350	201 100	2 507 900	492 150	3 393 150	1 041 550

de l'agent, les questions de formulation associées (comme l'intégration de davantage de retardateur ou les pénalités de densité), les performances du produit, la sécurité des procédés et les dépenses d'investissement. Comme nous l'avons remarqué précédemment, ce dernier poste est particulièrement important pour les PME et autres consommateurs marginaux.

L'effet net de cette série de facteurs sur la demande de HFC a été de réduire les projections de 1999 d'une consommation de 115 kilotonnes en 2010 à 60 kilotonnes dans le présent rapport. À ajouter également que cette réduction a été favorisée par l'application de principes d'utilisation responsable dans l'industrie des mousses.

#### Sélection du meilleur PRG

Comme les deux principaux HFC liquides (HFC-245fa et HFC-365mfc) ont un PRG comparable à 100 ans, le choix entre les deux tient plutôt compte de leurs points d'ébullition respectifs et de leurs performances d'expansion. Parmi les agents gazeux, le HFC-152a a un PRG à 100 ans bien inférieur à celui du HFC-134a. Cependant, il s'agit d'un produit plus inflammable, qui est également libéré plus rapidement par certains types de mousses (par exemple, le polystyrène extrudé). Cela signifie donc que les impacts à court terme du HFC-152a peuvent être comparables à ceux du HFC-134a. En outre, l'effet

calorifique du HFC-152a peut être de courte durée. Tous ces facteurs doivent être étudiés lors de la sélection d'un agent gonflant.

*Quelles autres mesures et actions doivent être prises pour réduire davantage les futures émissions?*

#### Autre substitution

Tandis que l'adoption de critères d'utilisation responsable dans la sélection des HFC a permis de réduire la consommation de ces matières dans le secteur des mousses d'environ 50 % par rapport aux prévisions de 1999, il existe plusieurs domaines dans lesquels la substitution serait possible dans les 5 à 10 ans à venir. Par exemple:

- Une utilisation étendue des hydrocarbures dans la mousse de polyuréthane pistolée;
- Une utilisation étendue du CO<sub>2</sub> dans le polystyrène extrudé (XPS);
- Une utilisation étendue des hydrocarbures dans les mousses de l'équipement électroménager;
- Le changement d'attitude des assureurs vis-à-vis des hydrocarbures dans les panneaux.

Bien que l'impact de chacune de ces tendances puisse être modélisé à titre individuel, les incertitudes sont trop importantes pour pouvoir tirer des conclusions. C'est pourquoi, dans

ce rapport, deux scénarios de réduction sont présentés pour évaluer l'impact de la poursuite de ces options.

#### Bonnes pratiques en matière de processus

Des efforts ont déjà été entrepris pour établir des procédures d'identification et de réduction des pertes lors des processus de fabrication des mousses. Même si un tel travail est important pour donner le ton sur le traitement des HFC lors de ces processus, les économies potentielles ne devraient pas dépasser 2 à 3 % des émissions totales sur le cycle de vie, car la plupart des processus sont déjà en vase clos. À noter l'exception que représentent les émissions au cours du pistolage du polyuréthane, application pour laquelle des efforts sont encore nécessaires pour quantifier les pertes. Ces efforts permettront alors d'améliorer la conception des gicleurs.

#### Gestion des déchets

La minimisation des déchets est un objectif clair dans toutes les activités. Les fabricants de mousse sont toutefois confrontés à des problématiques spécifiques:

- La prolifération du produit nécessite des processus de fabrication plus souples;
- Il existe des pertes intrinsèques à la fabrication – comme les ébarbages des blocs de mousse.

La gestion de ces déchets est donc au cœur de la minimisation des émissions. Les modèles fondés sur le scénario de réduction évaluent les effets d'une combinaison d'améliorations en termes de procédés et de gestion des déchets.

#### Gestion des stocks (réfrigération)

Le volume des stocks actuels et futurs d'agents gonflants dans les secteurs des équipements et des transports a été évalué. Le scénario de base tient déjà compte des opérations de récupération mises en œuvre en Europe et au Japon. Donc, la taille des stocks n'est pas systématiquement égale aux émissions futures. Avec des technologies sûres et le coût de la récupération des frigorigènes actuellement évalué à 10-50 dollars É.-U./t  $\text{eqCO}_2$ , il semble raisonnable de penser que toutes les mousses des appareils frigorifiques pourront être prises en charge d'ici à 2015, si les investissements dans les usines de retraitement sont répartis convenablement au niveau géographique. Cela impliquerait cependant un investissement des pays en développement comme des pays industrialisés. L'un des scénarios étudiés dans ce rapport analyse l'impact potentiel qu'aurait le retraitement de tous les équipements en fin de vie, en partant de l'hypothèse d'une récupération supérieure à 80 % de la charge initiale en agent gonflant.

#### Gestion des stocks (constructions)

Dans le secteur de la construction, la faisabilité technique et la viabilité économique de la récupération des agents gonflants sont moins bien établies. Les initiatives telles que le projet *Japan Testing Center for Construction Materials* (JTCCM) au Japon aident à approfondir les connaissances dans ce domaine. À l'heure actuelle cependant, tout le monde s'accorde sur le fait que la récupération coûtera beaucoup plus cher que celle dans les équipements frigorifiques, du fait d'un rendement plus faible (dû aux pertes lors de l'utilisation et dans les phases de récupération) et des surcoûts de séparation des gravois.

Il existe une exception à cette tendance, sur le marché des panneaux métallisés dans lesquels la fixation de l'agent gonflant et la facilité de démontage permettraient d'effectuer la récupération dans les usines d'appareils frigorifiques.

Les stocks disponibles dans les panneaux de polyuréthane ont été évalués et devraient dépasser les 700 kilotonnes d'agents gonflants aux fluorocarbures d'ici 2015. Les coûts de récupération seraient du même ordre que ceux des équipements frigorifiques, mais cela reste à confirmer. Les deux scénarios ont été modélisés, mais avec une extrapolation plus modeste de 20 % de récupération à partir des constructions traditionnelles.

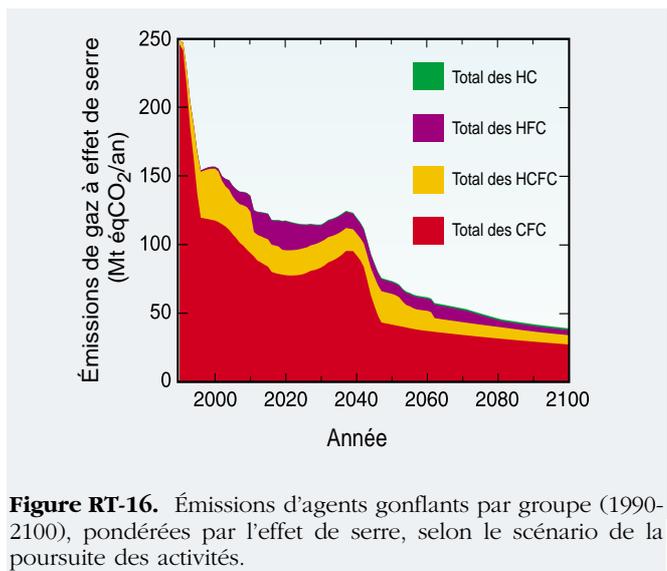
#### Quelle est l'importance de ces scénarios potentiels sur les stratégies plus larges en termes de climat et d'ozone?

Les émissions de base du scénario de la poursuite des activités sont présentées à la figure RT-16. Compte tenu de l'importance des cycles de vie des mousses, tous les graphiques de cette section illustrent l'impact probable jusqu'en 2100 des scénarios de réduction des émissions. L'hypothèse de base, c'est la stagnation des niveaux de consommation des HCFC comme des HFC à partir de 2015, avec un retrait linéaire des HCFC entre 2030 et 2040. En tenant compte des futurs progrès technologiques dans le secteur des mousses, le recours aux HFC ne devrait pas se poursuivre au delà de 2030, avec un déclin linéaire à partir de 2020. Les émissions à partir des stocks, projetées pour 2015, sont également indiquées à titre de référence. Les trois composants principaux du scénario de réduction peuvent se récapituler comme suit:

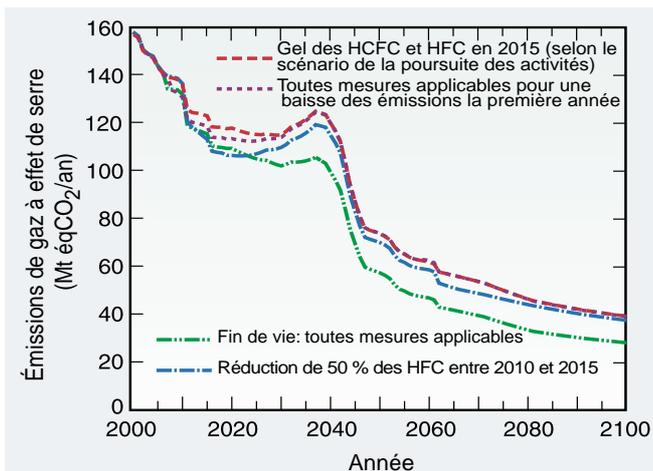
- Diminution linéaire de l'utilisation des HFC entre 2010 et 2015, conduisant à une réduction de 50 % en 2015;
- Adoption des stratégies de réduction des émissions de production à partir de 2005 pour toutes les mousses en blocs, et à partir de 2008 pour tous les autres sous-secteurs des mousses;
- Extension des mesures existantes de fin de vie à tous les appareils et panneaux galvanisés en 2010, associée à un taux de récupération de 20 % à partir des autres mousses de la construction à partir de 2010.

Les impacts résultant de ces trois mesures sont présentés à la figure RT-17 et dans le tableau RT-21.

Il apparaît que se concentrer sur la réduction de la consommation des HFC dégage les économies les plus significatives jusqu'en 2015 et, en partant du principe que cette réduction est extrapolée sur les utilisations types au-delà de 2015, l'avantage



**Figure RT-16.** Émissions d'agents gonflants par groupe (1990-2100), pondérées par l'effet de serre, selon le scénario de la poursuite des activités.

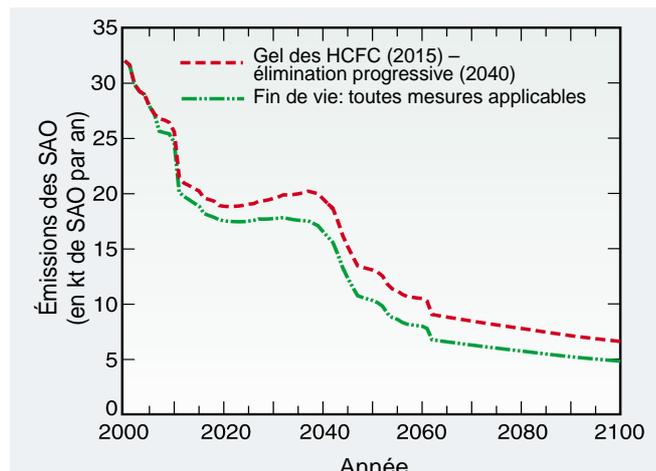


**Figure RT-17.** Résumé des impacts des diverses batteries de mesures.

réalisé reste le plus important en matière de HFC également en 2100. À l'inverse, les mesures en fin de vie dégagent des économies moins importantes d'ici à 2015, mais elles ont le potentiel d'offrir davantage d'économies globales sur la période d'ici 2100, si tous les types d'agents gonflants sont pris en compte. La valeur est particulièrement notable pour les CFC, pour lesquels les PRG sont élevés et qui ont un effet secondaire sur l'appauvrissement de la couche d'ozone.

La réduction potentielle des émissions de SAO de toutes les stratégies viables de fin de vie est illustrée ci-après à la figure RT-18 (exprimée en tonnes de SAO). Il apparaît que les économies d'année en année, de l'ordre de 2 000 à 3 000 tonnes de SAO, vont augmenter d'ici 2100.

Les estimations concernant les réductions des émissions de gaz à effet de serre et de SAO identifiées dans cette analyse à



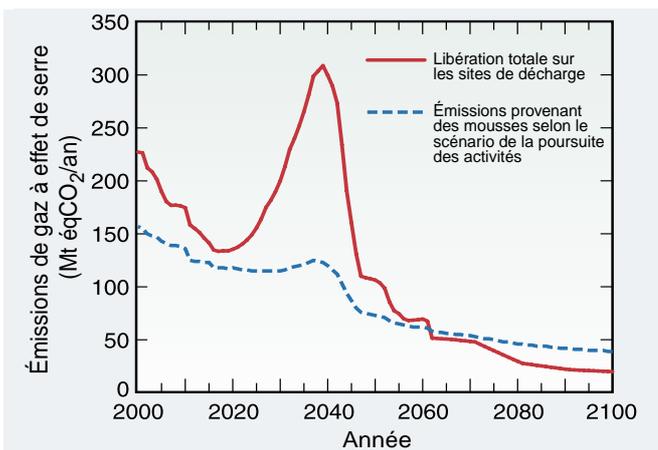
**Figure RT-18.** Impact de toutes les mesures de fin de vie applicables sur la réduction des émissions de SAO.

partir des mesures de fin de vie sont relativement conservatrices, car elles sont mesurées par rapport à une hypothèse qui tient compte de seulement 10-20 % de pertes d'agent gonflant lorsque la mousse est mise en décharge. Cela explique partiellement l'importance des émissions après 2065. Les sites de décharge deviennent alors effectivement des stocks. En appliquant une hypothèse plus agressive aux mousses destinées à la décharge (100 % d'émission à la mise au gravois), la figure RT-19 illustre les conséquences en termes d'émissions à effet de serre.

Tandis qu'on s'accorde à considérer que la réalité se situe quelque part entre ces deux extrêmes, la libération potentielle de tels volumes d'agents gonflants sur une période relativement courte (2030–2050) attire l'attention sur l'intérêt potentiel accru de la prise en charge en fin de vie de ces agents comme option de réduction.

**Tableau RT-21.** Synthèse des impacts des différents ensembles de mesures par type d'agent gonflant: réductions cumulées des émissions résultant de chaque scénario évalué.

Mesures	Année	Réductions cumulées des émissions			
		CFC (tonnes)	HCFC (tonnes)	HFC (tonnes)	Équivalent CO <sub>2</sub> (Mt éqCO <sub>2</sub> )
Réduction de la consommation de HFC (2010-2015)	2015	0	0	31 775	36
	2050	0	0	225 950	259
	2100	0	0	352 350	411
Amélioration des installations et de la production	2015	78	14 450	16 700	36
	2050	58	31 700	32 700	68
	2100	47	24 350	26 500	55
Options de gestion de la fin de vie	2015	8 545	16 375	105	52
	2050	64 150	144 650	88 540	540
	2100	137 700	358 300	194 800	1 200



**Figure RT-19.** Les effets de l'application des diverses hypothèses initiales sur les émissions de décharge.

#### 4.5 Quelles sont les découvertes majeures dans le secteur des aérosols médicaux?

*Les aérosols médicaux sont importants dans le traitement de l'asthme et des broncho-pneumopathies obstructives chroniques.*

L'asthme et les broncho-pneumopathies obstructives chroniques sont les maladies chroniques les plus fréquentes de l'appareil ventilatoire (voies aériennes ou bronches). Selon les estimations, elles affectent plus de 300 millions de personnes de par le monde. Ces maladies coûtent cher au système de protection sociale et provoquent de nombreux arrêts de travail et absences scolaires. Les broncho-pneumopathies sont en outre un facteur de mortalité précoce.

L'asthme est un état chronique qui présente deux aspects: l'inflammation et le rétrécissement des voies aériennes. La plupart des patients asthmatiques présentent ces symptômes en permanence, avec des crises plus aiguës par intermittence. L'asthme apparaît en général dès l'enfance, sa prévalence variant d'environ 1 % dans certains pays comme l'Indonésie à plus de 30 % en Nouvelle-Zélande et en Australie.

Les broncho-pneumopathies obstructives chroniques se caractérisent par le rétrécissement et l'inflammation des voies aériennes, avec dommages du tissu pulmonaire. Principalement causées par le tabagisme, la pollution de l'air agissant comme second facteur potentiel, elles peuvent entraîner une incapacité permanente et la mort. Leur prévalence dans de nombreux pays développés se situe entre 4 et 17 % de la population adulte de plus de 40 ans. Les données sont moins fiables dans les pays en développement mais le chiffre de 26 % a été avancé. Le tabagisme est en déclin dans certains pays industrialisés, tandis qu'il continue de progresser dans les pays en développement au même titre que ces maladies pulmonaires.

Les médicaments par inhalation sont actuellement, et resteront probablement, la norme en matière de traitement. En effet, l'absorption par inhalation d'une molécule atomisée (entre 1 et 5  $\mu$ ) optimise l'effet clinique localisé dans les voies aériennes et présente peu d'effets secondaires. Les aérosols d'inhalation ont fait l'objet d'importants investissements en matière de recherche et développement, répondant à la fois aux

impératifs thérapeutiques et aux enjeux environnementaux. Il existe actuellement deux grands modes d'administration de ces médicaments: les **inhalateurs doseurs** et les **inhalateurs à poudre sèche**.

*Qu'est-ce qu'un inhalateur doseur?*

Les inhalateurs doseurs sont le mode de traitement le plus courant de l'asthme et des broncho-pneumopathies obstructives chroniques à travers le monde. Ils sont apparus au milieu des années 50, alors propulsés au CFC-11 et au CFC-12; le CFC-114 a été introduit plus tard. Afin de parvenir à éliminer les CFC comme le requiert le Protocole de Montréal, les fabricants ont entrepris des recherches intensives pour trouver un propulseur de remplacement approprié. Destiné à un usage médical, celui-ci doit impérativement être sans danger pour la santé et satisfaire à plusieurs autres conditions strictes en termes de sécurité et d'efficacité: 1) gaz liquéfié avec pression adéquate; 2) faible toxicité; 3) ininflammabilité; 4) stabilité chimique; 5) acceptable par les patients (en termes de goût et d'odeur); 6) caractéristiques appropriées de dissolution; et 7) densité convenable. Il a été très difficile d'identifier des composés satisfaisant à tous ces critères; finalement, deux HFC seulement se sont révélés des alternatives viables aux CFC: les HFC-134a et HFC-227ea.

Les composants et les formules des inhalateurs doseurs à base de CFC ont été substantiellement modifiés pour pouvoir exploiter les nouveaux propulseurs aux HFC. Comme tous les dispositifs pharmaceutiques, les inhalateurs doseurs sont soumis à l'homologation des services de santé nationaux afin d'en assurer la sécurité, l'efficacité et la qualité de fabrication. C'est pourquoi le développement des inhalateurs aux HFC est très similaire au développement de tout nouveau médicament, c'est à dire que toute nouvelle formule est soumise à toute une batterie d'essais cliniques. Les coûts de développement (techniques, pharmaceutiques et cliniques) pour passer des CFC aux HFC étaient estimés à environ un milliard de dollars des États-Unis en 1999, à revoir considérablement à la hausse aujourd'hui. Des coûts similaires sont à prévoir pour les programmes de développement d'inhalateurs à poudre sèche devant remplacer les molécules existantes dans les inhalateurs doseurs.

*Qu'est-ce qu'un inhalateur à poudre sèche?*

Les inhalateurs à poudre sèche délivrent un médicament atomisé à une certaine taille (en poudre) sans utiliser de propulseurs. Ils n'ont donc pas d'impact sur la couche d'ozone ni sur le climat. L'administration d'un produit actif sous forme de poudre est complexe du point de vue technique. Ainsi, lorsque les particules sont de taille respirable, elles ont une faible flotabilité dans l'air du fait des forces d'attraction entre elles. En outre, la plupart des formules d'inhalateurs à poudre sont hydrosensibles à la fabrication, au stockage et à l'utilisation. Leur utilisation est donc restreinte dans les climats humides.

Les plus anciens inhalateurs monodose ont été peu utilisés dans les années 60 et 70. D'importants progrès techniques ont permis de développer des inhalateurs multidose plus conviviaux pour les patients, plus largement commercialisés au cours de la dernière décennie, ce qui a permis de ralentir l'utilisation des inhalateurs doseurs. Ces inhalateurs à poudre ont pu être conditionnés pour de nombreux médicaments inhalés et sont désormais disponibles à grande échelle, mais

pas dans tous les pays. Ils ne constituent néanmoins pas une option de remplacement des aérosols doseurs pour tous les patients et tous les produits.

Le coût relatif des inhalateurs à poudre est élevé, notamment comparé à celui des doseurs contenant du salbutamol, qui représentent toujours approximativement 50 % des inhalateurs doseurs prescrits à travers le monde. Dans une étude conduite pour comparer les coûts sur sept pays européens, les inhalateurs à poudre sèche de salbutamol se sont révélés en moyenne 2,6 fois plus coûteux que les inhalateurs doseurs équivalents.

#### *Quels facteurs influencent le choix du traitement?*

Il n'existe pas de prévention primaire de l'asthme, tandis que celle des broncho-pneumopathies obstructives chroniques consiste avant tout à ne pas commencer à fumer. La prévalence de l'asthme et des broncho-pneumopathies devrait continuer à augmenter.

Le choix des médicaments et du mode d'administration dépend du médecin et du patient. Il s'appuie sur divers facteurs, parmi lesquels la nature et la gravité de la maladie, l'observance, la facilité d'utilisation, le coût, la disponibilité et la préférence du patient. Pour qu'un inhalateur soit efficace, il doit être utilisé correctement. Les patients sont souvent en mesure d'utiliser l'un des dispositifs mais pas l'autre. Les inhalateurs doseurs comme les inhalateurs à poudre sèche sont tout aussi importants dans le traitement, mais aucun d'eux ne constitue un mode d'administration universellement acceptable pour tous les patients. Il est donc essentiel de conserver la diversité des options thérapeutiques.

Les inhalateurs doseurs sont le mode le plus courant pour l'asthme et les broncho-pneumopathies obstructives chroniques. Dans les pays développés, le rapport inhalateurs doseurs/inhalateurs à poudre sèche varie substantiellement d'une nation à l'autre: aux États-Unis, il est de 9 contre 1, au Royaume-Uni de 7 contre 3, en Suède de 2 contre 8. Cette situation reflète de nombreux facteurs, tels que la disponibilité (les inhalateurs à poudre sèche multidose ne sont apparus que récemment aux États-Unis alors qu'ils sont fabriqués en Suède depuis très longtemps) et le coût.

#### *Quels sont les développements techniques à venir?*

La croissance annuelle sur le marché mondial des médicaments par inhalation contre les maladies pulmonaires est estimée à 1,5–3 % d'ici 2015. Une grande partie des CFC est remplacée par des HFC (environ 90 % par du HFC-134a et 10 % par du HFC-227ea). D'ici 2010, les inhalateurs doseurs des pays développés contiendront tous des HFC. Après la pointe d'utilisation de plus de 15 000 tonnes par an de CFC sur la période 1987–2000, ce chiffre est tombé à environ 8 000 tonnes, les HFC participant à hauteur de 3 000–4 000 tonnes, sur la période 2001–2004; et d'ici 2015, le volume de HFC utilisé devrait atteindre 13 000–15 000 tonnes. L'utilisation moindre des HFC, comparée à celle des CFC à leur apogée, est partiellement due au développement des inhalateurs à poudre sèche, mais aussi au fait que le volume de HFC libéré à chaque action est plus faible dans les nouveaux appareils.

Aucune percée technique majeure n'est attendue à court terme dans ces produits. La recherche et le développement de nouveaux produits d'inhalation sont des processus de longue haleine, techniquement délicats et coûteux: il faut généralement

plus de 10 ans avant qu'un nouveau produit soit commercialisé. Les dispositifs de l'avenir, comme les nébuliseurs et les inhalateurs à poudre sèche à alimentation pour les rendre autonomes par rapport à la respiration du patient, ou encore les diffuseurs multidose aqueux, seront probablement plus coûteux que les actuels inhalateurs à poudre, et donc encore plus chers que les inhalateurs doseurs au HFC.

Dans les pays en développement, les traitements par inhalation s'effectuent quasi exclusivement à l'aide d'inhalateurs doseurs pressurisés, qu'ils soient produits au niveau local ou par des multinationales. L'amélioration des conditions économiques ainsi que l'adoption de directives thérapeutiques internationales vont certainement accroître sensiblement l'administration de médicaments inhalés. Des inhalateurs à poudre abordables et moins complexes sont techniquement faisables et pourraient donc être fabriqués dans les pays en développement. Il y aurait des difficultés pharmaceutiques importantes sous les climats humides et chauds et ces produits demeureraient plus chers par dose que les inhalateurs doseurs. Si ces inhalateurs étaient disponibles et occupaient une part de marché notable, cela permettrait de réduire les volumes de HFC nécessaires aux inhalateurs doseurs.

#### *Combien coûterait le remplacement de tous les inhalateurs doseurs au HFC par des inhalateurs à poudre sèche?*

En général, les tout derniers inhalateurs à poudre multidose contiennent des médicaments plus coûteux, alors que la moitié des inhalateurs doseurs contiennent du salbutamol, moins cher et du domaine public. Cela explique en partie la différence au niveau des coûts. On estime qu'en 2015, il devrait y avoir 340 millions d'inhalateurs doseurs contenant du salbutamol. Le passage à des inhalateurs de salbutamol en poudre coûterait cher aux systèmes de protection sociale. Le coût du passage complet hypothétique des inhalateurs doseurs au HFC à des inhalateurs à poudre sèche (en partant du principe d'une augmentation par 2 du prix) s'élèverait à 1,7–3,4 milliards de dollars des États-Unis supplémentaires par an (soit 150–300 dollars É.-U./t  $\text{eqCO}_2$ ). La réduction des émissions obtenue représenterait environ 10 Mt  $\text{eqCO}_2$ /an en 2015. Ce coût additionnel aurait un impact considérable sur les soins aux patients.

#### *Y aurait-il des restrictions d'ordre médical à un passage complet des inhalateurs doseurs au HFC aux inhalateurs à poudre sèche?*

Changer le traitement fiable et efficace de patients a toujours des implications médicales et sanitaires. Il est en outre essentiel de proposer toute une gamme d'options de remplacement sûres avant de mettre en œuvre un tel changement à des fins environnementales. Toutes les mesures écologiques futures qui pourraient avoir un impact sur l'utilisation des inhalateurs doseurs au HFC nécessitent des précautions et la consultation de médecins, de patients, des autorités nationales de la santé et autres experts médicaux.

#### *Quelles sont les principales conclusions?*

- En ce qui concerne les inhalateurs doseurs, le principal impact de la réduction des émissions vient de la transition complète des CFC aux HFC.
- Aucun progrès majeur n'est attendu sur le marché des médicaments en aérosol dans les prochaines 10 à 15 années, compte tenu de l'état actuel des technologies et de l'échelle temporelle de développement dont il est question.

- La santé et la sécurité du patient sont des enjeux primordiaux dans le choix d'un traitement et dans les protocoles qui peuvent influencer ces choix.
- Si, hypothétiquement, la molécule la plus inhalée – nommément le salbutamol – passait d'un conditionnement en aérosol au HFC à un inhalateur à poudre, le coût annuel récurrent s'élèverait à 1,7 milliards de dollars des États-Unis avec un coût effectif de la diminution de 150-300 dollars É.-U./t  $\text{éqCO}_2$  pour une réduction d'environ 10 Mt  $\text{éqCO}_2$ /an, d'ici 2015.

#### 4.6 Quelles sont les découvertes majeures dans la protection contre l'incendie?

*Quelles sont les tendances passées et actuelles de la protection contre l'incendie?*

Les halons sont des gaz qui associent sécurité, efficacité et propreté de manière exceptionnelle pour les applications de lutte contre l'incendie. Ces gaz étaient largement utilisés à travers le monde à la fois dans les équipements fixes et portables au début des années 60. Comme ces produits sont très nocifs pour la couche d'ozone, les administrations et les professionnels du feu ont mené la première campagne de retrait à l'échelle de tout le secteur selon les directives du Protocole de Montréal. Cela a conduit au développement de toute une palette d'options de remplacement efficaces pour les nouveaux systèmes. La protection contre l'incendie étant un secteur très réglementé, les alternatives adoptées nécessitent des modifications importantes au niveau des pratiques, des technologies et des normes locales, nationales et internationales. Ces modifications ont permis non seulement de réduire les émissions superflues des stocks d'halons, mais elles s'appliquent également à leurs substituts.

Il existe deux catégories d'applications qui peuvent nécessiter un halon ou un substitut: les systèmes fixes et les extincteurs mobiles. L'halon 1301 a dominé le marché des systèmes fixes avant le Protocole de Montréal et le stock restant s'élevait à environ 45 kilotonnes en 2000. L'halon 1211 servait essentiellement aux extincteurs mobiles et son stock en 2000 a été estimé à environ 154 kilotonnes. L'halon 2402 servait essentiellement dans l'ex-Union soviétique; il n'existe aucune référence documentaire sur les stocks ou les émissions. Les émissions en 2000 étaient estimées à 2,3 kt d'halon 1301 et 17,8 kt d'halon 1211, soit environ 5 % et 11 % de leurs stocks respectifs par an. Une étude suggère que le taux d'émission d'halon 1301 dans les systèmes fixes, à l'exclusion des bateaux et des systèmes aériens et militaires, est de l'ordre infime de 0,12 % par an lorsqu'un niveau exceptionnel de diligence est assuré pour surveiller et conserver l'halon en place pour qu'il joue son rôle contre l'incendie. Ce taux extrêmement faible dans la région en question est essentiellement dû à des facteurs culturels particuliers et des mesures de mise en œuvre inhabituellement strictes, ces deux éléments semblant difficiles à reproduire dans d'autres régions. En moyenne, les taux d'émission des systèmes fixes se situent autour de  $2 \pm 1\%$  par an, et environ le double pour les extincteurs mobiles, soit  $4 \pm 2\%$  par an du stock (y compris les réserves pour la recharge des équipements installés).

La protection contre l'incendie est réglementée de manière stricte dans la plupart des pays. Les nouveaux agents et nouvelles techniques ne peuvent être mis en œuvre qu'une fois qu'ils ont fait la démonstration d'une sécurité et de performances d'extinction acceptables en vertu de protocoles spécifiques. Il est important que les pays ne possédant pas de normes nationales s'efforcent d'adopter les pratiques recommandées par les standards internationaux afin de se protéger contre les alternatives dangereuses ou inefficaces.

Le choix d'une option alternative à l'halon implique l'examen d'un vaste éventail de facteurs. Cela englobe le volume, le poids, le coût, la sécurité, la nécessité de «propreté» (sans résidu ou sans dommage pour les éléments patrimoniaux), le caractère écologique, l'efficacité face à certaines menaces spécifiques – feux de classe A des matériaux solides, de classe B des liquides inflammables, de classe C sur les équipements électriques sous tension – et des conditions particulières (comme le froid extrême).

L'halon n'est plus indispensable dans la quasi-totalité (+ de 95 %) des nouvelles installations qui l'auraient exploité avant Montréal. Les autres sont principalement des applications aériennes commerciales ou militaires pour lesquelles il n'existe pas encore d'alternative. Parmi les applications autrefois protégées par les halons, environ la moitié des nouvelles installations s'appuient sur une solution non gazeuse, telle que l'eau ou les poudres, tandis que les autres exploitent des agents gazeux d'autres natures, dont les hydrocarbures et les gaz inertes.

Dans les systèmes fixes, où un agent d'extinction est nécessaire, les options de remplacement actuellement disponibles sont le  $\text{CO}_2$ , les gaz inertes (comme l'azote et l'argon), les HFC, les PFC, les HCFC et, plus récemment, un fluorocétone (FK). Certaines de ces options n'ont pas d'effet notable sur le climat tandis que d'autres ont un PRG important. Seuls les HCFC appauvrissent la couche d'ozone. Les PFC et les HCFC ont été utilisés dans les premières étapes de la mise en œuvre du Protocole de Montréal, mais ne procurent aucun avantage par rapport aux autres agents d'extinction aux halocarbures. Les nouveaux systèmes au PFC ne sont plus fabriqués compte tenu de l'impact environnemental de ces gaz sur le climat par rapport aux autres options offrant des capacités et un coût comparables. Les systèmes au  $\text{CO}_2$  se prêtent à certaines applications mais ils sont mortels aux concentrations nécessaires pour éteindre un feu. Les gaz inertes peuvent également être exploités pour certaines applications, mais ils ont un impact important en termes de poids et de volume et ne sont pas recommandés lorsque le feu doit être impérativement éteint rapidement car leur débit de projection est cinq à six fois inférieur à celui des systèmes aux halocarbures.

Le tableau RT-22 propose une comparaison des principaux systèmes actuellement utilisés, à l'étude ou à l'essai pour des systèmes d'extinction propres convenant à des espaces habités (en remplacement typique de l'halon 1301). Pour chaque option, les questions de coût relatif sont indiquées, ainsi que les considérations à prendre en compte pour évaluer les effets sur le forçage radiatif du système climatique et les enjeux pratiques, tels que le poids et l'encombrement du système ainsi que ses capacités particulières et sa disponibilité.

Tableau RT-22. Comparaison des systèmes à agent d'extinction convenant aux espaces habités.

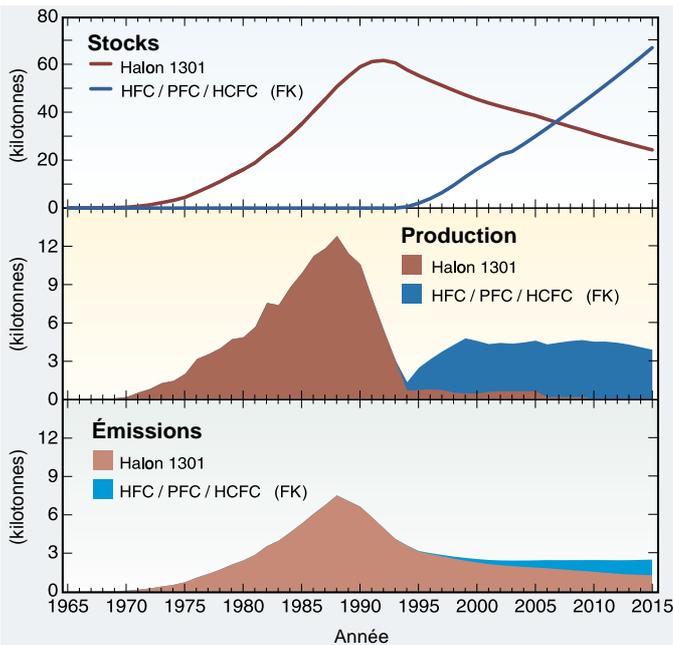
Systèmes fixes	Halon 1301 (référence)	HFC-23	HFC-227ea	HFC-125 <sup>1</sup>	FK- 5-1-12	Gaz inerte
<b>Caractéristiques des substances</b>						
Rendement radiatif (W m <sup>-2</sup> ppb <sup>-1</sup> )	0,32	0,19	0,26	0,23	0,3	n.d.
Durée de vie dans l'atmosphère (an)	65	270	34,2	29	0,038	n.d.
PRG direct (horizon à 100 ans)						
– selon le présent rapport	7 030	14 310	3 140	3 450	n.d. <sup>2</sup>	n.d.
– GIEC (1996)	5 400	11 700	2 900	2 800		
Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone	12	~ 0	-	~ 0	-	n.d.
<b>Données techniques</b>						
Capacités particulières prouvées	oui	oui <sup>3</sup>	oui <sup>4</sup>	oui <sup>5</sup>	voir note <sup>6</sup>	non
Poids (kg m <sup>-3</sup> ) <sup>a</sup>	0,8	2,3	1,1	1,1	1,2	4,3
Superficie (10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	5,8	12,0	6,8	7,4	7,3	28,2
Volume (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) <sup>c</sup>	8,6	18,0	13,1	14,4	13,8	56,6
Taux d'émission <sup>d</sup>	2 ± 1 %	2 ± 1 %	2 ± 1 %	2 ± 1 %	2 ± 1 %	2 ± 1 %
<b>Coûts</b>						
Dépenses d'investissement (par rapport au halon 1301)	100 %	535 %	377 %	355 %	484 %	458 %
Surcoût d'exploitation (dollars É.-U./kg) <sup>e</sup>	0,15	0,43	0,60	0,53	0,72	0,31
Surcoût de la récupération en fin de vie (dollars É.-U./kg) <sup>f</sup> ( ) indique un bénéfice	(3,85)	(10,75)	(15,07)	(13,20)	(18,00)	0,00
Coûts d'abattement HFC (dollars É.-U./t éqCO <sub>2</sub> ) <sup>g</sup>	-	-	-	-	21-22	14-27
<b>Considérations économiques</b>						
Production non monopolistique	-	oui	oui	oui	non <sup>7</sup>	oui

Notes:

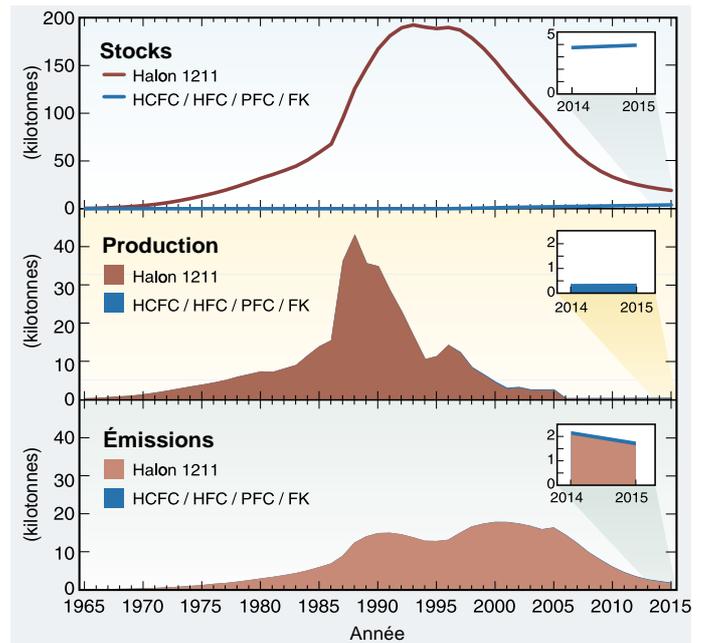
<sup>a</sup> Poids moyen des conteneurs de stockage de l'agent et contenu en kg/m<sup>3</sup> de l'espace protégé.<sup>b</sup> Superficie moyenne d'un carré ou d'un rectangle circonscrivant la réserve cylindrique de l'agent, exprimée en 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup> par m<sup>3</sup> de volume protégé.<sup>c</sup> Le volume moyen correspond à la superficie multipliée par la hauteur des cylindres, mesurée au-dessus des valves, le tout exprimé en 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> par m<sup>3</sup> de volume protégé.<sup>d</sup> Émissions moyennes annuelles calculées sur la durée de vie en service, incluant les projections en cas d'incendie ou d'inadvertance.<sup>e</sup> Les coûts supplémentaires annuels de maintenance sont calculés à partir de l'hypothèse d'un remplacement de 2 % du volume d'agent émis par an.<sup>f</sup> Pour les agents aux halons, la valeur en fin de vie de l'agent est positive et représente un recouvrement des coûts équivalent à 50 % du coût initial de l'agent, ce dernier étant récupéré, recyclé et revendu sous la forme de nouveaux systèmes ou pour compléter des systèmes existants.<sup>g</sup> Les coûts d'abattement du HFC pour le FK-5-1-12 et les gaz inertes s'appuient sur le HFC-227ea, substance prédominante de référence. La valeur la plus faible reflète le coût en dollars É.-U. par tonne d'équivalent CO<sub>2</sub> au taux d'actualisation de 4 %, sans application de taxes. L'intervalle s'étend de la valeur la plus faible au coût le plus élevé aux États-Unis, et en dehors, dans les pays figurant dans l'Annexe I et dans ceux n'y figurant pas.

Explications complémentaires sur les capacités particulières:

- Dans certaines juridictions, il est interdit d'utiliser le HFC-125 dans les zones habitées tandis que dans d'autres, cet usage est permis à certaines conditions.
- Compte tenu de sa faible durée de vie dans l'atmosphère, aucun PRG ne peut être fourni. On considère donc ce potentiel comme négligeable à des fins pratiques (Taniguchi *et al.*, 2003). Voir à ce sujet la section 2.5.3.3 – *Very Short-Lived Hydrocarbons*.
- Le HFC-23 est efficace à basses températures (climats froids) et en volumes importants compte tenu de sa haute tension de vapeur.
- Le HFC-227ea est efficace sur les navires et les véhicules, compte tenu des tests à grande échelle qui ont défini les paramètres d'utilisation et démontré ses capacités particulières dans ce domaine.
- Le HFC-125 est efficace sur les véhicules et les engins volants, compte tenu des tests à grande échelle qui ont défini les paramètres d'utilisation et démontré ses capacités particulières dans ce domaine.
- Le FK-5-1-12 est encore aux premières étapes de son cycle de vie produit et doit encore être testé pour certaines applications spéciales au-delà de celles déterminées par les conditions des essais d'homologation conventionnels ISO et NFPA.
- L'agent FK-5-1-12 est un produit exclusif d'un seul fabricant d'agents, mais il est disponible auprès de différents constructeurs de systèmes.



**Figure RT-20.** Séries chronologiques sur les options alternatives à l'halon 1301 et aux halocarbures dans les systèmes fixes de protection contre l'incendie.



**Figure RT-21.** Séries chronologiques sur l'halon 1211 dans les extincteurs mobiles.

La figure RT-20 est une illustration de la production, des niveaux d'émission et des stocks résultants de l'halon 1301 et de ses substituts HFC/PFC/HCFC/FK entre 1965 et 2015. Le stock d'halon 1301 en 2002 devrait être de 42 434 tonnes, avec 2 052 tonnes d'émissions, ce qui correspond bien aux mesures atmosphériques de 1 000–2 000 tonnes. Le cumul des stocks de tous les substituts HFC/PFC/HCFC/FK dans les systèmes fixes en 2004 est estimé à environ 26 700 tonnes. Les PFC représentent environ 2,5 % de ce total. Selon une estimation, la proportion de HCFC pourrait atteindre environ 3 600 tonnes (soit environ 13 %). Les études suggèrent que des taux d'émission de  $2 \pm 1$  % par an peuvent être atteints dans ces systèmes. Avec un taux de 2 %, les émissions en 2004 représenteraient 1,4 millions de tonnes d'équivalent  $\text{CO}_2$  (Mt  $\text{eqCO}_2$ ).

Pour les extincteurs mobiles, le code des incendies et le coût sont les principaux critères de choix d'une solution alternative (en remplacement de l'halon 1211 généralement). Ceux employant des HFC et des PCF ont du mal à percer sur le marché du fait de leur coût élevé comparé aux produits chargés d'agents d'extinction comme le  $\text{CO}_2$ , les matières sèches ou l'eau. Les HCFC ont mieux réussi mais leur coût représente également un frein par rapport aux agents conventionnels. Les agents en poudre sont entre six et seize fois moins chers que les agents d'extinction et ils sont plus efficaces en termes de cote, mais ils présentent l'inconvénient de déposer des résidus. Les HFC, PFC et HCFC sont les plus chers et les moins efficaces en termes de performances d'extinction (cotes). Le tableau RT-23 propose une comparaison des diverses solutions de remplacement pour les extincteurs mobiles. Pour chaque option, les questions de coût relatif et d'impact sur le climat sont précisées, ainsi que les enjeux pratiques tels que le poids et l'encombrement. Les anciens utilisateurs d'extincteurs mobiles à l'halon 1211 ont désormais trois possibilités: un seul extincteur au HFC/HCFC mais plus cher; un seul extincteur à poudre si les résidus ne posent pas de difficulté majeure; un extincteur à eau

pour les combustibles ordinaires et un second au  $\text{CO}_2$  pour les liquides inflammables et les équipements électriques sous tension. Les législations locales et nationales dictent souvent ce choix.

La figure RT-21 est une illustration de la production, des niveaux d'émission et des stocks résultants de l'halon 1211 et de ses substituts HFC/PFC/HCFC entre 1965 et 2015. Le stock d'halon 1211 en 2002 est estimé à 124 843 tonnes avec 17 319 tonnes d'émissions. Cela représente deux fois les 7 000–8 000 tonnes d'émissions attendues par extrapolation des mesures atmosphériques. Alors qu'il n'existe pas de documentation à ce sujet, les informations fournies par un constructeur, associées à une modélisation, permettent d'estimer que le stock dans les extincteurs mobiles des HCFC, HFC et PFC avoisinait 1 471 tonnes à la fin de 2002, avec des émissions de 0,12 Mt  $\text{eqCO}_2$ . Les estimations pour 2004 sont d'approximativement 1 852 tonnes, avec des émissions de 0,16 Mt  $\text{eqCO}_2$  à un taux de 4 %. Environ 68 % sont des HCFC, 30 % des HFC et 2 % des PFC.

*Quelles sont les tendances futures possibles dans la protection contre l'incendie?*

En 2010 et 2015, les émissions des substituts aux halocarbures dans les systèmes fixes devraient, selon les modèles, atteindre respectivement 2,74 et 3,72 Mt  $\text{eqCO}_2$ . Pour les extincteurs portables, ces estimations sont de l'ordre de 0,25 et 0,34 Mt  $\text{eqCO}_2$ . Elles se fondent sur un taux d'émission de 2 % du stock des systèmes fixes et 4 % de celui des extincteurs mobiles, en partant sur le principe d'une croissance de 3 % par an. Les efforts pour réduire d'autres émissions inutiles dans les systèmes de protection contre le feu pourraient diviser par 2 ces valeurs, tandis qu'un relâchement par rapport aux émissions pourrait les augmenter de 50 %. C'est pourquoi les émissions totales des systèmes fixes sont estimées à  $2 \pm 1$  % par an et celles des systèmes mobiles à  $4 \pm 2$  % par an.

Tableau RT-23. Comparaison des agents d'extinction des extincteurs portables.

Systèmes portables	Halon 1211 (référence)	HCFC mélange B	HFC-236fa	CO <sub>2</sub>	Poudre	Eau
<b>Caractéristiques des substances</b>						
Rendement radiatif (W m <sup>-2</sup> ppb <sup>-1</sup> )	0,3	note <sup>a</sup>	0,28	voir chap. 2	-	-
Durée de vie dans l'atmosphère (an)	16	note <sup>a</sup>	240	voir chap. 2	-	-
PRG direct (horizon à 100 ans)						
– selon le présent rapport	1 860	<650 <sup>a</sup>	9 500	1	-	-
– GIEC (1996)	non fourni	<730 <sup>a</sup>	6 300	1	-	-
Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone	5,3	<0,02 <sup>a</sup>	-	-	-	-
<b>Données techniques</b>						
Résidu d'agent après projection	non	non	non	non	oui	oui
Adéquation aux feux de classe A	oui	oui	oui	non	oui	oui
Adéquation aux feux de classe B	oui	oui	oui	oui	oui	non
Adéquation aux équipements électriques sous tension	oui	oui	oui	oui	oui	non
Cote <sup>b</sup>	2-A:40-B:C	2-A:10-B:C	2-A:10-B:C	10-B:C	3-A:40-B:C	2-A
Charge d'agent (kg)	6,4	7,0	6,0	4,5	2,3	9,5
Poids de l'extincteur chargé (kg)	9,9	12,5	11,6	15,4	4,15	13,1
Hauteur de l'extincteur (mm)	489	546	572	591	432	629
Largeur de l'extincteur (mm)	229	241	241	276	216	229
Taux d'émission <sup>c</sup>	4 ± 2 %	4 ± 2 %	4 ± 2 %	4 ± 2 %	4 ± 2 %	4 ± 2 %
<b>Coûts</b>						
Dépenses d'investissement (par rapport au halon 1211)	100 %	186 %	221 %	78 %	14 %	28 %
Surcoût de maintenance (dollars É.-U./kg)	_d	_d	_d	_d	_d	_d
Surcoût de la récupération en fin de vie (dollars É.-U./kg)	_d	_d	_d	0,00	0,00	0,00

Notes:

<sup>a</sup> HCFC mélange B est un mélange de HCFC-123, de CF<sub>4</sub> et d'argon. Même si le dosage des différents composants est une information confidentielle du producteur, deux sources indiquent que le HCFC-123 représenterait plus de 90 % du mélange en poids, le CF<sub>4</sub> et l'argon constituant le reste. La durée de vie dans l'atmosphère du HCFC-123 est de 1,3 ans tandis que celle du CF<sub>4</sub> s'élève à 50 000 ans.

<sup>b</sup> Cote conforme aux exigences de *Underwriters Laboratories, Inc.* Plus le chiffre est élevé, plus l'extincteur est efficace.

<sup>c</sup> Cette valeur représente les émissions moyennes annuelles calculées sur la durée de vie en service, incluant les projections en cas d'incendie ou d'inadvertance.

<sup>d</sup> Cette information, considérée comme confidentielle, ne fait l'objet d'aucune publication.

Plusieurs options alternatives aux HFC ont été proposées pour la protection contre l'incendie, dont des gaz inertes, des fluorocétones (FK) et des brouillards, mais ce sont les HFC et les gaz inertes qui semblent devenir les agents d'extinction les plus utilisés et qui ont atteint un équilibre sur le marché. Compte tenu de la durée des procédures d'essai et d'homologation des nouveaux types d'équipements de protection contre l'incendie, aucune autre option n'est envisagée qui aurait un impact favorable d'ici 2015. Le FK-5-1-12 a été commercialisé et est désormais disponible sur le marché. Il est cependant impossible de prévoir son taux d'adoption et ses effets sur l'équilibre actuel. Il n'y a actuellement aucune base permettant d'estimer la réduction de l'utilisation ou des émissions de HFC/PFC/HCFC dans le secteur de la protection contre l'incendie d'ici 2015. En outre, il existe une relation entre le stock d'halons et l'utilisation des HFC. En effet, la diminution de l'utilisation des halons va se traduire par l'augmentation de celle des HFC (ou d'autres substituts) pour satisfaire aux conditions de protection contre l'incendie. Il faut donc gérer le stock d'halons avec précaution afin d'en maintenir la disponibilité. La demande en agents d'extinction sera influencée par la croissance économique et les décisions des législateurs et des propriétaires des stocks d'halons en ce qui concerne la prise en charge des agents provenant des systèmes déclassés.

En 2010 et 2015, les stocks devraient être maintenus à 31 et 24 kt pour l'halon 1301 et 33 et 19 kt pour l'halon 1211, mais les émissions et le volume stocké dépendront de l'efficacité des pratiques de contrôle des fuites et de gestion de la récupération en fin de vie. Les stocks de HFC/PFC/HCFC/FK dans les systèmes fixes, à un taux d'émission de 2 %, sont censés atteindre 44 kt en 2010 et 63 kt en 2015, dont environ 3,6 kt de HCFC. Le stock des extincteurs portables à un taux d'émission de 4 % devrait atteindre 3,0 kt en 2010 et 3,9 kt en 2015, en partant d'un taux de croissance de 3 %. Environ 68 % seraient des HCFC, 30 % des HFC et 2 % des PFC. En se projetant dans l'avenir, les émissions à effet de serre des agents d'extinction aux halocarbures pourraient soit augmenter soit diminuer selon l'adoption par le marché des substituts aux halons. Mais la recherche dans les nouvelles technologies de protection contre l'incendie se poursuit et de nouvelles options de remplacement pourraient apparaître après 2015.

## 4.7 Quelles sont les découvertes majeures dans le secteur des aérosols non médicaux, des solvants et des émissions de HFC-23?

### *Quelles sont les tendances passées et actuelles?*

Avant le Protocole de Montréal, les SAO étaient largement utilisées comme solvant de nettoyage des métaux, des composants électroniques et autres applications de précision, ainsi qu'en tant que propulseurs ou solvants des aérosols techniques ou sécuritaires grand public. Les SAO utilisées alors ont été éliminées ou considérablement réduites. La plupart des applications de nettoyage font désormais appel à des substances de remplacement. Une petite proportion est passée ou va passer aux HFC ou aux hydrofluoroéthers (HFE). L'utilisation des PFC est en déclin et devrait disparaître d'ici 2025.

### Aérosols non médicaux

Les produits en aérosol utilisent des gaz sous pression pour propulser les ingrédients sous forme de liquide, pâte ou poudre selon un modèle de diffusion précis, avec taille et quantité des gouttelettes sous contrôle. Ils peuvent également se présenter sous la forme de produits purement gazeux. Dans les pays développés, 98 % des aérosols non médicaux exploitent désormais des propulseurs sans risque pour la couche d'ozone et à très faible impact climatique — hydrocarbures, diméthyléther, CO<sub>2</sub> ou azote. Ces substituts ont déjà permis une réduction totale des émissions à effet de serre de plus de 99 % entre 1977 et 2001. Les autres aérosols utilisent des HCFC (dans les pays en développement où la consommation de HCFC est autorisée jusqu'en 2040) ou des HFC (HFC-152a et HFC-134a) car ce sont des propulseurs qui présentent un avantage pour les utilisateurs en termes de sécurité, de fonctionnement et de santé. L'utilisation des HFC dans les aérosols non médicaux est par ailleurs freinée par leur coût. Ils sont en effet entre 5 et 8 fois plus chers que les hydrocarbures. En 2003, l'utilisation des HFC dans les aérosols correspondait à des émissions totales d'environ 22 Mt éqCO<sub>2</sub>.

### Solvants

En 1999, l'utilisation des solvants à base de SAO aurait été réduite de 90 % grâce à la conservation et à la substitution par des technologies de remplacement (flux sans nettoyage, nettoyage à l'eau ou aux produits aqueux et solvants aux hydrocarbures). Les 10 % restants concernent divers solvants organiques de remplacement. Les substituts de même nature au CFC-113 et au CFC-11 comprennent des HCFC, PFC, HFC et HFE. Les seuls solvants HCFC actuellement employés sont le HCFC-141b et le HCFC-225ca/cb. Le premier se présente essentiellement sous forme de mousses, les applications de type solvant ne représentant que moins de 10 % de son utilisation totale en 2002. Il est désormais interdit dans l'Union européenne et décline rapidement dans les autres pays industrialisés. Dans les pays en développement cependant, son utilisation augmente toujours, notamment en Chine, en Inde et au Brésil, où la croissance économique est forte. Le HCFC-225ca/cb est destiné à des applications très spécifiques. Comme il s'agit d'un produit appauvrissant la couche d'ozone dont l'élimination est programmée, il est progressivement remplacé par des HFC, des HFE et d'autres options de substitution.

### Émissions fugaces et sous-produits

Des émissions de SAO, HFC et PFC se produisent également pendant la fabrication des fluorocarbures, soit sous la forme de sous-produits non souhaités, soit sous celle de pertes de matière (émissions fugaces). Les pertes fugaces sont faibles et représentent généralement moins de 1 % de la production totale. Le plus important des sous-produits est le HFC-23 (fluoroforme), généré au cours de la fabrication du HCFC-22. Même si le Protocole de Montréal préconise l'arrêt progressif de l'utilisation directe du HCFC-22, son utilisation en tant que matière première est autorisée indéfiniment car elle n'implique pas sa libération dans l'atmosphère. La demande mondiale en ce sens a augmenté et devrait continuer de croître bien après 2015. La production augmente rapidement dans les pays en développement, notamment en Chine et en Inde. Les utilisations commerciales (hors matière première) s'arrêteront en 2020 dans les pays développés et en 2040 dans les pays en développement.

La génération du HFC-23 représente de 1,4 à 4 % de la production totale de HCFC-22, selon la gestion et les conditions de la production. Ce produit est par ailleurs le plus puissant

(PRG = 14 310) et persistant (durée de vie dans l'atmosphère = 270 ans) des HFC. Les émissions mondiales auraient augmenté de 12 % entre 1990 et 1995, alors que la production de HCFC-22 augmentait dans les mêmes proportions. Cependant, grâce à la vaste mise en œuvre de méthodes d'optimisation de la production et de destruction thermique dans les pays développés, cette tendance s'est interrompue et a ralenti par rapport à la croissance de la production depuis 1995.

*Quelles sont les options de réduction des émissions?*

#### Aérosols non médicaux

Bien qu'il n'y ait pas d'obstacles techniques au passage des CFC à une option de remplacement pour les aérosols non médicaux, en 2001, on estimait encore à 4 300 tonnes le volume des CFC utilisés dans les pays en développement et ceux dont l'économie est en transition (PET). Les aérosols techniques sont des produits à gaz sous pression utilisés pour nettoyer, entretenir, réparer, essayer, fabriquer ou désinfecter divers types d'équipements servant dans de nombreux processus. L'utilisation majeure des HFC dans ces produits concerne les

produits ménagers, où le remplacement du HFC-134a par le HFC-152a participe grandement à la réduction des émissions à effet de serre. Pour les nettoyeurs (nettoyants pour contacts, décapants) et les agents de démolage, le remplacement du HCFC-141b par des HFE et HFC dont le PRG est plus faible permettra d'accroître la réduction des émissions sans grand enjeu technique. Les aérosols de sécurité (avertisseurs, bornes de gonflage) et les insecticides des avions et des espaces restreints continuent à utiliser le HFC-134a parce qu'il est ininflammable. Les aérosols cosmétiques, grand public et accessoires regroupent notamment la neige artificielle, les sprays de «fil fou» et les «cornes». La plupart de ces dernières (à plus de 80 %) utilisent des hydrocarbures; la neige artificielle et les gadgets ont déjà effectué cette transition, mais compte tenu du nombre d'incidents rendus publics, ces produits ont été reformulés au HFC-134a. L'utilisation des HFC dans ce sous-secteur est en cours d'interdiction dans l'Union européenne.

Le tableau RT-24 présente une comparaison des options pour les aérosols non médicaux.

**Tableau RT-24.** Synthèse des options pour les aérosols non médicaux.

	HCFC-22	HFC-134a	HFC-152a	Diméthyléther	Isobutane <sup>a</sup>
<b>Caractéristiques des substances</b>					
Rendement radiatif (W m <sup>-2</sup> ppb <sup>-1</sup> )	0,20	0,16	0,09	0,02	0,0047
Durée de vie dans l'atmosphère (an)	12	14	1,4	0,015	0,019
PRG (horizon à 100 ans)					
– selon le présent rapport	1 780	1 410	122	1	n.d.
– GIEC (1996)	1 500	1 300	140	1	
SAO	0,05	~ 0	-	-	-
Impact sur l'ozone troposphérique					
– RDM <sup>1</sup> (g d'O <sub>1</sub> /g de substance)	<0,1	<0,1	<0,1	0,93	1,34
– PCOP <sup>2</sup> (unités relatives)	0,1	0,1	1	17	31
Inflammabilité (à partir du point d'éclair)	Nulle	Nulle	Inflammable	Inflammable	Inflammable
<b>Données techniques</b>					
Étape de développement	Commerciale	Commerciale	Commerciale	Commerciale	Commerciale
Type d'application:					
– aérosols techniques	X	X	X	X	X
– aérosols de sécurité	X	X			
– produits grand public	Retiré dans les pays industrialisés		X	X	X
<b>Émissions</b>					
Utilisation totalement émissive dans tous les cas					
<b>Coûts</b>					
Surcoût d'investissement			Exigences sécuritaires spéciales dans les usines de conditionnement	Exigences sécuritaires spéciales dans les usines de conditionnement	Exigences sécuritaires spéciales dans les usines de conditionnement

Notes:

<sup>a</sup> Les valeurs mentionnées se rapportent uniquement à l'isobutane. D'autres gaz propulseurs à base d'hydrocarbures sont utilisés dans les aérosols non médicaux (voir le chapitre 10).

<sup>1</sup> RDM: Réactivité différentielle maximale

<sup>2</sup> PCOP: Potentiel de création d'ozone photochimique

**Solvants**

Bien que les HFC soient disponibles dans toutes les régions, leur utilisation dans les solvants a d'abord touché les pays industrialisés, et plus particulièrement les industries de pointe, compte tenu de leur coût élevé. Avec la prise de conscience croissante de la nécessité de préserver le climat, cette utilisation se recentre sur les applications importantes pour lesquelles il n'existe pas de substituts. L'utilisation actuelle dans les pays industrialisés est donc considérée comme ayant atteint son apogée et devrait décliner dans l'avenir.

Les solvants PFC ne sont plus considérés comme techniquement indispensables à la plupart des applications et leur utilisation est limitée à quelques domaines spécifiques compte tenu de leur performances restreintes et de leur coût élevé. Leur volume a commencé à diminuer au milieu des années 90 lorsqu'ils ont été remplacés par des solvants à plus faible PRG.

Les options de réduction des émissions dans les applications de solvants sont de deux sortes:

- 1) Amélioration du confinement dans les utilisations existantes. Les nouveaux équipements et ceux réaménagés permettent de réduire considérablement les émissions de tous les solvants. Les équipements optimisés permettent de réduire la consommation de solvants jusqu'à 80 % dans certains cas. Compte tenu de leur coût élevé et de la simplicité de leur recyclage, les solvants au fluor sont généralement récupérés et réutilisés par les utilisateurs ou leurs fournisseurs.
- 2) Utilisation de fluides et technologies de remplacement. Il existe des solvants organiques pour remplacer les HFC, PFC et SAO dans diverses applications. Ces fluides de substitution incluent des composants à faible PRG, comme les solvants chlorés traditionnels, les hydrofluoroéthers (HFE) et le bromure de polypropyle. De nombreuses technologies de remplacement, incluant les solvants oxygénés ou à hydrocarbures, sont également des options viables dans certaines applications. La précaution est de mise avant l'adoption de n'importe quelle option dont le profil toxicologique n'est pas complet. Il existe encore des applications pour lesquelles il n'y a pas de substituts car les HFC et PFC y développent des performances exceptionnelles.

**Tableau RT-25.** Panorama des HFC, PFC et HCFC dans les solvants.

	HCFC-141b	HCFC-225ca/cb	HFC-43-10mee	HFC-365mfc	PFC-51-14 (C <sub>6</sub> F <sub>14</sub> )
<b>Caractéristiques des substances</b>					
Rendement radiatif (W m <sup>-2</sup> ppb <sup>-1</sup> )	0,14	0,2/0,32	0,4	0,21	0,49
Durée de vie dans l'atmosphère (an)	9,3	1,9/5,8	15,9	8,6	3 200
PRG (horizon à 100 ans)					
– selon le présent rapport	713	120/586	1 610	782	9 140
– GIEC (1996, 2001)	600	180/620	1 300	890	7 400
SAO	0,12	0,02/0,03	-	-	-
Impact sur l'ozone troposphérique					
– RDM <sup>1</sup> (g d'O <sub>1</sub> /g de substance)	<0,1	<0,1	n.d.	n.d.	n.d.
– PCOP <sup>2</sup> (unités relatives)	0,1	0,2/0,1	n.d.	n.d.	n.d.
Impact sur l'ozone troposphérique	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul
Inflammabilité (à partir du point d'éclair)	Nulle	Nulle	Nulle	Inflammable	Nulle
<b>Données techniques</b>					
Étape de développement	Commerciale	Commerciale	Commerciale	Commerciale	Commerciale
Type d'application:					
– nettoyage des composants électroniques	X	X	X		
– nettoyage de précision	X	X	X	X	X
– nettoyage des métaux	X	X	X		
– séchage	X	X	X	X	
– solvant de support	X	X	X		X

Notes:

<sup>1</sup> RDM: Réactivité différentielle maximale

<sup>2</sup> PCOP: Potentiel de création d'ozone photochimique

**Tableau RT-26.** Panorama des fluides de substitution possibles et des technologies de remplacement dans les applications utilisant des solvants.

	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> <sup>a</sup>	HFE-449s1 <sup>b</sup>	Bromure de polypropyle	Pas de nettoyage	Solvants aux hydrocarbures/à l'oxygène	Solutions aqueuses/semi-aqueuses
<b>Caractéristiques des substances</b>						
Rendement radiatif (W m <sup>-2</sup> ppb <sup>-1</sup> )	0,03	0,31	0,3	n.d.		n.d.
Durée de vie dans l'atmosphère (an)	0,38	5	0,04	n.d.		n.d.
PRG (horizon à 100 ans)						
– selon le présent rapport	10	397	n.d.	n.d.		n.d.
– GIEC (1996)	9	non fourni				
SAO	-	-	-	-	-	-
Impact sur l'ozone troposphérique						
– RDM <sup>1</sup> (g d'O <sub>1</sub> /g de substance)	0,07	n.d.	n.d.			
– PCOP <sup>2</sup> (unités relatives)	7	n.d.	n.d.			
Impact sur l'ozone troposphérique	Faible à modéré	Nul	Faible à modéré	Nul	Faible à modéré	Nul
Inflammabilité (à partir du point d'éclair)	Nulle	Nulle	Nulle	n.d.	Inflammable	n.d.
<b>Données techniques</b>						
Étape de développement	Commerciale	Commerciale	Commerciale	Commerciale	Commerciale	Commerciale
Type d'application:						
– nettoyage des composants électroniques		X	X	X	X	X
– nettoyage de précision		X	X		X	X
– nettoyage des métaux	X	X	X		X	X
– séchage					X	
– solvant de support	X	X	X		X	

Notes:

<sup>a</sup> Les valeurs mentionnées se rapportent uniquement au CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>. D'autres solvants chlorés sont utilisés dans ces applications (voir le chapitre 10).<sup>b</sup> Les valeurs mentionnées se rapportent uniquement au HFE-449s1. D'autres solvants HFE sont utilisés dans ces applications (voir le chapitre 10).<sup>1</sup> RDM: Réactivité différentielle maximale<sup>2</sup> PCOP: Potentiel de création d'ozone photochimique

Les tableaux RT-25 et RT-26 présentent des comparaisons d'options de substitution dans le domaine des solvants.

#### Émissions fugaces et sous-produits

D'un point de vue technique, il est possible de réduire les émissions de HFC-23 découlant du HCFC-22 de plus de 90 % (ou de les diviser par 10) en capturant et détruisant ce sous-produit. Ses émissions devraient néanmoins augmenter de 60 % d'ici 2015, passant de 15 à 23 kt/an car la production de HCFC-22 devrait encore croître. La limite supérieure des émissions de HFC-23 est de l'ordre de 3-4 % de la production de HCFC, mais la quantité réelle produite dépend en partie des modes de production sur chaque site.

Les techniques et les procédures visant à réduire la génération de HFC-23 via l'optimisation des procédés de fabrication peuvent

faire baisser ces émissions à moins de 2 % de la production. Les progrès en la matière varient cependant entre les usines et il est impossible d'éliminer les émissions de HFC-23 de cette façon. La capture et la destruction du HFC-23 par oxydation thermique sont une option très efficace pour réduire les émissions. L'efficacité de la destruction peut être supérieure à 99,0 %, mais l'impact de «l'immobilisation» des unités d'oxydation thermique sur les émissions doit être pris en compte. En partant d'une durée de vie technologique de 15 ans, les coûts d'abattement ne devraient pas dépasser 0,2 dollars É.-U./t éqCO<sub>2</sub>.

Le calcul des émissions de HFC-23 nécessite des informations non seulement sur les quantités de HCFC-22 produites (l'activité) et le taux d'émission (qui dépend des caractéristiques techniques du mode de production ainsi que des méthodes d'exploitation), mais également sur l'étendue de l'abattement

des émissions. Cela joue sur l'incertitude liée aux estimations concernant les émissions futures de HFC-23.

Le tableau RT-27 présente une comparaison de l'optimisation des procédés et de l'oxydation thermique en tant qu'options de réduction des émissions de HFC-23.

#### *Quelles sont les tendances futures possibles?*

##### Aérosols non médicaux

Les émissions de HFC dans les aérosols non médicaux atteindraient 23 Mt  $\text{eqCO}_2$  en 2010. La croissance dans ce secteur devrait donc être faible jusqu'en 2015. Bien qu'il n'y ait aucun obstacle technique à l'élaboration des produits sans HFC, l'utilisation du HFC-152a dans certains produits (laques et déodorants par exemple) va augmenter aux États-Unis suite à la mise en œuvre des réglementations destinées à contrôler la formation de l'ozone troposphérique à partir des émissions d'hydrocarbures. Le contrôle actuel des composés organiques volatils en Europe n'interdit pas l'utilisation des HFC parce que le spectre de ces composés est très large (point d'ébullition inférieur à 250 °C dans des conditions de température et de pression standard). Aucune autre législation sur ces produits identifiée ailleurs dans le monde ne limite l'utilisation des hydrocarbures dans les aérosols non médicaux.

##### Solvants

La plupart des utilisations de solvants sont émissives par nature, avec une période de stockage courte, de quelques mois

à deux ans. Bien que les solvants utilisés puissent être, et soient, distillés et recyclés sur place, quasiment toutes les quantités vendues sont destinées à être émises un jour. La distinction entre la consommation et les émissions (donc le stockage) est négligeable pour ces applications. Les émissions mondiales de HFC et PFC provenant de solvants sont estimées à 4,2 Mt  $\text{eqCO}_2$  en 2010 et 4,4 Mt  $\text{eqCO}_2$  en 2015. Celles des PFC devraient diminuer de manière linéaire jusqu'à ce que ces produits ne soient plus utilisés dans les solvants en 2025.

##### Émissions de HFC-23 (sous-produit)

La quantité de HFC-23 produite (et potentiellement émise) est directement liée à la production de HCFC-22. C'est pourquoi l'estimation des émissions nécessite un scénario sur les volumes de production à venir de cette matière. Celle-ci dépendra à son tour de la consommation de HCFC-22 en déclin dans les pays développés, de celle des pays en développement et de la demande mondiale de polymères fluorés en tant que matière première, toutes deux en pleine croissance.

Selon le scénario de la poursuite des activités, qui se contente de suivre les recommandations du Protocole de Montréal, la consommation et la production de HCFC-22 qui ne servirait pas de matière première devraient être divisées par 10 d'ici 2015, par rapport au niveau moyen des pays développés en 2000-2003. Dans ces mêmes pays, la croissance de la demande de polymères fluorés en tant que matière première devrait continuer à augmenter de manière linéaire. Cette demande doublerait ainsi d'ici 2015. Dans les pays en développement, la

**Tableau RT-27.** Comparaison des options de réduction du HFC-23 issu de la production de HCFC-22: optimisation des processus et oxydation thermique.

	HCFC-22	HFC-23		
<b>Caractéristiques des substances</b>				
Rendement radiatif ( $\text{W m}^{-2} \text{ppb}^{-1}$ )	0,20	0,19		
Durée de vie dans l'atmosphère (an)	12	270		
PRG (horizon à 100 ans)				
– selon le présent rapport	1 780	14 310		
– GIEC (1996)	1 500	11 700		
SAO	0,05	~0		
Inflammabilité	Nulle	Nulle		
<b>Options de réduction des émissions de HFC-23</b>				
	<b>Aucune optimisation</b>	<b>Optimisation des processus</b>	<b>Oxydation thermique</b>	
Étape de développement	Commerciale	Commerciale	Commerciale	
Émissions directes	3-4 % du HCFC-22 produit	2-3 % du HCFC-22 produit	Moins de 1 % du HCFC-22 produit	
Surcoût	Valeur de référence	Dépend du processus et du marché. Peut aller d'économies marginales à une pénalité substantielle	2-8 millions de dollars É.-U. au total en dépenses d'installation et 189 000-350 000 dollars É.-U. de coûts d'exploitation annuels	

production totale de HCFC-22 a rapidement augmenté ces dernières années. Sur la période 1997-2001, la production à des fins commerciales s'est accrue de manière linéaire de 20 kt/an et celle de la matière première de 4,1 kt/an. En suivant ces taux jusqu'en 2015, la demande totale de HCFC-22 s'élèverait à 730 kt/an (dont 40 % de matière première), contre 470 kt/an en 2000. (Tableau RT-28.)

Dans le scénario de la poursuite des activités jusqu'en 2015, on part du principe que les émissions provenant des capacités existantes (dans les pays industrialisés et en développement) se poursuivent au taux de 2 % de la production de HCFC-22 et que les nouvelles capacités (essentiellement dans les pays en développement) émettent du HFC-23 au taux de 4 %. Par conséquent, les émissions de HFC-23 pourraient augmenter de 60 % d'ici 2015 — passant de 15 kt/an en 2003 à 23 kt/an (tableau RT-28).

Dans une variante de ce scénario, les meilleures pratiques technologiques actuelles qui concernent la capture et l'oxydation thermique des «gaz d'évent» sont progressivement mises en œuvre dans toutes les installations, à partir de 2005. La technique de destruction devrait être efficace à 100 % et fonctionner pendant 90 % des heures ouvrées des usines de HCFC-22. Les émissions ont été calculées selon l'hypothèse d'une activité identique (en termes de volume de HCFC-22 produit) au scénario de la poursuite des activités. La différence entre les deux estimations de HFC-23 est donc uniquement due à l'ampleur de mise en œuvre de la technique de destruction.

Les prévisions représentent des cas potentiels extrêmes et l'évolution future des activités va certainement accroître la probabilité de l'un ou l'autre des cas de figure.

La destruction des émissions de HFC-23 découlant de la production de HCFC-22 offre un potentiel de réduction pouvant atteindre 300 Mt  $\text{éqCO}_2$ /an d'ici 2015 et un coût spécifique inférieur à 0,2 dollars É.-U./t  $\text{éqCO}_2$ , selon deux études européennes menées en 2000. La diminution de la production de HCFC-22 consécutive aux lois du marché et aux politiques nationales, ou aux améliorations des sites de production, pourrait également induire la réduction des émissions de HFC-23. [10.4]

**Tableau RT-28.** Émissions passées et futures du HFC-23.

Année	HCFC-22 Scénario de production (kt)	HFC-23 Émissions dans un scénario de poursuite des activités (kt)	HFC-23 Émissions selon les meilleures pratiques actuelles (kt)
1990	341	6,4	6,4
1995	385	7,3	7,3
2000	491	11,5	11,5
2005	550	15,2	13,8
2010	622	19,0	8,8
2015	707	23,2	2,3

## Annexe I: Glossaire

Les définitions ci-après renvoient aux termes employés dans les résumés du Rapport spécial sur l'ozone et le climat.

### Aérosol

Très fine particule solide ou liquide en suspension dans un gaz. Le terme est également associé, dans le langage courant, aux récipients sous pression qui vaporisent un fin nuage de produit grâce à un gaz propulseur.

### Agent gonflant (mousse)

Gaz, liquide volatil ou substance solide qui libère un gaz pendant l'opération de gonflement de manière à former des bulles ou des alvéoles dans la structure des mousses en matière plastique.

### Analyse du cycle de vie (ACV)

Étude de l'impact d'un produit sur l'environnement tout au long de sa durée de vie (fabrication, utilisation et recyclage ou élimination).

### Appauvrissement de la couche d'ozone

Destruction chimique accélérée de l'ozone stratosphérique par des substances découlant des activités humaines.

### Changements climatiques

Variations statistiquement significatives de l'état moyen du climat ou de sa variabilité, persistant pendant de longues périodes (généralement des décennies ou plus). Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes ou des forçages externes d'origine naturelle, ou à des changements anthropiques persistants de la composition de l'atmosphère ou de l'affectation des terres.

La Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), dans son article premier, définit les changements climatiques comme des «changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables». La CCNUCC établit ainsi une distinction entre les «changements climatiques» qui peuvent être attribués aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère et la «variabilité climatique» due à des causes naturelles.

### Chlorofluorocarbures (CFC)

Hydrocarbures halogénés contenant uniquement des atomes de chlore, de fluor et de carbone. Ce sont à la fois des substances qui appauvrissent la couche d'ozone et des gaz à effet de serre.

### Colonne d'ozone

Quantité totale d'ozone présent dans une colonne verticale au-dessus de la surface de la Terre. Elle est exprimée en unités Dobson.

### Confinement (réfrigération)

Recours à des techniques ou à des dispositifs spéciaux propres à prévenir ou à réduire la fuite de frigorigène lors de la pose, du fonctionnement, de la réparation ou de la mise au rebut d'appareils de réfrigération ou de climatisation.

### Coûts associés (mesures de réduction)

Écart de coût entre une mesure de réduction et un cas de référence. Les coûts associés aux mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre sont généralement exprimés, dans le rapport, en dollars des États-Unis par tonne d'émissions évitées en équivalent CO<sub>2</sub> (dollars É.-U./t éqCO<sub>2</sub>).

### Destruction

Élimination des substances qui appauvrissent la couche d'ozone dans des installations agréées, afin d'éviter leur libération.

### Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)

Gaz présent à l'état naturel. C'est également un sous-produit de la combustion des matières fossiles ou de la biomasse, ainsi que d'autres procédés industriels, et un effet secondaire des changements d'affectation des terres. C'est le principal gaz à effet de serre d'origine anthropique qui influe sur le bilan radiatif de la Terre. Il sert souvent de référence pour la mesure d'autres gaz à effet de serre.

### Équivalent CO<sub>2</sub> (éqCO<sub>2</sub>)

Quantité de dioxyde de carbone qui entraînerait un forçage radiatif de même importance qu'une quantité donnée d'un autre gaz à effet de serre. S'agissant de concentrations, le terme désigne le forçage radiatif instantané provoqué par un gaz à effet de serre ou sa quantité équivalente de CO<sub>2</sub>. S'agissant d'émissions, le terme désigne le forçage radiatif, intégré dans le temps jusqu'à une date donnée, qui est provoqué par la variation des concentrations imputable aux émissions. Voir également *Potentiel de réchauffement global*.

### Fluorocarbures

Hydrocarbures halogénés contenant des atomes de fluor, ce qui inclut les chlorofluorocarbures (CFC), les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), les hydrofluorocarbures (HFC) et les hydrocarbures perfluorés (PFC).

### Fluorocétones

Composés organiques dans lesquels deux groupes alkyles entièrement fluorés sont liés à un groupe carbonyle (C=O).

### Forçage radiatif

Changement de l'éclairement énergétique net (exprimé en watts par mètre carré –  $W m^{-2}$ ) à la tropopause dû à une modification interne ou à une variation du forçage externe du système climatique (fluctuation de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ou du rayonnement solaire, par exemple). En général, il est calculé en tenant compte du réajustement des températures stratosphériques à l'équilibre radiatif, en maintenant toutes les propriétés troposphériques à leurs valeurs non modifiées. On le dit *instantané* quand la variation des températures stratosphériques n'est pas prise en considération. Voir également *Potentiel de réchauffement global*.

### Frigorigène (réfrigération)

Fluide caloporteur, généralement liquide, présent dans les réfrigérateurs, les congélateurs, les climatiseurs, etc.

### Gaz à effet de serre

Composants gazeux de l'atmosphère, naturels et anthropiques, qui absorbent et émettent des radiations dans le spectre du rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, par l'atmosphère et par les nuages. Cette propriété cause l'effet de serre. La vapeur d'eau ( $H_2O$ ), le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), l'oxyde nitreux ( $N_2O$ ), le méthane ( $CH_4$ ) et l'ozone ( $O_3$ ) sont les principaux gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère terrestre. Il existe également des gaz à effet de serre résultant uniquement des activités humaines, tels les hydrocarbures halogénés et autres substances contenant du chlore et du brome, qui sont réglementés par le Protocole de Montréal. L'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ), les hydrofluorocarbures (HFC) et les hydrocarbures perfluorés (PFC) sont des gaz présents à l'état de traces qui contribuent eux aussi à l'effet de serre.

### Halocarbures ou hydrocarbures halogénés

Composés chimiques contenant des atomes de carbone et un ou plusieurs atomes de chlore (Cl), de fluor (F), de brome (Br) ou d'iode (I). Les *hydrocarbures entièrement halogénés* ne sont composés que d'atomes de carbone et d'halogènes, tandis que les *hydrocarbures partiellement halogénés* renferment également des atomes d'hydrogène (H). Les composés qui émettent du chlore, du brome ou de l'iode dans l'atmosphère contribuent à l'appauvrissement de la couche d'ozone. Les hydrocarbures halogénés sont également des gaz à effet de serre. Ils comprennent les chlorofluorocarbures (CFC), les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), les hydrofluorocarbures (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC) et les halons.

### Halons

Hydrocarbures entièrement halogénés contenant des atomes de brome et de fluor.

### Hydrocarbures (HC)

Composés chimiques contenant un ou plusieurs atomes de carbone entourés d'atomes d'hydrogène.

### Hydrocarbures perfluorés (PFC)

Hydrocarbures halogénés synthétiques contenant uniquement des atomes de carbone et de fluor. Extrêmement stables, ininflammables et peu toxiques, ils présentent un potentiel nul d'appauvrissement de la couche d'ozone mais un potentiel élevé de réchauffement global.

### Hydrochlorofluorocarbures (HCFC)

Hydrocarbures halogénés contenant uniquement des atomes d'hydrogène, de chlore, de fluor et de carbone. Ils contribuent à l'appauvrissement de la couche d'ozone en raison du chlore présent dans leur composition et sont également des gaz à effet de serre.

### Hydrofluorocarbures (HFC)

Hydrocarbures halogénés contenant uniquement des atomes de carbone, d'hydrogène et de fluor. Ils ne contribuent pas à l'appauvrissement de la couche d'ozone, étant exempts de chlore, de brome ou d'iode, mais sont des gaz à effet de serre actifs, comme les autres hydrocarbures halogénés.

### Hydrofluoroéthers (HFE)

Substances chimiques contenant de l'hydrogène, du fluor et de l'éther qui présentent des propriétés similaires à celles de certaines substances nocives pour l'ozone utilisées comme solvants.

### Impact sur le climat au cours du cycle de vie (LCCP)

Indice de la contribution globale d'un appareil au réchauffement de la planète, mesuré par les émissions totales de gaz à effet de serre qui lui sont associées tout au long de sa durée de vie. Il s'agit d'un élargissement du concept d'impact total équivalent sur le réchauffement planétaire (TEWI). L'indice LCCP tient compte des émissions directes fugaces survenant pendant la fabrication et des émissions de gaz à effet de serre associées à la consommation d'énergie.

### Impact total équivalent sur le réchauffement planétaire (TEWI)

Indice de la contribution globale d'un appareil au réchauffement de la planète, mesuré par les émissions totales de gaz à effet de serre qui lui sont associées pendant son fonctionnement et lors de l'élimination des fluides qu'il renferme à la fin de sa durée de vie. L'indice TEWI tient compte des émissions directes fugaces et des émissions indirectes produites par la consommation d'énergie en cours de fonctionnement. Il est exprimé en unités de masse d'équivalent  $CO_2$ . Voir également *Impact sur le climat au cours du cycle de vie (LCCP)*.

### Inhalateur à poudre sèche (médecine)

Appareil susceptible de remplacer les inhalateurs doseurs lorsque le médicament, réduit en poudre extrêmement fine, peut être inhalé sans l'aide d'un propulseur chimique.

### Inhalateur doseur (médecine)

Appareil servant à administrer un médicament dans l'appareil pulmonaire.

**Meilleures pratiques**

Technologies éprouvées permettant d'atteindre à une date donnée les émissions les plus faibles possibles d'hydrocarbures halogénés pour produire, utiliser, remplacer, récupérer et détruire ces substances ou les produits qui en renferment.

**Mélange (réfrigération)**

Combinaison de plusieurs fluides purs. On s'en sert pour obtenir certaines propriétés dans le domaine de la réfrigération. Ainsi, l'association de composants inflammables et ininflammables peut donner un mélange ininflammable. Il existe des mélanges azéotropiques, non azéotropiques et quasi azéotropiques.

**Miscible**

Propriété que présentent deux substances, en phase liquide ou gazeuse, de se fondre uniformément l'une dans l'autre. Les liquides immiscibles, au contraire, forment deux couches séparées.

**Mousse monocomposant**

Mousse dont l'agent gonflant sert aussi de propulseur. Ce genre de produit est davantage destiné à colmater les orifices (ou empêcher l'infiltration d'air) qu'à assurer une isolation thermique. L'utilisation d'un agent gonflant en tant que tel produit des émissions.

**Ozone (O<sub>3</sub>)**

Forme triatomique de l'oxygène, composant gazeux de l'atmosphère. Dans la troposphère, il est créé par réaction photochimique de gaz présents à l'état naturel et de gaz résultant des activités humaines («smog»). L'ozone troposphérique est un gaz à effet de serre. Dans la stratosphère, il est créé par interaction entre le rayonnement ultraviolet solaire et l'oxygène moléculaire (O<sub>2</sub>). L'ozone stratosphérique joue un rôle décisif dans l'équilibre radiatif de la stratosphère. C'est dans la couche d'ozone que sa concentration est la plus élevée.

**Potentiel de réchauffement global (PRG)**

Indice de l'impact sur le climat qu'aurait l'émission d'un gaz à effet de serre par rapport à l'émission de la même quantité de dioxyde de carbone. C'est le rapport du forçage radiatif intégré dans le temps produit par l'émission pulsée d'un kilogramme d'une substance sur celui d'un kilogramme de dioxyde de carbone, à un horizon temporel fixe. Voir également *Forçage radiatif*.

**Récupération**

Collecte et stockage de substances réglementées provenant de machines, d'appareils, de dispositifs de confinement, etc. pendant leur entretien ou avant leur mise au rebut, sans nécessairement procéder à des essais ou à un traitement quelconque.

**Recyclage**

Réutilisation d'une substance réglementée qui a été récupérée à la suite d'une opération de nettoyage de base telle que le filtrage et le séchage. Le recyclage des frigorigènes comprend normalement la recharge des appareils, qui se fait souvent sur place.

**Scénario de la poursuite des activités (jusqu'en 2015)**

Scénario de référence relatif à l'utilisation des hydrocarbures halogénés et de leurs produits de remplacement, selon lequel toutes les dispositions réglementaires en vigueur et les mesures d'élimination en cours, notamment dans le cadre du Protocole de Montréal et des lois nationales, se poursuivent jusqu'en 2015. Les pratiques courantes, y compris la récupération en fin de vie, et les taux d'émission restent les mêmes.

**Scénarios du RSSE**

Scénarios exposés dans le Rapport spécial sur les scénarios d'émissions publié par le GIEC en 2000.

**Solvant**

Tout produit (aqueux ou organique) destiné à nettoyer une pièce ou un appareil par dissolution des contaminants présents à sa surface.

**Stocks**

Quantité totale de substances qui sont présentes dans des appareils, dépôts, mousses et autres produits mais qui n'ont pas encore été libérées dans l'atmosphère.

**Stratosphère**

Région très stratifiée de l'atmosphère située au-dessus de la troposphère. Elle s'élève à partir de 8 km aux hautes latitudes et de 16 km dans la zone tropicale, jusqu'à une altitude de 50 km environ. La température y croît avec l'altitude.

**Substances qui appauvrissent la couche d'ozone (SAO)**

Substances qui détruisent l'ozone stratosphérique. Le Protocole de Montréal et ses amendements réglementent l'emploi des chlorofluorocarbures (CFC), des hydrochlorofluorocarbures (HCFC), des halons, du bromure de méthyle (CH<sub>3</sub>Br), du tétrachlorure de carbone (CCl<sub>4</sub>), du méthylchloroforme (CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>), des hydrobromofluorocarbures (HBFC) et du bromochlorométhane (CH<sub>2</sub>BrCl).

**Technologies de remplacement**

Moyens d'obtenir les résultats escomptés sans employer d'hydrocarbures halogénés, en général par des méthodes différentes ou des techniques non conventionnelles. Exemples: déodorants en bâton ou en pulvérisateur à la place des aérosols au CFC-12, laine minérale à la place des mousses isolantes aux CFC, HFC ou HCFC, inhalateurs à poudre sèche à la place des inhalateurs doseurs aux CFC ou HFC.

**Troposphère**

Partie inférieure de l'atmosphère terrestre, dans laquelle se forment les nuages et les phénomènes météorologiques. Son épaisseur moyenne est de 9 km aux hautes latitudes, 10 km aux latitudes moyennes et 16 km dans la zone tropicale. En général, la température y décroît avec l'altitude.

**Variabilité climatique**

Variation de l'état moyen et d'autres statistiques (écarts types, fréquence des phénomènes extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales au-delà des phénomènes climatiques individuels. Elle peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité interne) ou à la modification des forçages externes anthropiques ou naturels (variabilité externe). Voir également *Changements climatiques*.

---

## Annexe II: Formules chimiques et nomenclature

On trouvera dans cette annexe les formules chimiques et la nomenclature des substances renfermant de l'halogène et des autres espèces qui apparaissent dans le Résumé à l'intention des décideurs.

Le *Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone* réglemente la production et la consommation des hydrocarbures halogénés suivants: chlorofluorocarbures (CFC), hydrochlorofluorocarbures (HCFC), halons, hydrobromofluorocarbures (HBFC), tétrachlorure de carbone ( $\text{CCl}_4$ ), méthylchloroforme ( $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ ), bromure de méthyle ( $\text{CH}_3\text{Br}$ ) et bromochlorométhane ( $\text{CH}_2\text{BrCl}$ ).

La *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques* vise les émissions anthropiques des gaz à effet de serre qui ne sont pas régis par le Protocole de Montréal. Le *Protocole de Kyoto* porte sur les gaz à effet de serre suivants: dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), méthane ( $\text{CH}_4$ ), oxyde nitreux ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hydrofluorocarbures (HFC), hydrocarbures perfluorés (PFC) et hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ).

### Halocarbures ou hydrocarbures halogénés

Les colonnes du tableau donnent les informations ci-après pour chaque espèce:

- Substance chimique [nombre d'isomères, quand il y en a plusieurs] (ou appellation courante);
- Formule chimique;
- Nom chimique (ou autre appellation).

<i>Chlorofluorocarbures (CFC)</i>		[Production et consommation réglementées par le Protocole de Montréal] <sup>1</sup>
CFC-11	$\text{CCl}_3\text{F}$	Trichlorofluorométhane
CFC-12	$\text{CCl}_2\text{F}_2$	Dichlorodifluorométhane
CFC-13	$\text{CClF}_3$	Chlorotrifluorométhane
CFC-113 [2]	$\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$	Trichlorotrifluoroéthane
CFC-113	$\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$	1,1,2-Trichloro-1,2,2-trifluoroéthane
CFC-113a	$\text{CCl}_3\text{CF}_3$	1,1,1-Trichloro-2,2,2-trifluoroéthane
CFC-114 [2]	$\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4$	Dichlorotétrafluoroéthane
CFC-114	$\text{CClF}_2\text{CClF}_2$	1,2-Dichloro-1,1,2,2-tétrafluoroéthane
CFC-114a	$\text{CCl}_2\text{FCF}_3$	1,1-Dichloro-1,2,2,2-tétrafluoroéthane
CFC-115	$\text{CClF}_2\text{CF}_3$	Chloropentafluoroéthane

<sup>1</sup> Le Protocole de Montréal réglemente d'autres substances qui ne sont pas présentées ici.

<i>Hydrochlorofluorocarbures (HCFC)</i> [Production et consommation réglementées par le Protocole de Montréal] <sup>1</sup>		
HCFC-21	CHCl <sub>2</sub> F	Dichlorofluorométhane
HCFC-22	CHClF <sub>2</sub>	Chlorodifluorométhane
HCFC-123 [3]	C <sub>2</sub> HCl <sub>2</sub> F <sub>3</sub>	Dichlorotrifluoroéthane
HCFC-123	CHCl <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroéthane
HCFC-123a	C <sub>2</sub> HCl <sub>2</sub> F <sub>3</sub>	1,2-Dichloro-1,1,2-trifluoroéthane
HCFC-123b	C <sub>2</sub> HCl <sub>2</sub> F <sub>3</sub>	1,1-Dichloro-1,2,2-trifluoroéthane
HCFC-124 [2]		Chlorotétrafluoroéthane
HCFC-124	CHClFCF <sub>3</sub>	2-Chloro-1,1,1,2-tétrafluoroéthane
HCFC-124a	C <sub>2</sub> HClF <sub>4</sub>	1-Chloro-1,1,2,2-tétrafluoroéthane
HCFC-141b	CH <sub>3</sub> CCl <sub>2</sub> F	1,1-Dichloro-1-fluoroéthane
HCFC-142b	CH <sub>3</sub> CClF <sub>2</sub>	1-Chloro-1,1-difluoroéthane
HCFC-225ca	CHCl <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	3,3-Dichloro-1,1,1,2,2-pentafluoropropane
HCFC-225cb	CHClFCF <sub>2</sub> CClF <sub>2</sub>	1,3-Dichloro-1,1,2,2,3-pentafluoropropane

<i>Halons</i> [Production et consommation réglementées par le Protocole de Montréal] <sup>1</sup>		
Halon-1202	CBr <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	Dibromodifluorométhane
Halon-1211	CBrClF <sub>2</sub>	Bromochlorodifluorométhane (Chlorodifluorobromométhane), R-12B1
Halon-1301	CBrF <sub>3</sub>	Bromotrifluorométhane, R-13B1
Halon-2402	CBrF <sub>2</sub> CBrF <sub>2</sub>	1,2-Dibromotétrafluoroéthane (1,1,2,2-Tétrafluoro-1,2-dibromoéthane, 1,2-Dibromo-1,1,2,2-tétrafluoroéthane)

<i>Autres hydrocarbures halogénés</i> [Production et consommation réglementées par le Protocole de Montréal] <sup>1</sup>		
Tétrachlorure de carbone	CCl <sub>4</sub>	Halon 104, R-10
Méthylchloroforme	CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	1,1,1-Trichloroéthane
Bromure de méthyle	CH <sub>3</sub> Br	Halon-1001, Bromométhane
Bromochlorométhane	CH <sub>2</sub> BrCl	Halon-1011

<i>Hydrofluorocarbures (HFC)</i>		
HFC-23	$\text{CHF}_3$	Trifluorométhane
HFC-32	$\text{CH}_2\text{F}_2$	Difluorométhane (Fluorure de méthylène)
HFC-41	$\text{CH}_3\text{F}$	Fluorométhane (Fluorure de méthyle)
HFC-125	$\text{CHF}_2\text{CF}_3$	Pentafluoroéthane
HFC-134 [2]	$\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$	Tétrafluoroéthane
HFC-134	$\text{CHF}_2\text{CHF}_2$	1,1,2,2-Tétrafluoroéthane
HFC-134a	$\text{CH}_2\text{FCF}_3$	1,1,1,2-Tétrafluoroéthane
HFC-143 [2]	$\text{C}_2\text{H}_3\text{F}_3$	Trifluoroéthane
HFC-143	$\text{CH}_2\text{FCHF}_2$	1,1,2-Trifluoroéthane
HFC-143a	$\text{CH}_3\text{CF}_3$	1,1,1-Trifluoroéthane
HFC-152 [2]	$\text{C}_2\text{H}_4\text{F}_2$	Difluoroéthane
HFC-152	$\text{CH}_2\text{FCH}_2\text{F}$	1,2-Difluoroéthane
HFC-152a	$\text{CHF}_2\text{CH}_3$	1,1-Difluoroéthane
HFC-161	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{F}$	Monofluoroéthane (Fluorure d'éthyle)
HFC-227 [2]	$\text{C}_3\text{HF}_7$	Heptafluoropropane
HFC-227ca	$\text{CF}_3\text{CF}_2\text{CHF}_2$	1,1,1,2,2,3,3-Heptafluoropropane
HFC-227ea	$\text{CF}_3\text{CHFCF}_3$	1,1,1,2,3,3,3-Heptafluoropropane
HFC-236 [4]	$\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_6$	Hexafluoropropane
HFC-236ca	$\text{CHF}_2\text{CF}_2\text{CHF}_2$	1,1,2,2,3,3-Hexafluoropropane
HFC-236cb	$\text{CH}_2\text{FCF}_2\text{CF}_3$	1,1,1,2,2,3-Hexafluoropropane
HFC-236ea	$\text{CHF}_2\text{CHFCF}_3$	1,1,1,2,3,3-Hexafluoropropane
HFC-236fa	$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CF}_3$	1,1,1,3,3,3-Hexafluoropropane
HFC-245 [5]	$\text{C}_3\text{H}_3\text{F}_5$	Pentafluoropropane
p.ex. HFC-245ca	$\text{CH}_2\text{FCF}_2\text{CHF}_2$	1,1,2,2,3-Pentafluoropropane
HFC-245fa	$\text{CHF}_2\text{CH}_2\text{CF}_3$	1,1,1,3,3-Pentafluoropropane
HFC-365mfc	$\text{CH}_3\text{CF}_2\text{CH}_2\text{CF}_3$	1,1,1,3,3-Pentafluorobutane
HFC-43-10mee	$\text{CF}_3\text{CHFCHFCF}_2\text{CF}_3$	1,1,1,2,2,3,4,5,5-Décafluoropentane (2H,3H-Perfluoropentane)
HFC-c-447ef	c- $\text{C}_5\text{H}_3\text{F}_7$	Heptafluorocyclopentane

<i>Hydrocarbures perfluorés (PFC)</i>		
PFC-14	$\text{CF}_4$	Tétrafluorométhane (Tétrafluorure de carbone)
PFC-116	$\text{C}_2\text{F}_6$ ( $\text{CF}_3\text{CF}_3$ )	Perfluoroéthane (Hexafluoroéthane)
PFC-218	$\text{C}_3\text{F}_8$ ( $\text{CF}_3\text{CF}_2\text{CF}_3$ )	Perfluoropropane (Octafluoropropane)
PFC-318 ou PFC-c318	c- $\text{C}_4\text{F}_8$ ( $-(\text{CF}_2)_4-$ )	Perfluorocyclobutane (Octafluorocyclobutane)
PFC-3-1-10	$\text{C}_4\text{F}_{10}$	Perfluorobutane
PFC-5-1-14	$\text{C}_6\text{F}_{14}$	Perfluorohexane
PFC-6-1-16	$\text{C}_7\text{F}_{16}$	Perfluoroheptane
PFC-7-1-18	$\text{C}_8\text{F}_{18}$	Perfluorooctane

<i>Éthers fluorés</i>		
HFE-449s1	C <sub>5</sub> H <sub>3</sub> F <sub>9</sub> O CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub> (CF <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CFCF <sub>2</sub> OCH <sub>3</sub>	Éther méthylique (nonafluorobutyle) Éther méthylique (perfluoroisobutyle)
HFE-569sf2	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> F <sub>9</sub> O CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> OCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub> (CF <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CFCF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	Éther éthylique (perfluorobutyle) Éther éthylique (perfluoroisobutyle)
HFE-347pcf2	C <sub>4</sub> H <sub>3</sub> F <sub>7</sub> O (CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub> )	1,1,2,2-Tétrafluoroéthyl 2,2,2-trifluoroéthyl éther

<i>Autres hydrocarbures halogénés</i>		
Acide trifluoroacétique (TFA)	C <sub>2</sub> HF <sub>3</sub> O <sub>2</sub> (CF <sub>3</sub> COOH)	Acide perfluorique

### Hydrocarbures non halogénés

Méthane	CH <sub>4</sub>	R-50
Éthane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub> )	R-170
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> )	R-290
Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> )	R-600, n-Butane
Isobutane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ((CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHCH <sub>3</sub> )	R-600a, i-Butane, 2-Méthylpropane
Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub> )	R-601, n-Pentane
Isopentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> ((CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> )	R-601a, i-Pentane, 2-Méthylbutane

Le rapport spécial intitulé «Préservation de la couche d'ozone et du système climatique planétaire: Questions relatives aux hydrofluorocarbures et aux hydrocarbures perfluorés» renferme des informations utiles à la prise de décision pour la sauvegarde de la couche d'ozone et la protection du système climatique, deux questions sur l'environnement mondial d'une grande complexité scientifique et technique. Il a été élaboré par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et le Groupe de l'évaluation technique et économique (GETE) relevant du Protocole de Montréal, à la demande des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et au Protocole de Montréal.

Les preuves scientifiques démontrant les liens qui existent entre l'appauvrissement de la couche d'ozone et l'utilisation de chlorofluorocarbures (CFC) et d'autres substances qui appauvrissent la couche d'ozone (SAO) ont conduit à réglementer ces produits en vertu du Protocole de Montréal. Le texte du Protocole a été adopté en 1987 puis ajusté et amendé dans les années 90 afin d'ajouter de nouvelles substances, d'entreprendre l'élimination progressive des SAO et d'accélérer ce processus. Alors que l'on mettait au point diverses techniques pour remplacer les SAO, il est apparu que certaines mesures visant à ralentir la déperdition d'ozone, en particulier le recours aux HFC et aux PFC, avaient une incidence sur le réchauffement de la planète. Lors de la négociation du Protocole de Kyoto en 1997, les pays disposaient donc de nouveaux éléments montrant combien il était important de prendre en considération l'effet que pouvait avoir le choix des substituts sur les buts énoncés dans les deux protocoles.

L'impact potentiel de chaque produit de remplacement des SAO sur le système climatique dépend des propriétés physiques et chimiques de la substance elle-même, mais aussi des facteurs qui déterminent sa libération dans l'atmosphère, par exemple le confinement, le recyclage, la destruction et le rendement énergétique propre aux différentes applications. En onze chapitres accompagnés d'annexes, le rapport expose les connaissances scientifiques nécessaires pour étudier les solutions de remplacement, les méthodes susceptibles d'aider à évaluer ces options et les questions techniques liées aux possibilités de réduire les émissions de gaz à effet de serre dans les secteurs visés, soit la réfrigération, la climatisation, les mousses, les aérosols, la protection contre les incendies et les solvants. Il est également question de la production future de HFC dans le monde.

Le GIEC a été formé conjointement par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'environnement. Le GETE a été établi par les Parties au Protocole de Montréal. Les deux groupes procèdent à des évaluations internationales faisant autorité. Le GIEC étudie les informations scientifiques, techniques et socio-économiques disponibles sur les changements climatiques, tandis que le GETE analyse les technologies destinées à préserver la couche d'ozone stratosphérique.

Le rapport spécial est publié dans son intégralité par *Cambridge University Press* (<http://www.cambridge.org>). On peut en télécharger une version électronique (<http://www.ipcc.ch>) ou obtenir le texte sur CD-ROM auprès du Secrétariat du GIEC. La présente publication renferme le résumé à l'intention des décideurs et le résumé technique du rapport.