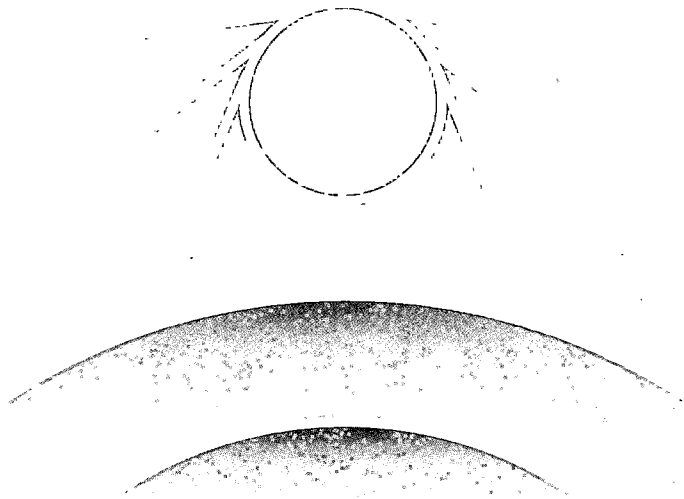


# Protocole de Montréal Protocol *1987-1997*



**Avantages et coûts mondiaux  
du Protocole de Montréal  
relatif à des substances qui  
appauvrissent la couche d'ozone**



Environnement  
Canada

Environment  
Canada

Canada



# Avis de révision

Le contenu du présent rapport a été revu par Environnement Canada, qui en a approuvé la publication. Cette approbation ne signifie pas nécessairement que le contenu soit conforme aux opinions et aux politiques d'Environnement Canada. Le fait que des marques de commerce ou des produits commerciaux y soient mentionnés ne signifie pas que le Ministère en recommande ou en approuve l'utilisation.

## Remerciements

*Avantages et coûts mondiaux du Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone*, étude réalisée pour Environnement Canada par ARC Applied Research Consultants, 1997. ARC Applied Research Consultants – Dr Douglas Smith, Keith Vodden, Dr Leon Rucker, Rose Cunningham.

ARC (Applied Research Consultants) souhaite souligner l'importante contribution apportée par le Comité consultatif international mis sur pied pour cette étude.

### Composition du Comité consultatif international :

- Dr Stephen O. Andersen, coprésident de la Commission d'évaluation technique et économique (CETE), Directeur des projets climatologiques stratégiques, Division de la protection contre la pollution atmosphérique, U.S. Environmental Protection Agency, États-Unis
- Dr Jonathan Banks, coprésident du Comité des options techniques (COT) bromure de méthyle, Division de l'entomologie du CSIRO, Australie
- Dr Walter Brunner, coprésident du COT halons, Envico AG, Suisse
- M. Zhang Chongxian, Conseiller principal de la CETE, Agence nationale pour la protection de l'environnement, Chine
- M. Jorge Corona, coprésident du COT solvants, Commission pour l'environnement (CANACINTRA), Mexique
- M. Laszlo Dobo, membre expert principal de la CETE, ministère hongrois de l'Environnement et de la politique régionale, Hongrie
- M. Nguyen Duc Ngu, expert du département scientifique et technique, Service hydrométéorologique du Vietnam, Vietnam
- M. Yuichi Fujimoto, membre expert principal de la CETE, Conférence industrielle du Japon pour la protection de la couche d'ozone (JICOP), Japon
- M. Ismail Ithnin, Directeur adjoint principal, ministère de l'Environnement, Malaisie
- Dr Barbara Kucnerowicz-Polak, coprésidente du COT halons, administration centrale du Service étatique sur les incendies, Pologne
- Dr Lambert Kuijpers, coprésident de la CETE et coprésident du COT réfrigération, Université technique, Pays-Bas
- Dr Mohinder P. Malik, coprésident du COT solvants, revêtements et adhésifs, Lignes aériennes Lufthansa, Allemagne
- Dr Suely Maria Machado Carvalho, coprésidente de la CETE, conseillère technique principale, NPU EAP/SEED/BPPS, Programme des Nations Unies pour le développement, Brésil
- M. Virah Mavichak, ministère de l'Industrie de la Thaïlande
- Mme Etta M'Mangisa, ministère de la Recherche et des Affaires environnementales, Malawi
- M. E. Thomas Morehouse, membre expert principal de la CETE, Institute for Defense Analyses, États-Unis
- Dr David Okioga, coprésident du COT bromure de méthyle, coordonnateur du Service national pour l'ozone, ministère de l'Environnement et des Ressources, Kenya
- M. Jose Pons Pons, coprésident du COT produits aérosols, Spray Quimica C.A., URB.IND. SOCO, Venezuela
- Mme Sally Rand, coprésidente du COT mousses rigides et flexibles, Division de la protection de la stratosphère, U.S. Environmental Protection Agency, États-Unis
- Dr Rodrigo Rodriguez-Kabana, coprésident du COT bromure de méthyle, département de phytopathologie, Auburn University, États-Unis

- M. Sateaved Seebaluck, membre expert principal de la CETE, secrétaire adjoint principal, ministère de l'Environnement et de la Qualité de la vie, Maurice
- M<sup>me</sup> Lalitha Singh, coprésidente du COT mousses rigides et flexibles, ministère des Produits chimiques et pétrochimiques, Inde
- M. Morkel Steyn, Directeur adjoint - Protocole de Montréal, ministère des Affaires environnementales et du Tourisme, Afrique du Sud
- Prof. Xiaoyan Tang, Université de Pékin, Centre des études environnementales, Chine
- M. Gary M. Taylor, coprésident du COT halons, Taylor/Wagner Inc., Canada
- Prof. Manfred Tevini, Ph.D., coprésident de la Commission des effets environnementaux, Institut de botanique II, Allemagne
- Dr Helen Tope, coprésidente du COT produits aérosols, chargée de projets spéciaux, Environment Protection Authority, Australie
- Prof. J.C. Van der Leun, Ph.D., coprésident de la Commission des effets environnementaux, Université d'Utrecht, département de dermatologie, Pays-Bas
- Dr Robert Van Slooten, coprésident du Comité des options économiques, consultant en économie, Royaume-Uni
- Dr Ashley Woodcock, coprésidente du COT produits aérosols, North West Lung Centre, Wythenshawe Hospital, Royaume-Uni

Nous souhaitons également reconnaître le concours et l'aide que nous avons reçus de la part de M. K.M. Sarma, Secrétaire exécutif du Secrétariat ozone du PNUE, et de Dr Omar El-Arini, agent principal du Secrétariat pour le Fonds multilatéral, ainsi que de son personnel.

**Enfin, n'oublions pas la précieuse collaboration du Comité consultatif canadien mis sur pied pour superviser cette étude. En voici les membres :**

- Jim Armstrong, Environnement Canada (président)
- Sonja Henneman, Environnement Canada (coordonnatrice de projet)
- Dr Sheryl Bartlett, Santé Canada
- David Black, Environnement Canada
- John Carey, Environnement Canada
- Chantal Chalifoux, Environnement Canada
- Paul De Civita, Environnement Canada
- Linda Dunn, Agriculture Canada
- Angus Fergusson, Environnement Canada
- Mark Gawn, Agence canadienne de développement international
- Bernard Madé, Environnement Canada
- Marie-Anne Marin, Environnement Canada
- Jacinthe Séguin, Environnement Canada
- Alain Tellier, Affaires étrangères et Commerce international

Tous les commentaires reçus nous ont été utiles, mais les auteurs demeurent responsables des conclusions du rapport.

# Résumé

## LE PROTOCOLE DE MONTRÉAL

La signature de la version originale du Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone, le 16 septembre 1987, a été un événement marquant de l'histoire de la politique mondiale sur l'environnement. En mars 1997, 163 pays avaient signé cet accord, qui établissait un calendrier pour la réduction de la consommation des chlorofluorocarbures (CFC) et des halons. Le paragraphe 5(1) permettait aux pays en développement dont la consommation annuelle de substances réglementées était inférieure à 0,3 kg par habitant de surseoir de 10 ans, après les dates prévues pour les pays industrialisés, à l'observation du Protocole.

Le Protocole de 1987 était la continuation du processus amorcé en 1985 par la Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone. Les Parties à la Convention s'étaient entendues au sujet des principales questions scientifiques et techniques à débattre et avaient aussi mis sur pied un système d'échange de renseignements entre elles.

L'une des dispositions du Protocole de Montréal prévoyait un processus d'examen continu par les Parties du calendrier original de réduction des substances réglementées appauvrissant la couche d'ozone (SACO) et de la liste de ces substances. Lorsque, par la suite, les Parties se sont réunies à Londres en 1990, à Copenhague en 1992 et à Vienne en 1995, les calendriers de réduction ont été accélérés et la liste des substances réglementées appauvrissant la couche d'ozone a été modifiée de façon à inclure d'autres substances contribuant à la destruction de l'ozone stratosphérique. Le Protocole régit maintenant les CFC, les halons, les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), les hydrobromofluorocarbures (HBFC), le tétrachlorure de carbone, le méthylchloroforme et le bromure de méthyle.

## RÉUNION DES PARTIES POUR LE 10<sup>e</sup> ANNIVERSAIRE

En septembre 1997, à l'occasion du 10<sup>e</sup> anniversaire du Protocole, les Parties se réuniront de nouveau à Montréal pour célébrer une réalisation mondiale dans le domaine de l'environnement qui est un exemple de coopération internationale sans précédent. Dans le cadre de sa contribution aux activités qui auront lieu à Montréal, Environnement Canada a demandé à la firme ARC Applied Research Consultants de préparer la présente étude, qui a principalement pour but de répondre à la question stratégique et générale suivante :

**Quelle est la meilleure évaluation possible des avantages et des coûts mondiaux du Protocole de Montréal?**

## LE PROTOCOLE A PERMIS D'ÉVITER UN APPAUVRISSEMENT CATASTROPHIQUE DE LA COUCHE D'OZONE

Le présent rapport, avec pièces à l'appui, estime les émissions de substances appauvrissant la couche d'ozone pour la période de 1987 à 2060 et indique ce qui serait advenu si le Protocole ou des mesures semblables n'avaient pas été élaborés et mis en œuvre. Ces résultats montrent très clairement que les émissions de ces substances auraient été considérables pendant toute cette période si les taux d'accroissement antérieurs au Protocole s'étaient maintenus sans que rien ne soit fait à ce sujet. À l'aide des résultats présentés dans les publications scientifiques, le rapport compare l'appauvrissement actuel de la couche d'ozone à ce qu'il aurait été si le Protocole de Montréal n'avait pas été mis en œuvre. En l'absence de réglementation, l'ozone stratosphérique aurait continué de se détruire à un rythme appréciable, occasionnant ainsi une diminution des concentrations de ce gaz à des niveaux peut-être tellement bas que la régénération de la couche d'ozone aurait pu être impossible. Ce scénario contraste avec celui du Protocole de Montréal, dans lequel la couche d'ozone s'amincit, puis commence à s'épaissir peu avant l'an 2000 pour ensuite revenir à son état original après plusieurs décennies. Ces deux scénarios sont illustrés dans la figure 1. Le présent rapport montre aussi que si la mise en œuvre du Protocole avait été retardée de 20 ans, soit jusqu'en 2007, la couche d'ozone se serait considérablement appauvrie, ce qui aurait causé d'importants effets sanitaires et entraîné divers autres coûts.

## UN MODÈLE DE COOPÉRATION INTERNATIONALE FRUCTUEUSE

Le Protocole de Montréal est un document complexe qui fait ressortir la nécessité pour tous les pays de coopérer. La couche d'ozone stratosphérique est réellement une ressource mondiale, et sa destruction touche les populations et les écosystèmes du globe. L'efficacité des mesures de réglementation nécessitait une coopération internationale afin d'assurer que les gains acquis dans certaines parties du monde ne soient pas contrebalancés par la continuation des émissions dans d'autres régions.

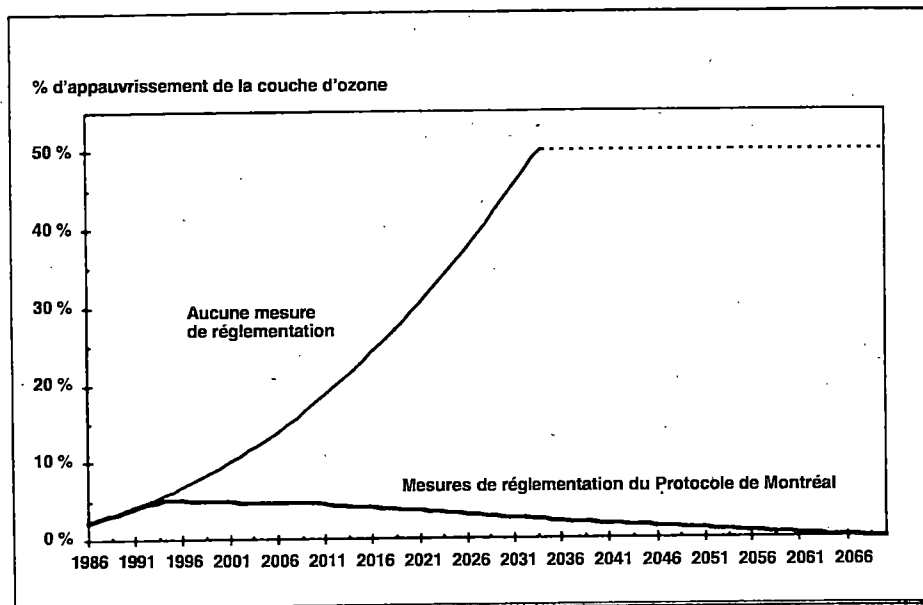
Le Protocole de Montréal a répondu aux besoins particuliers de différents groupes de pays partout dans le monde. Le paragraphe 5(1) reconnaît la situation particulière des pays en développement. Le Protocole de Montréal prévoit un calendrier de réduction moins exigeant pour les pays visés. Par ce paragraphe, le Fonds multilatéral permet de financer les projets approuvés. Le processus du Protocole a également tenu compte des pays ayant des structures économiques et politiques différentes.

## LA MÉTHODE DE MESURE

Le présent rapport fournit des estimations des avantages et des coûts mondiaux du Protocole de Montréal, dont les dispositions prévoient la réduction et l'élimination de la consommation de substances appauvrissant la couche d'ozone. Une évaluation de ce genre soulève un grand nombre de questions au sujet de la qualité des données et de la méthode conceptuelle à adopter. Dans chaque cas, le rapport explique clairement toutes les hypothèses avancées et a recours à une analyse de sensibilité pour examiner l'incidence des principales hypothèses alternatives.

La période visée par l'étude pour l'évaluation des conséquences du Protocole de Montréal s'étend de 1987 à 2060. L'analyse de sensibilité est effectuée pour deux dates limites, soit les années 2050 et 2070. L'horizon temporel a été choisi de façon à correspondre aux conséquences de l'intervention qui sont évaluées. Le Protocole de Montréal a toujours eu pour but de réduire les dommages causés par la destruction de l'ozone qui se seraient considérablement aggravés au cours des ans tout en ayant d'importantes conséquences sur les générations actuelles et futures. L'année 2060 est la date approximative à laquelle les trous dans la couche d'ozone observés dans les années 80 disparaîtront probablement. Cette période de près de 75 ans correspond à l'espérance de vie de bon nombre de personnes nées lorsque le Protocole de Montréal a été signé. Ce qui est peut-être plus important, c'est que cette période correspond à celle où les effets de la destruction de l'ozone, sans le Protocole, auraient été les plus graves. Comme dans d'autres études de ce genre, y compris celles réalisées pour l'Environmental Protection Agency des États-Unis, la durée de cette période a été choisie de façon à correspondre aux dommages à long terme dus aux substances responsables de la

**FIGURE I Appauvrissement de la couche d'ozone à l'échelle planétaire pour la période de 1986 à 2060 sans mesures de réglementation et compte tenu du Protocole de Montréal**



Source : U.S. Environmental Protection Agency.  
(Le modèle tronque les pourcentages d'appauvrissement à partir de 50 %.)

destruction de la couche d'ozone. Étant donné que cette période est beaucoup plus longue que la durée de bon nombre de technologies existantes, l'estimation des coûts est d'autant plus incertaine.

En particulier, les connaissances actuelles ne permettent pas encore de quantifier tous les avantages que comporte la diminution de la destruction de l'ozone. Le présent rapport fournit une estimation des principaux effets sanitaires directs de la destruction continue de l'ozone ainsi que de la diminution des prises de poissons, de la baisse du rendement des cultures et des dommages aux polymères. D'autres effets sanitaires, comme l'affaiblissement du système immunitaire dû à la destruction de l'ozone, n'ont pas été évalués parce qu'il n'existe pas de modèle permettant de le faire.

En dépit de ces limitations, les résultats de l'étude apportent un appui considérable aux initiatives mondiales entreprises afin de protéger la couche d'ozone. À elles seules, les retombées économiques quantifiables excèdent les coûts qu'entraîne le respect des exigences du Protocole. Comme les résultats mentionnés plus loin l'indiquent clairement, l'investissement de la société dans la protection de l'environnement a donné des rendements extraordinaires. Sans les mesures de réglementation du Protocole de Montréal, la société planétaire se serait retrouvée dans une situation bien pire qu'avant.

## **LES AVANTAGES DU PROTOCOLE DE MONTRÉAL**

L'état de la couche d'ozone de la planète influe directement sur la santé humaine et celle des divers écosystèmes terrestres et marins. Les principaux effets dont il est ici question se rapportent à la santé humaine, mais le présent rapport montre aussi que l'appauvrissement de la couche d'ozone peut avoir des effets sur les écosystèmes aquatiques, la production agricole mondiale et les matériaux. Dans ce dernier cas, les dommages évités en raison de la protection de la couche d'ozone par le Protocole de Montréal sont considérables.

Les avantages mondiaux du Protocole de Montréal comprennent un ensemble d'effets sanitaires ainsi que des retombées économiques quantifiables de

459 milliards \$ résultant de l'atténuation des dommages causés par les rayons ultraviolets (UV) aux ressources forestières et agricoles de même qu'aux écosystèmes aquatiques. Les effets sanitaires comprennent une diminution de plus de 330 000 cas de cancer cutané mortels, de 3,4 millions de cas de cancer cutané avec et sans mélanome, et d'environ 129 millions de cas de cataractes. Toutes les estimations portent sur la période de 1987 à 2060. Ces avantages comprennent seulement les effets qui ont pu être quantifiés à l'aide des relations dose-réponse acceptées et des paramètres connexes que l'on trouve dans les publications. Si toute la gamme des effets bénéfiques pouvait être quantifiée, les avantages seraient encore plus considérables.

Le présent rapport évalue aussi un scénario dans lequel la mise en œuvre du Protocole de Montréal aurait été retardée de 20 ans. Comme les substances appauvrissant la couche d'ozone auraient continué d'être utilisées sans mesures de réglementation jusqu'en 2007, une quantité d'ozone beaucoup plus considérable aurait été détruite, occasionnant ainsi une augmentation de l'exposition mondiale aux rayons UV. Ce retard aurait occasionné jusqu'à 198 000 mortalités de plus, jusqu'à 34 millions d'autres cas de cataractes et près de 8 millions d'autres cancers cutanés avec et sans mélanome.

Cette évaluation des avantages mondiaux du Protocole de Montréal est fondée sur des données et des concepts divers. Les avantages pour la santé humaine ont été quantifiés au plus haut degré. Quant à ceux pour l'agriculture et les écosystèmes aquatiques, il a été plus difficile de le faire, mais ils sont potentiellement très importants, notamment dans les pays en développement où l'agriculture et la pêche déterminent les taux de survie de la population. C'est pourquoi les estimations des avantages sont ici présentées comme les valeurs minimales de toute la gamme des effets bénéfiques.

## **LES COÛTS DU PROTOCOLE DE MONTRÉAL**

Le présent rapport évalue les surcoûts du Protocole de Montréal comparativement au scénario ne comportant aucune mesure de réglementation. Dans ce scénario, les substances appauvrissant la couche d'ozone auraient continué d'être utilisées dans la proportion des taux prévus de la croissance de la consommation. Il est évident qu'un important investissement a été fait dans le but de protéger

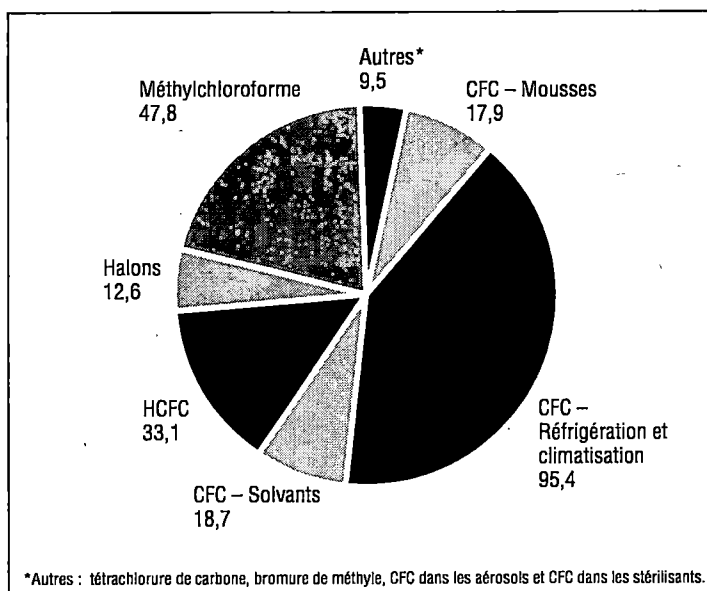
la couche d'ozone. L'atteinte des objectifs des mesures de réglementation prévues par le Protocole de Montréal entraînera pour la société planétaire des coûts d'environ 235 milliards \$ amér. Ces coûts représentent la valeur actualisée de ceux qui seront encourus pendant la période de 1989 à 2060. Le tableau 2 indique la ventilation des coûts des mesures de réglementation.

Pour diverses raisons complexes, les coûts entraînés par le respect des exigences du Protocole en matière de réduction semblent avoir été surestimés dans les premières estimations. De toute évidence, bon nombre d'innovations technologiques ultérieures au Protocole de Montréal n'avaient pas été prévues dans les premières estimations des coûts. Comme le présent rapport l'indique, le coût des produits de substitution s'est avéré, dans un certain nombre de cas, moins élevé que celui des substances appauvrissant la couche d'ozone qu'ils ont remplacées, ce qui est particulièrement évident pour certaines applications utilisant des aérosols, où les agents propulseurs maintenant employés coûtent beaucoup moins cher, et pour le dégraissage aux solvants, notamment en électronique, où de nouvelles méthodes ont considérablement réduit les besoins et les coûts d'un grand nombre de consommateurs.

Les évaluations initiales des coûts semblent avoir sous-estimé dans quelle mesure la coopération internationale et le transfert technologique contiennent les coûts d'adaptation. Le transfert technologique international a été encouragé par les activités du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et de son Groupe d'évaluation technique et économique, le Secrétariat du Fonds multilatéral, par les activités des entreprises multinationales, la Banque mondiale, le Programme des Nations Unies pour le développement et l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel. À l'échelle mondiale, la souplesse avec laquelle les gouvernements ont mis en vigueur les exigences du Protocole semble aussi avoir aidé à contenir les coûts, et il en a été de même pour la coopération dont a fait preuve l'industrie afin de concevoir et de mettre à l'essai des produits de remplacement des substances appauvrissant la couche d'ozone.

Les coûts entraînés par l'observation des dispositions du Protocole ont été calculés tout d'abord en déterminant son effet sur la consommation de substances appauvrissant la couche d'ozone dans différentes applications ultimes. Les CFC et d'autres substances destructrices de l'ozone ont été remplacés par des produits ou procédés qui, en moyenne, et non dans tous les cas, coûtent plus

**FIGURE 2 Répartition des coûts totaux actualisés du Protocole de Montréal (en milliards de dollars de 1997)**



Source : Chiffres de la firme ARC, tel qu'indiqué dans le texte.

cher. Très souvent, l'élimination des substances appauvrissant la couche d'ozone a permis d'améliorer à la fois les produits et les procédés.

Les incidences financières dont il est ici question comprennent, entre autres, les coûts de la R-D servant à mettre au point des produits de remplacement, les coûts d'immobilisations nécessaires pour modifier les procédés de production et les installations afin de s'adapter aux différentes méthodes de réduction des SACO ainsi que les dépenses permanentes pour la santé, l'environnement, l'énergie, la main-d'œuvre et les matériaux entraînées par l'utilisation de produits de remplacement plus coûteux que les SACO ne l'auraient été. Certains de ces coûts sont assumés immédiatement, tandis que d'autres le seront sur une base continue. Il est à noter que les coûts évalués pour les pays visés au paragraphe 5(1) comprennent tous ceux qui ont été calculés pour la période de 1989 à 2060, à l'exception des coûts qui seront remboursés par le Fonds multilatéral.

La méthode de calcul des coûts ici utilisée fait appel à une estimation du coût moyen par kilogramme dans différentes applications où les substances appauvrissant la couche d'ozone et réglementées par le Protocole sont remplacées. Ces quantités réduites ont été mesurées à compter de 1987, l'année où le Protocole a été signé, jusqu'en 2060. Les estimations des coûts par kilogramme ont été tirées de rapports publiés et de renseignements provenant de différents secteurs industriels.

Pour les fins du présent rapport, des chiffres sur la consommation de diverses substances appauvrissant la couche d'ozone en l'absence de mesures de réglementation doivent être fournis. Pour ce scénario, il existe un grand nombre de possibilités. Des taux de croissance différents sont extrapolés pour différentes substances. Par exemple, dans le cas des solvants à base de CFC, l'on présume que la consommation non réglementée s'accroîtrait de 5 % d'ici 2010, et ensuite de 2 % jusqu'en 2060. D'autres hypothèses concernant la consommation des produits sont possibles et auraient peut-être pour effet d'aplatir la courbe du taux de croissance davantage que certaines des estimations ici présentées le laissent voir. Ce scénario ne prévoit aucune réglementation et ne tient pas compte d'autres mesures qui, dans certains pays, auraient pu remplacer celles du Protocole.

## EXCÉDENTS DES AVANTAGES DU PROTOCOLE SUR LES COÛTS

Les avantages du Protocole de Montréal comprennent les coûts des dommages qui ont été évités en raison de la destruction amoindrie de la couche d'ozone stratosphérique. Les avantages dont il est ici question sont surtout les effets sanitaires. Les résultats présentés indiquent une énorme disparité entre les avantages et les coûts mondiaux du Protocole de Montréal. Pour les fins de la présente évaluation, les avantages sont exprimés non pas en dollars, mais plutôt en chiffres d'équivalence en dollars, auxquels sont ajoutés les effets bénéfiques sur la santé, c'est-à-dire les diminutions du nombre de cas pathologiques.

Du point de vue économique, les conséquences nettes du Protocole de Montréal permettent de comparer deux ensembles de coûts. Les coûts de la mise en œuvre du Protocole comprennent tous ceux entraînés par l'élimination de la consommation de substances appauvrissant la couche d'ozone. Les avantages du Protocole comprennent les coûts qu'aurait entraînés la consommation continue de ces substances. La société n'a jamais eu à décider si elle devait payer ou non les coûts entraînés par la couche d'ozone. À partir du moment où le problème de l'ozone a surgi, la seule question pertinente a été de savoir quels coûts il faudrait payer : les coûts de la protection de la couche d'ozone, ou les coûts de l'appauvrissement considérable de cette couche. Les résultats obtenus quant aux conséquences nettes permettent de montrer qu'il en aurait coûté beaucoup plus à la société planétaire si la destruction de la couche d'ozone avait continué.

Le tableau 3 montre que l'excédent des avantages sur les coûts s'élève à 224 milliards \$ lorsque les postes sont calculés en dollars. Outre ces avantages financiers nets, le tableau indique tous les avantages pour la santé procurés à la société. Les avantages nets extrêmement importants qui ont été chiffrés montrent que les investissements de la société dans la protection de la couche d'ozone ont donné des rendements fort considérables.

**TABLEAU 3****Avantages et coûts du Protocole de Montréal, de 1987 à 2060****AVANTAGES****Avantages pour la santé**

|                                                     |             |
|-----------------------------------------------------|-------------|
| Diminution des cas de cancer cutané sans mélanome   | 19 100 000  |
| Diminution des cas de cancer cutané avec mélanome   | 1 500 000   |
| Diminution des cas de cataractes*                   | 129 100 000 |
| Diminution des mortalités dues aux cancers cutanés* | 333 500     |

**Avantages financiers**

|                                         |                  |
|-----------------------------------------|------------------|
| Diminution des dommages aux pêcheries   | 238 milliards \$ |
| Diminution des dommages à l'agriculture | 191 milliards \$ |
| Diminution des dommages aux matériaux   | 30 milliards \$  |
| Avantages financiers totaux             | 459 milliards \$ |

**COÛTS**

|              |                  |
|--------------|------------------|
| Coûts totaux | 235 milliards \$ |
|--------------|------------------|

**AVANTAGES NETS**

|                           |                                                   |
|---------------------------|---------------------------------------------------|
| Avantages moins les coûts | 224 milliards \$ plus les avantages pour la santé |
|---------------------------|---------------------------------------------------|

Source : Tel qu'indiqué au chapitre II.

\*Moyenne des valeurs maximales et minimales.

Le taux d'actualisation pour le scénario de référence est de 5 %.

Il est à noter que les avantages totaux comprennent les effets sanitaires et les avantages exprimés en dollars.

# Table des matières

---

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>RÉSUMÉ</b> .....                                                                  | i  |
| <b>I INTRODUCTION</b> .....                                                          | 1  |
| LE PROTOCOLE DE MONTRÉAL .....                                                       | 1  |
| RÉUNION DES PARTIES POUR LE 10 <sup>e</sup> ANNIVERSAIRE .....                       | 1  |
| CONSÉQUENCES DU PROTOCOLE DE MONTRÉAL .....                                          | 1  |
| ESTIMATION DES AVANTAGES DE LA RÉGLEMENTATION .....                                  | 1  |
| ESTIMATION DES COÛTS DE LA RÉGLEMENTATION .....                                      | 2  |
| ÉVALUATION GÉNÉRALE .....                                                            | 2  |
| IMPLICATIONS DES RÉSULTATS .....                                                     | 2  |
| PLAN DU RAPPORT .....                                                                | 3  |
| <b>II CONSÉQUENCES DU PROTOCOLE DE MONTRÉAL</b> .....                                | 5  |
| INTRODUCTION .....                                                                   | 5  |
| CONSOMMATION DE SUBSTANCES APPAUVRISANT LA COUCHE D'OZONE .....                      | 5  |
| APPAUVRISSMENT DE LA COUCHE D'OZONE .....                                            | 7  |
| EXPOSITION .....                                                                     | 7  |
| EFFETS SANITAIRES QUANTIFIABLES .....                                                | 7  |
| AUTRES EFFETS SANITAIRES .....                                                       | 15 |
| EFFETS NON SANITAIRES .....                                                          | 17 |
| VALEUR DES EFFETS NON SANITAIRES .....                                               | 18 |
| <b>III COÛTS DE REMPLACEMENT DES SUBSTANCES APPAUVRISANT LA COUCHE D'OZONE</b> ..... | 21 |
| VUE D'ENSEMBLE ET MÉTHODES EMPLOYÉES .....                                           | 21 |
| CONSOMMATION MONDIALE DE SUBSTANCES<br>APPAUVRISSANT LA COUCHE D'OZONE .....         | 23 |
| COÛTS DE REMPLACEMENT DES CFC .....                                                  | 23 |
| COÛTS DE REMPLACEMENT DES HALONS .....                                               | 33 |
| COÛTS DE REMPLACEMENT DES HCFC .....                                                 | 34 |
| COÛTS DE REMPLACEMENT DU MÉTHYLCHLOROFORME .....                                     | 37 |
| COÛTS DE REMPLACEMENT DU TÉTRACHLORURE DE CARBONE .....                              | 39 |
| COÛTS DE REMPLACEMENT DU BROMURE DE MÉTHYLE .....                                    | 42 |
| ESTIMATION DES COÛTS TOTAUX .....                                                    | 42 |
| <b>IV AVANTAGES NETS DU PROTOCOLE DE MONTRÉAL</b> .....                              | 45 |
| AVANTAGES ET COÛTS .....                                                             | 45 |
| ANALYSES DE SENSIBILITÉ .....                                                        | 45 |
| PROBLÈMES DE QUANTIFICATION .....                                                    | 47 |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>V LEÇONS TIRÉES DU PROTOCOLE</b> .....                                       | 49 |
| ÉLABORATION DU PROTOCOLE DE MONTRÉAL .....                                      | 49 |
| DISPOSITIONS RELATIVES AUX PAYS EN DÉVELOPPEMENT .....                          | 49 |
| ENTENTE GRANDISSANTE DES AVANTAGES<br>DE LA RÉGLEMENTATION .....                | 50 |
| COÛTS MOINDRES QUE PRÉVU .....                                                  | 50 |
| RÉGLEMENTATION DES QUANTITÉS .....                                              | 51 |
| COOPÉRATION INTERNATIONALE ET TRANSFERT TECHNOLOGIQUE.....                      | 51 |
| POSSIBILITÉS D'AUTRES INITIATIVES MONDIALES EN<br>MATIÈRE D'ENVIRONNEMENT ..... | 51 |
| <b>RÉFÉRENCES</b> .....                                                         | 53 |
| <b>ANNEXES</b>                                                                  |    |
| ANNEXE A — ESTIMATION DES EFFETS SANITAIRES .....                               | 55 |
| ANNEXE B — CALCUL DES COÛTS.....                                                | 61 |

# Introduction

## LE PROTOCOLE DE MONTRÉAL

La signature de la version originale du Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone, le 16 septembre 1987, a été un événement marquant de l'histoire de la politique mondiale sur l'environnement. En mars 1997, 163 pays ont signé cet accord, qui établissait un calendrier pour la réduction de la consommation des chlorofluorocarbures (CFC) et des halons. Le paragraphe 5(1) permettait aux pays en développement dont la consommation annuelle de substances réglementées était inférieure à 0,3 kg par habitant de reporter l'observation du Protocole, après les dates prévues pour les pays industrialisés.

Le Protocole de 1987 était la continuation du processus amorcé en 1985 par la Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone. Les Parties à la Convention s'étaient entendues au sujet des principales questions scientifiques et techniques à débattre et avaient aussi mis sur pied un système d'échange de renseignements entre elles.

L'une des dispositions du Protocole de Montréal prévoyait un processus d'examen continue par les Parties du calendrier original de réduction des substances réglementées appauvrissant la couche d'ozone (SACO) et de la liste de ces substances. Lorsque, par la suite, les Parties se sont réunies à Londres en 1990, à Copenhague en 1992 et à Vienne en 1995, les calendriers de réduction ont été accélérés et la liste des substances réglementées appauvrissant la couche d'ozone a été modifiée de façon à inclure la plupart des substances qui contribuent à la destruction de l'ozone stratosphérique. Les tableaux I-1 et I-2 indiquent les calendriers de réduction pour les Parties au Protocole de Montréal, tant les pays industrialisés que ceux visés au paragraphe 5(1). Ces calendriers visent les CFC, les halons, les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), les hydrobromofluorocarbures (HBFC), le tétrachlorure de carbone, le méthylchloroforme et le bromure de méthyle.

## RÉUNION DES PARTIES POUR LE 10<sup>e</sup> ANNIVERSAIRE

En septembre 1997, à l'occasion du 10<sup>e</sup> anniversaire du Protocole, les Parties se réuniront de nouveau à Montréal pour célébrer une réalisation mondiale dans le domaine de l'environnement qui est un exemple de coopération internationale sans précédent. Dans le cadre de sa contribution aux activités qui auront lieu à Montréal, Environnement Canada

a demandé à la firme ARC Applied Research Consultants de préparer la présente étude afin d'évaluer les avantages et les coûts mondiaux du Protocole de Montréal.

## CONSÉQUENCES DU PROTOCOLE DE MONTRÉAL

Dans le présent rapport, les preuves démontrant les conséquences du Protocole de Montréal fournissent les données de base permettant de déterminer les avantages et les coûts. Pour la période de 1987 à 2060, les émissions réelles de substances appauvrissant la couche d'ozone sont comparées à celles qui se seraient probablement produites si le Protocole n'avait pas été élaboré et mis en œuvre. Il est évident que les émissions de ces substances auraient été considérables si les taux d'accroissement antérieurs au Protocole s'étaient maintenus sans que rien ne soit fait à ce sujet. À l'aide des résultats présentés dans les publications scientifiques, le rapport compare l'appauvrissement actuel de la couche d'ozone à ce qu'il aurait été si le Protocole de Montréal n'avait pas été mis en œuvre. En l'absence de réglementation, l'ozone stratosphérique aurait continué de se détruire à un rythme appréciable, ce qui contraste avec le scénario du Protocole de Montréal, selon lequel la couche d'ozone s'amincit, puis commence à s'épaissir peu avant l'an 2000 pour ensuite revenir à son état original après plusieurs décennies.

## ESTIMATION DES AVANTAGES DE LA RÉGLEMENTATION

L'état de la couche d'ozone de la planète influe directement sur la santé humaine et celle des divers écosystèmes terrestres. Les principaux effets dont il est ici question se rapportent à la santé humaine, mais le présent rapport montre aussi que l'appauvrissement de la couche d'ozone peut avoir des effets sur les écosystèmes aquatiques, la production agricole mondiale et les matériaux. Dans ce dernier cas, les dommages évités en raison de la protection de la couche d'ozone par le Protocole de Montréal sont considérables.

Cette évaluation des avantages mondiaux du Protocole de Montréal est fondée sur des données et des concepts divers. Les avantages pour la santé humaine ont été quantifiés au plus haut degré. Quant à ceux pour l'agriculture et les écosystèmes aquatiques, il a été plus difficile de le faire, mais ils sont potentiellement très importants, notamment dans les pays en développement où l'agriculture

et la pêche déterminent les taux de survie de la population. C'est pourquoi les estimations des avantages sont ici présentées comme les valeurs minimales de toute la gamme des effets bénéfiques. Comme les effets sanitaires n'ont pas été exprimés en dollars, les avantages totaux comprennent un volet monétaire et un ensemble d'effets sanitaires non chiffrés en dollars.

## ESTIMATION DES COÛTS DE LA RÉGLEMENTATION

Le présent rapport évalue les surcoûts du Protocole de Montréal comparativement au scénario ne comportant aucune mesure de réglementation. Dans ce scénario, les substances appauvrissant la couche d'ozone auraient continué d'être utilisées dans la proportion des taux prévus de la croissance de la consommation. Il est évident qu'un important investissement a été fait dans le but de protéger la couche d'ozone.

Les coûts entraînés par l'observation des dispositions du Protocole ont été calculés tout d'abord en déterminant son effet sur la consommation de substances appauvrissant la couche d'ozone dans différentes applications ultimes. Les CFC et d'autres substances destructrices de l'ozone ont été remplacés par des produits ou procédés qui, en moyenne, coûtent plus cher. Les incidences financières dont il est ici question comprennent, entre autres, les coûts de la R-D servant à mettre au point des produits de remplacement, les coûts d'immobilisations nécessaires pour modifier les procédés de production et les installations afin de s'adapter aux différentes méthodes de réduction des SACO ainsi que les dépenses permanentes pour la santé, l'environnement, l'énergie, la main-d'œuvre et les matériaux entraînés par l'utilisation de produits de remplacement plus coûteux que les SACO ne l'auraient été. En d'autres mots, certains de ces coûts sont assumés immédiatement, tandis que d'autres le seront sur une base continue.

La méthode de calcul des coûts ici utilisée fait appel à une estimation du coût moyen par kilogramme dans différentes applications où les substances appauvrissant la couche d'ozone et réglementées par le Protocole sont remplacées. Ces quantités réduites ont été mesurées à compter de 1987, l'année où le Protocole a été signé, jusqu'en 2060. Les estimations des coûts par kilogramme ont été tirées de rapports publiés et de renseignements provenant de différents secteurs industriels.

## ÉVALUATION GÉNÉRALE

Les avantages nets du Protocole de Montréal consistent dans la différence entre la valeur actualisée présente des avantages et celle des coûts du Protocole. Tel qu'indiqué ci-dessus, tous les avantages du Protocole ne sont pas quantifiables : les effets sanitaires n'ont pas été convertis en dollars, mais tous les coûts ont été évalués de façon assez complète. C'est pourquoi les avantages nets ici mentionnés devraient être considérés comme une estimation prudente des valeurs minimales.

Du point de vue économique, les avantages nets du Protocole de Montréal permettent réellement de comparer deux ensembles de coûts. Les coûts de la mise en oeuvre du Protocole comprennent tous ceux entraînés par l'élimination de la consommation de substances appauvrissant la couche d'ozone. Les avantages du Protocole comprennent les coûts qu'aurait entraînés la consommation continue de ces substances. La société n'a jamais eu à décider si elle devait payer ou non les coûts entraînés par la couche d'ozone. À partir du moment où le problème de l'ozone a surgi, la seule question pertinente a été de savoir quels coûts il faudrait payer : les coûts de la protection de la couche d'ozone, ou les coûts de l'appauvrissement considérable de cette couche. Les résultats obtenus quant aux conséquences nettes permettent de montrer qu'il en aurait coûté beaucoup plus à la société planétaire si la destruction de la couche d'ozone avait continué.

## IMPLICATIONS DES RÉSULTATS

Le dernier chapitre du rapport indique le contexte général des résultats obtenus pour les avantages et les coûts. Quelles sont les implications du large excédent des avantages du Protocole sur les coûts? Pourquoi cette entente internationale a-t-elle été rendue possible et couronnée de succès dans des circonstances où beaucoup d'initiatives internationales connexes ont été moins fructueuses? Comment est-il possible d'appliquer les leçons profitables du Protocole de Montréal au règlement d'autres problèmes mondiaux d'environnement? Pourquoi, dans bien des cas, les coûts d'adaptation de l'industrie ont-ils été plus faibles qu'on ne l'avait tout d'abord prévu? Pourquoi les gouvernements du monde entier ont-ils alors adopté un cadre de réglementation moins normatif et plutôt compté sur l'industrie pour trouver les moyens les plus efficaces de respecter les exigences rigoureuses du Protocole de Montréal en matière de réduction? Ce sont là quelques-unes seulement des nombreuses questions et dimensions se rapportant aux constatations générales de la présente étude.

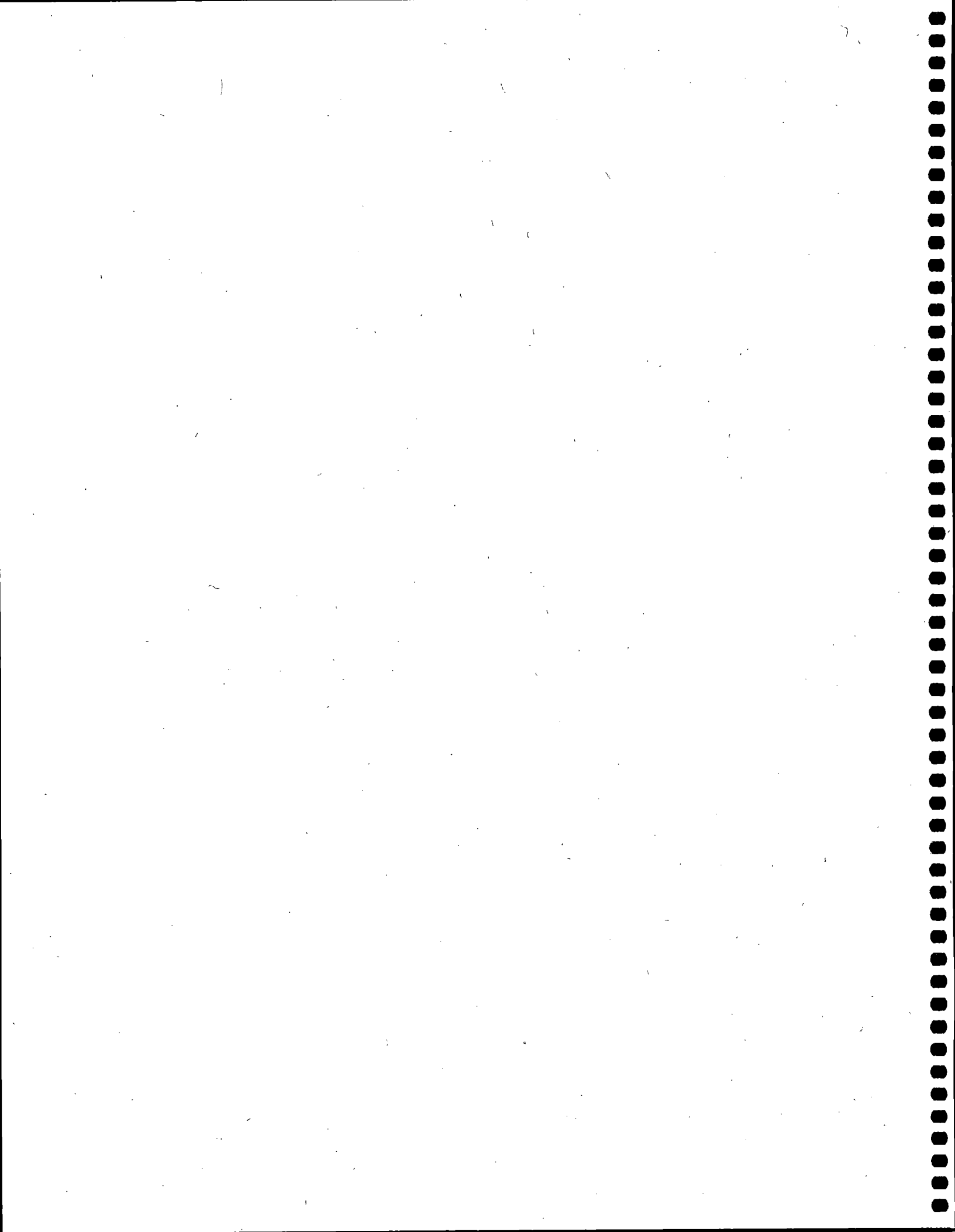
## PLAN DU RAPPORT

Le reste du rapport se divise comme suit. Le chapitre II examine les modalités du Protocole de Montréal et résume les preuves scientifiques indiquant dans quelle mesure la couche d'ozone se serait appauvrie sans le Protocole. Il décrit aussi les méthodes employées pour déterminer les avantages du Protocole de Montréal, indique jusqu'à quel point il est possible de les quantifier et mentionne les catégories d'avantages pour lesquels la quantification a été impossible. La modélisation des effets sanitaires comporte plusieurs étapes, y compris l'établissement de relations entre la réduction des émissions de SACO, l'amointrissement de la destruction de l'ozone et la diminution du rayonnement ultraviolet qui atteint la surface de la terre. Ces relations sont ensuite corrélées avec les effets sanitaires pour différents groupes de population et les différentes latitudes sous lesquelles vivent ces populations. Le chapitre II présente aussi des estimations empiriques des effets bénéfiques que comporte le ralentissement de la destruction de l'ozone pour l'agriculture, les pêcheries et les matériaux.

Dans le chapitre III, les méthodes de calcul des coûts sont décrites, et les résultats de cette estimation sont présentés. Les chiffres sont fournis par utilisation ultime pour les CFC, et par substance pour les autres SACO. Ces résultats valent pour toutes les substances réglementées par le Protocole de Montréal.

Les résultats quantitatifs pour les avantages et les coûts sont résumés au chapitre IV. En principe, les effets nets indiquent le profit net que procure à la société la mise en œuvre du Protocole de Montréal, mais ils sous-estiment les véritables réalisations du Protocole parce qu'il a été impossible de quantifier tous les avantages et d'exprimer tous les effets en dollars.

Le dernier chapitre porte sur le processus du Protocole de Montréal. Il indique en quoi il a été différent de bon nombre d'autres initiatives moins fructueuses et mentionne les leçons qui peuvent être tirées de cette expérience et il se termine par un ensemble complet de références. Les résultats détaillés des estimations sont présentés dans les annexes.



# Conséquences du Protocole de Montréal

## INTRODUCTION

Le Protocole de Montréal, signé le 16 septembre 1987, engageait les premiers signataires à adopter un calendrier de réductions pour la consommation des substances appauvrissant la couche d'ozone (SACO). En date de mars 1997, 163 pays avaient signé le Protocole, qui est entré en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 1989. Depuis lors, une série de modifications (apportées à Londres en 1990, à Copénhague en 1992 et à Vienne en 1995) ont renforcé le Protocole original en y ajoutant des substances, en accélérant le calendrier des réductions et en accroissant leur importance. Le présent chapitre fait ressortir les conséquences du Protocole de Montréal et de ses modifications ultérieures pour la protection de la couche d'ozone.

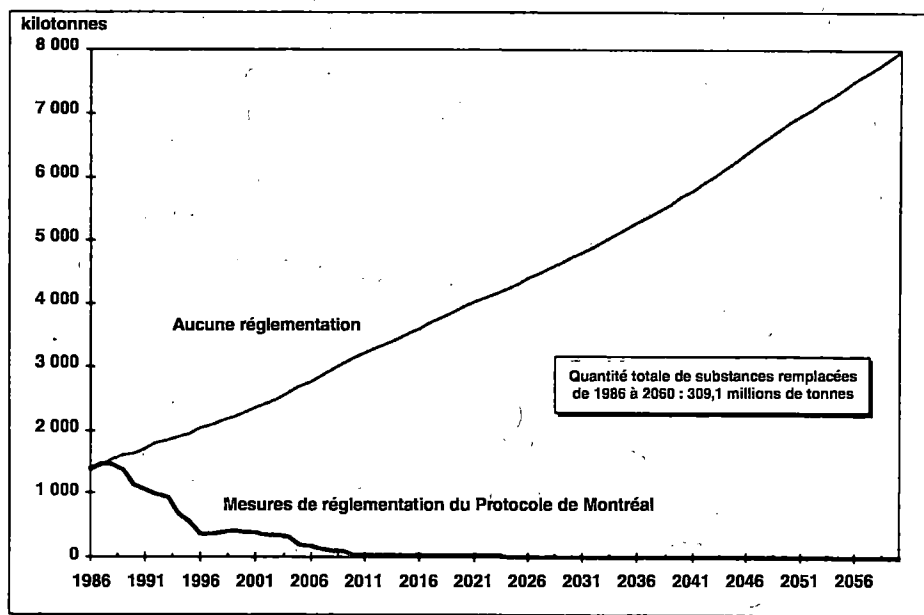
## CONSOMMATION DE SUBSTANCES APPAUVRISANT LA COUCHE D'OZONE

Le Protocole de Montréal et ses modifications ultérieures engagent les signataires à adopter un calendrier de réductions pour la consommation des

SACO. Dans le Protocole, on entend par consommation la production augmentée des importations, déduction faite des exportations. Le Protocole prévoit des calendriers distincts d'élimination graduelle des SACO pour les pays industrialisés et les pays en développement dont la consommation par habitant a été inférieure à 0,3 kg. Ces derniers pays sont mentionnés au paragraphe 5(1).

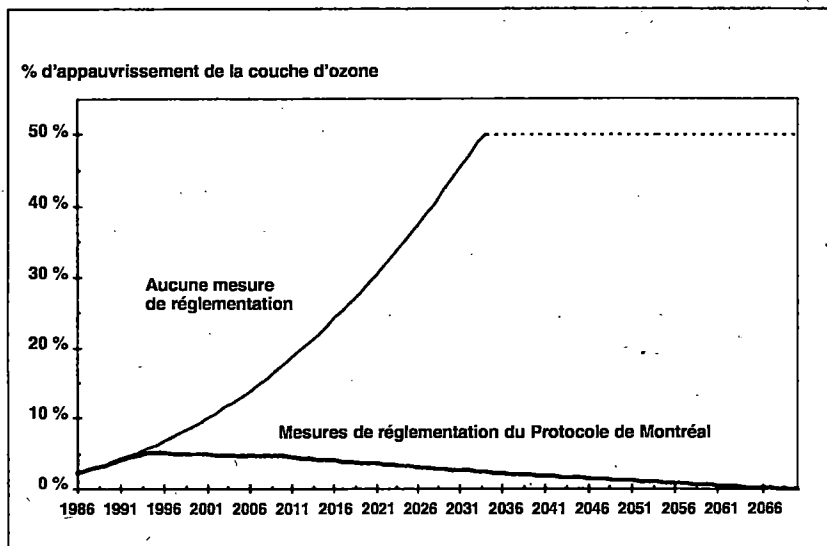
La figure II-1 indique quelle est, en l'absence de mesures de réglementation, la consommation prévue de SACO dans les pays industrialisés et ceux visés au paragraphe 5(1), ce qui contraste fortement avec la consommation de ces substances en vertu du Protocole. Les chlorofluorocarbures (CFC) constituent un groupe de produits chimiques particulièrement inertes et non réactifs, importants en raison de leur caractère inoffensif et de leur inflammabilité. Si leur consommation n'était pas restreinte, ces composés, parce qu'ils possèdent les propriétés susmentionnées, auraient été importants comme composants des aérosols, des frigorigènes et d'autres produits industriels. Les halons sont des agents d'extinction efficaces et non polluants.

**FIGURE II-1** Consommation de substances appauvrissant la couche d'ozone, pondérée par le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (PACO)



Source : Chiffres de la firme ARC fondés sur des données provenant du PNUE, de l'Environmental Protection Agency des États-Unis et de sources industrielles.

**FIGURE II-2 Appauvrissement de la couche d'ozone à l'échelle planétaire pour la période de 1986 à 2060 sans mesure de réglementation et compte tenu du Protocole de Montréal**



Source : U.S. Environmental Protection Agency. (Le modèle tronque les pourcentages d'appauvrissement à partir de 50 %.)

Les halons 1211 et 1301 sont particulièrement utiles en raison de leur faible toxicité. Dans le scénario ne comportant aucune mesure de réglementation, la consommation de substances appauvrissant la couche d'ozone, y compris les CFC, les halons et les autres substances destructrices de l'ozone réglementées par le Protocole, continue d'augmenter à la fois dans les pays industrialisés et dans ceux visés au paragraphe 5(1).

Les réductions annuelles de la consommation de SACO résultant des restrictions imposées par le Protocole de Montréal et ses modifications sont égales à la distance verticale entre les courbes de la figure II-1. Dans le cas du Protocole de Montréal, la consommation réduite de SACO est calculée pour toutes les années. Une faible réduction des SACO est attribuée au Protocole avant l'entrée en vigueur des restrictions concernant la consommation de ces substances.

La période visée par l'étude pour l'évaluation des conséquences du Protocole de Montréal s'étend de 1987 à 2060. L'analyse de sensibilité est effectuée pour deux dates limites, soit les années 2050 et 2070. L'horizon temporel a été choisi de façon à correspondre aux conséquences de l'intervention qui sont évaluées. Le Protocole de Montréal a toujours eu pour but de réduire les dommages

causés par la destruction de l'ozone, qui se seraient considérablement aggravés au cours des ans tout en ayant d'importantes conséquences sur les générations actuelles et futures. L'année 2060 est la date approximative à laquelle les trous dans la couche d'ozone observés dans les années 80 disparaîtront probablement. Cette période de près de 75 ans correspond à l'espérance de vie de bon nombre de personnes nées lorsque le Protocole de Montréal a été signé. Ce qui est peut-être plus important, c'est que cette période correspond à celle où les effets de la destruction de l'ozone, sans le Protocole, auraient été les plus graves. Comme dans d'autres études de ce genre, y compris celles réalisées pour l'Environmental Protection Agency des États-Unis, la durée de cette période a été choisie de façon à correspondre aux dommages à long terme dus aux substances responsables de la destruction de la couche d'ozone.

## APPAUVRISSEMENT DE LA COUCHE D'OZONE

Si toutes les dispositions du Protocole de Montréal sont respectées, il est prévu que la couche d'ozone sera le plus appauvrie avant le début du siècle prochain. Par après, elle se rétablira, ce qui prendra probablement plus de 50 ans. Dans le scénario ne comportant aucune mesure de réglementation, une plus grande consommation de SACO aurait occasionné la diminution continue des concentrations d'ozone.

La figure II-2 montre le pourcentage d'appauvrissement de la couche d'ozone de la planète pour le scénario ne comportant aucune mesure de réglementation et celui du Protocole de Montréal. L'atténuation annuelle de l'appauvrissement due au Protocole est égale à la distance verticale entre les deux courbes.

## EXPOSITION

Si la couche d'ozone s'était de plus en plus appauvrie en raison de l'absence de mesures de réglementation, le rayonnement ultraviolet (UV) atteignant la surface de la terre aurait été plus intense. Ce rayonnement, notamment les rayons UV-B, est reconnu comme l'une des causes de divers effets sanitaires et non sanitaires. Ces effets auraient occasionné des dommages de plus en plus considérables dans le scénario ne comportant aucune mesure de réglementation.

## EFFETS SANITAIRES QUANTIFIABLES

### Introduction

La présente section décrit les effets sanitaires quantifiables résultant du Protocole de Montréal. Ces effets ont été déterminés à l'aide des données et des modèles analytiques existants. Dans tous les cas, nous avons essayé de produire les meilleures estimations quantitatives possibles compte tenu des connaissances actuelles. En outre, les méthodes employées et les résultats obtenus ont été examinés par des experts dans le domaine internationalement reconnus. Étant donné qu'il existe encore des incertitudes, les résultats présentés devraient être interprétés comme des indicateurs des effets sanitaires évités grâce au Protocole de Montréal. Les effets réels peuvent être plus ou moins importants que les estimations faites compte tenu des connaissances actuelles.

Les effets sanitaires représentent la différence entre le scénario ne comportant aucune mesure de réglementation et celui du Protocole de Montréal en ce qui concerne le nombre de cas et de mortalités dus à divers effets sanitaires résultant de l'intensification du rayonnement UV-B. Le modèle utilisé relie cette intensification (pondérée pour certaines parties du spectre se rapportant à chaque effet) aux cas et aux mortalités dus à chaque effet sanitaire dans l'un et l'autre des scénarios. Les résultats sont soustraits les uns des autres afin de déterminer ceux qui sont attribuables au Protocole de Montréal.

Voici quelle était la structure fondamentale du modèle. Le globe a été divisé en plusieurs zones de latitude :

|                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| de 70° N à 60° N. | de 0° à 20° S.    |
| de 60° N à 50° N. | de 20° S à 30° S. |
| de 50° N à 40° N. | de 30° S à 40° S. |
| de 40° N à 30° N. | de 40° S à 50° S. |
| de 30° N à 20° N. | de 50° S à 60° S. |
| de 20° N à 0°.    |                   |

Dans chaque zone, l'information sur une caractéristique d'une population a été enregistrée à l'aide d'un tableau comprenant des cohortes de naissance de cinq ans, de 1890 à 2100, et des groupes d'âge de 5 ans allant de 0 à 4 et de 90 à 94 ans. Les caractéristiques comprennent :

- L'exposition aux rayons UV-B (pondérée pour chaque effet sanitaire) dans le scénario ne comportant aucune mesure de réglementation. Les expositions ont été calculées à l'aide des données sur les niveaux prévus d'appauvrissement de la couche d'ozone dans ce scénario.
- L'exposition aux rayons UV-B (pondérée pour chaque effet sanitaire) dans le scénario du Protocole de Montréal. Les expositions ont été calculées à l'aide des données sur les niveaux prévus d'appauvrissement de la couche d'ozone dans ce scénario.
- Les taux d'incidence de base (cancers des cellules basales, cancers des cellules squameuses, mélanomes et cataractes) dans le scénario ne comportant aucun appauvrissement de la couche d'ozone. Les taux d'incidence de cancers ont été calculés à l'aide d'un modèle de régression utilisant des données tirées de fichiers du cancer indiquant la latitude, la couleur de la peau, l'espérance de vie, le développement économique et les pratiques religieuses se rapportant à l'habillement. Dans tous les cas, les taux d'incidence

TABLEAU 3

## Avantages et coûts du Protocole de Montréal, de 1987 à 2060

## AVANTAGES

## Avantages pour la santé

|                                                     |             |
|-----------------------------------------------------|-------------|
| Diminution des cas de cancer cutané sans mélanome   | 19 100 000  |
| Diminution des cas de cancer cutané avec mélanome   | 1 500 000   |
| Diminution des cas de cataractes*                   | 129 100 000 |
| Diminution des mortalités dues aux cancers cutanés* | 333 500     |

## Avantages financiers

|                                         |                  |
|-----------------------------------------|------------------|
| Diminution des dommages aux pêcheries   | 238 milliards \$ |
| Diminution des dommages à l'agriculture | 191 milliards \$ |
| Diminution des dommages aux matériaux   | 30 milliards \$  |
| Avantages financiers totaux             | 459 milliards \$ |

## COÛTS

|              |                  |
|--------------|------------------|
| Coûts totaux | 235 milliards \$ |
|--------------|------------------|

## AVANTAGES NETS

|                           |                                                   |
|---------------------------|---------------------------------------------------|
| Avantages moins les coûts | 224 milliards \$ plus les avantages pour la santé |
|---------------------------|---------------------------------------------------|

Source : Tel qu'indiqué au chapitre II.

\*Moyenne des valeurs maximales et minimales.

Le taux d'actualisation pour le scénario de référence est de 5 %.

Il est à noter que les avantages totaux comprennent les effets sanitaires et les avantages exprimés en dollars.

ont été choisis à l'aide des meilleures données existantes. Par exemple, les taux d'incidence provenant des pays industrialisés ont généralement été utilisés par crainte que les pays en développement ne communiquent pas toutes leurs données. Des exceptions ont été faites lorsque la population de base d'un pays industrialisé vivant dans une certaine zone de latitude et appartenant à une race de couleur était relativement faible.

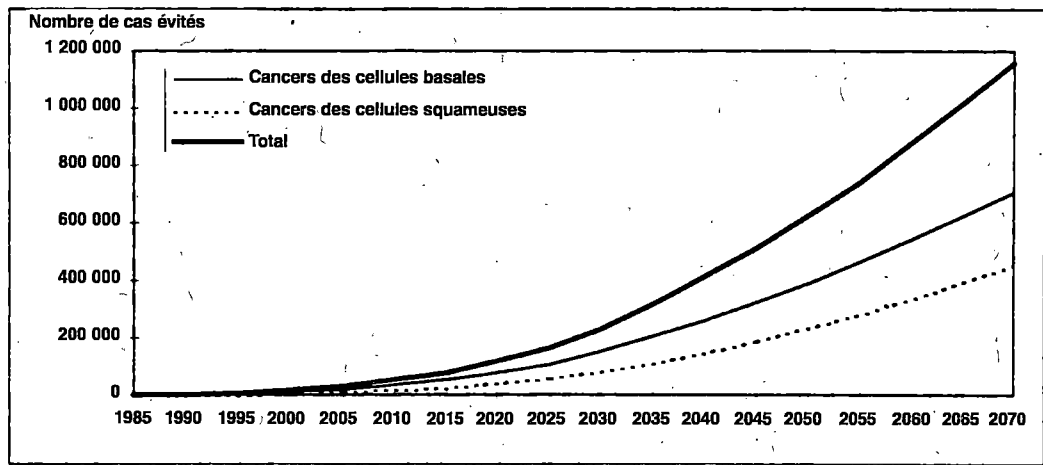
- Les données sur l'incidence des cataractes ont été obtenues de l'American Academy of Ophthalmology pour la Beaver Dam Eye Study. Les taux pour les pays en développement n'ont pas été utilisés par crainte qu'ils n'incluent probablement des cas attribuables à des causes autres que l'exposition (p. ex., la malnutrition et le diabète). Pour les États-Unis, les taux d'incidence des cataractes ont été multipliés par 0,2 afin de déterminer le nombre de cas attribuables à l'exposition aux rayons UV-B.

- Les taux d'incidence de base des cancers cutanés et des cataractes ont été calculés pour les personnes de race blanche et noire, les Asiatiques et d'autres groupes de population (séparément pour les hémisphères nord et sud).
- Les données démographiques pour 1990 ont été obtenues de la Banque mondiale et de l'US Central Intelligence Agency<sup>1</sup>. Afin de calculer la population pour les autres années, les taux de croissance historiques et projetés ont été utilisés.<sup>2</sup> Pour les groupements démographiques susmentionnés, les populations ont été calculées séparément pour les pays industrialisés et les pays en développement. Dans le cas des sous-modèles utilisés pour déterminer le nombre de cas de mélanomes et de cataractes, les populations ont été subdivisées en hommes et femmes en raison de différents taux d'incidence et coefficients biologiques d'incidence (pour les mélanomes seulement).

1. Les données démographiques ont été tirées de l'Atlas de la Banque mondiale pour 1996. Les renseignements détaillés sur les caractéristiques démographiques comme les races de couleur, les conventions religieuses concernant l'habillement et l'espérance de vie proviennent de la publication *The World Factbook 1995-1996*, Central Intelligence Agency, Washington, D.C.

2. Les projections démographiques ont été tirées de la publication *World Population Profile : 1996*, U.S. Bureau of the Census, Washington, D.C.

**FIGURE II-4 Nombre annuel de cas de cancers cutanés sans mélanome évités en raison des mesures de réglementation du Protocole de Montréal**



Source : Chiffres de la firme ARC.

Les expositions répétitives aux rayons UV-B (pondérées pour les effets sanitaires) ont servi à calculer les augmentations de pourcentage de l'incidence des divers effets sanitaires dans le scénario ne comportant aucune mesure de réglementation et celui de Montréal; un coefficient biologique d'incidence a été utilisé pour chaque effet (et chaque sexe dans le cas des mélanomes). Ces calculs ont été effectués pour chaque groupe d'âge de 5 ans, par cohorte, et par zone de latitude pour tous les groupements de population. Les effets pour les deux scénarios ont été soustraits les uns des autres et les résultats, présentés pour chaque année, de 1985 à 2070.

#### Résumé des effets sanitaires quantifiables

Le tableau II-3 résume les résultats obtenus pour les effets sanitaires quantifiables découlant du Protocole de Montréal. Il indique les effets cumulatifs, à certaines années, pour les cas de cancer cutané, de cataractes et de mortalité due aux cancers cutanés. Le tableau montre les effets de diverses périodes d'analyse. Les périodes à compter de la mise en œuvre du Protocole jusqu'en 2050, 2060 et 2070 ont été choisies. Le tableau indique aussi les « premières » conséquences du Protocole de Montréal jusqu'en 2000 et 2030.

Comme on peut le voir, les effets sanitaires évités grâce au Protocole de Montréal augmentent exponentiellement en fonction du temps écoulé à compter de la mise en œuvre du Protocole. Par exemple, le nombre de cas de moins de cancers cutanés sans mélanome augmente respectivement de 11, 19 et 29 millions selon que la période d'analyse s'étend jusqu'à 2050, 2060 et 2070. Si la période était étendue au-delà de 2070, d'autres effets sanitaires seraient évités.

Le Protocole de Montréal permet d'éviter les effets sanitaires suivants à compter de la date de sa mise en œuvre jusqu'en 2060 :

#### Cas prévus :

- Cancer cutané sans mélanome : 19 millions.
- Cancer cutané avec mélanome : 1,5 million.
- Cataractes : de 58,2 millions à 200 millions (valeurs minimale et maximale).

Mortalités dues à des cancers cutanés : de 171 000 à 496 000 (valeurs minimale et maximale)

Les intervalles de variation des valeurs mentionnées s'expliquent par les hypothèses alternatives utilisées pour calculer les effets sanitaires. Toutes les valeurs calculées comportent un certain degré d'incertitude, mais il n'en reste pas moins que, même si cette incertitude est élevée, les effets sanitaires évités grâce au Protocole de Montréal demeurent considérables. Les sections suivantes détaillent davantage chaque effet sanitaire quantifié.

### Incidence des cancers cutanés sans mélanome

Le Protocole de Montréal occasionnera une diminution d'environ 19,1 millions de cas de cancers cutanés sans mélanome à compter de la date de sa mise en œuvre jusqu'en 2060. Pour une période d'analyse s'étendant jusqu'en 2070, 10 millions de cas de plus seront évités, ce qui donnera un total de 29,4 millions de cas jusqu'à cette date. (En 2050, 11,5 millions de cas auront été évités). La figure II-4 montre que le nombre annuel de cas de cancers cutanés sans mélanome que le Protocole de Montréal permet d'éviter augmente de façon exponentielle.

Le modèle décrit ci-dessus prédit qu'environ 60 % des cancers sans mélanome auraient été des cancers des cellules basales, et 40 %, des cancers des cellules squameuses. Actuellement, le ratio

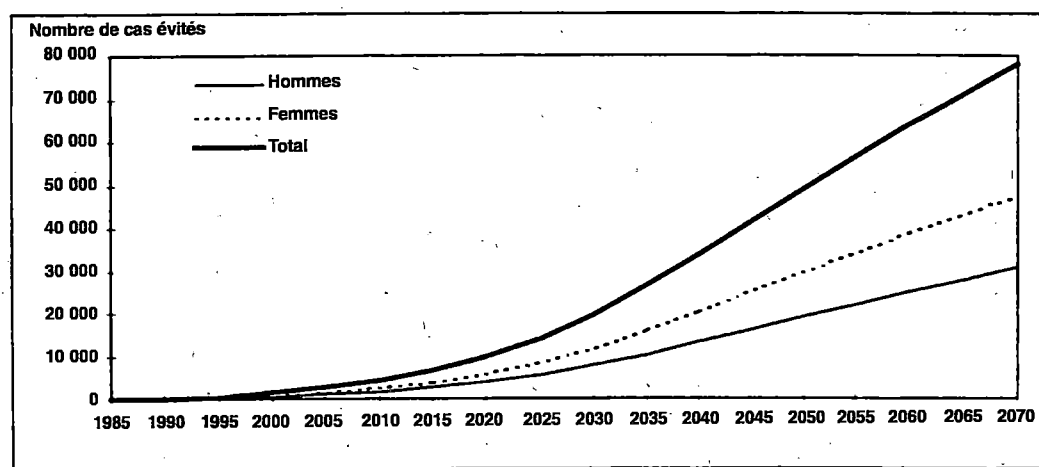
pour ces types de cancer est de 80:20, surtout parce que le coefficient biologique d'incidence utilisé pour les cancers des cellules squameuses est plus élevé.

### Incidence des cancers cutanés avec mélanome

D'après les estimations ici présentées, en 2060, le Protocole de Montréal aura permis de réduire de 1,5 million les cas de cancers cutanés avec mélanome. En 2050, ce chiffre sera de 952 000, et en 2070, de 2,2 millions. Environ 60 % des cas évités seront les cancers cutanés avec mélanome chez les femmes, pour lesquelles les taux actuels d'incidence de cette maladie sont en général légèrement plus faibles. Toutefois, comme le coefficient biologique d'incidence (CBI)<sup>3</sup> utilisé pour les femmes dans le modèle était plus élevé, il en a été de même pour le nombre de cas évités.

La figure II-5 indique le nombre annuel de cas de cancers cutanés avec mélanome évités en raison du Protocole de Montréal. Il est à noter que des recherches sont toujours en cours pour chercher à savoir comment le rayonnement UV provoque la formation de mélanomes chez les humains et établir la relation entre les mélanomes et la couche d'ozone. Le modèle et les chiffres ici utilisés sont fondés sur la relation UV-mélanome décrite dans le rapport de 1994 du Groupe d'évaluation des effets sur l'environnement du PNUE.

**FIGURE II-5** Nombre annuel de cas de cancers cutanés sans mélanome évités en raison des mesures de réglementation du Protocole de Montréal



Source : Chiffres de la firme ARC.

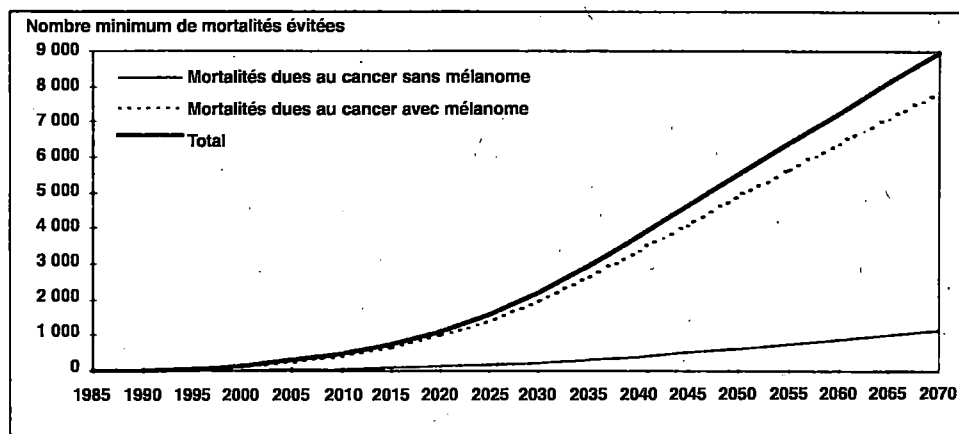
<sup>3</sup> Le CBI est une mesure de la réaction à l'effet d'un changement dans la dose de rayons UV-B. Dans le modèle utilisé, le CBI est la variation en pourcentage de l'incidence de l'effet sur la santé humaine correspondant à un changement de 1 % de l'exposition aux rayons UV-B. Dans le cas du cancer cutané avec mélanome, le CBI est plus élevé chez les femmes que chez les hommes, ce qui donne lieu à une incidence accrue de ces cancers chez les femmes lorsque le rayonnement UV-B est plus intense.

### Mortalités dues aux cancers cutanés

D'après les estimations ici présentées, le Protocole de Montréal occasionnera une diminution de l'incidence des cancers cutanés qui se répercutera sur le nombre de mortalités dues à cette maladie. Les mortalités dues aux cancers cutanés sans mélanome varieront probablement entre 0,1 % et 1,0 % de tous les cas, et pour ce qui est des cancers avec mélanome, l'intervalle de variation sera de 10 % à 20 %.

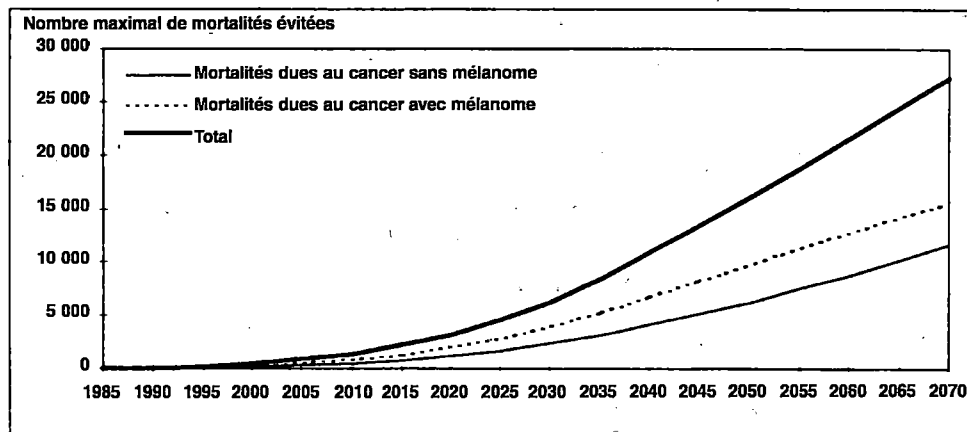
D'après les estimations fondées sur les valeurs minimales (si l'on présume que 0,1 % des cancers cutanés sans mélanome et 10 % des cancers cutanés avec mélanome causent la mort), 19 000 mortalités de moins dues aux cancers du premier type, et 152 000 dues aux cancers du deuxième type seront évitées, soit un total de 171 000. D'ici 2050, 107 000 mortalités seront évitées, et d'ici 2070, ce nombre s'élèvera à 253 000.

**FIGURE II-6** Nombre annuel de mortalités dues aux cancers cutanés avec et sans mélanome qui ont été évitées en raison des mesures de réglementation du Protocole de Montréal (valeurs minimales)



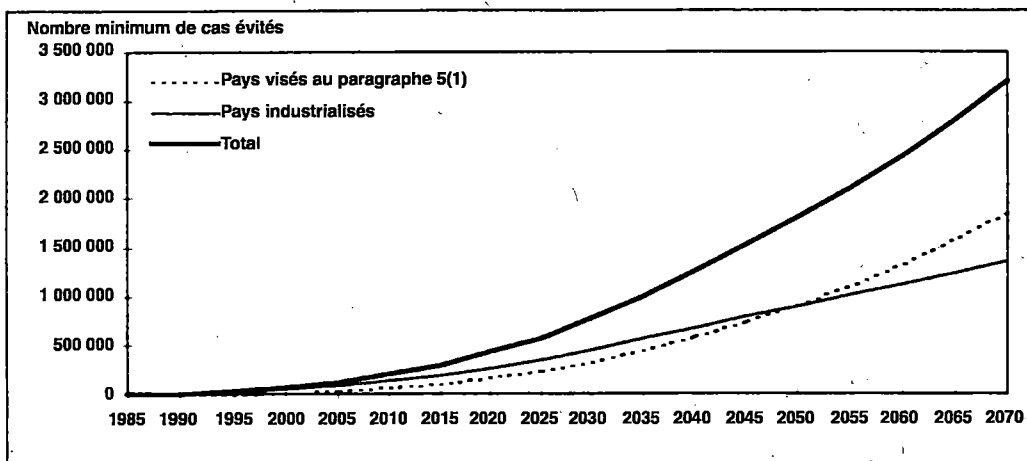
Source : Chiffres de la firme ARC.

**FIGURE II-7** Nombre annuel de mortalités dues aux cancers cutanés avec et sans mélanome qui ont été évitées en raison des mesures de réglementation du Protocole de Montréal (valeurs maximales)



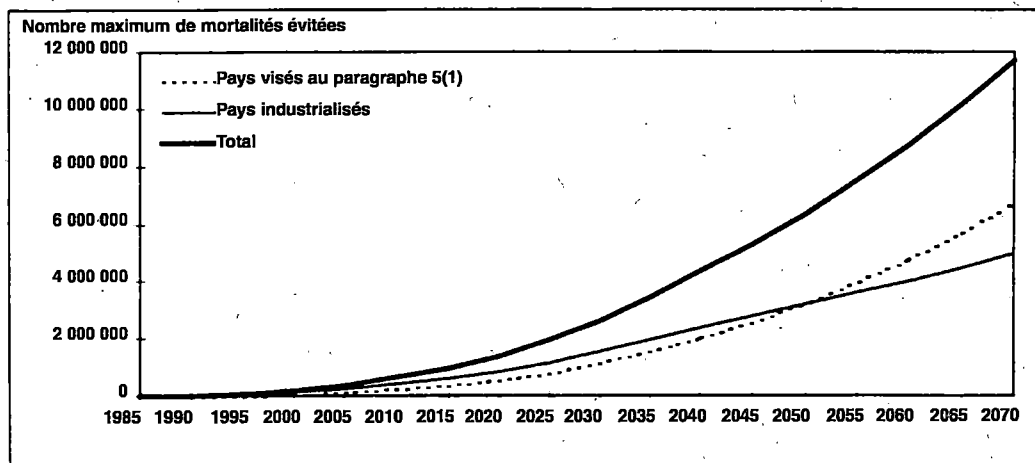
Source : Chiffres de la firme ARC.

**FIGURE II-8 Diminution annuelle des cas de cataractes résultant des mesures de réglementation du Protocole de Montréal (valeurs minimales)**



Source : Chiffres de la firme ARC.

**FIGURE II-9 Diminution annuelle des cas de cataractes résultant des mesures de réglementation du Protocole de Montréal (valeurs maximales)**



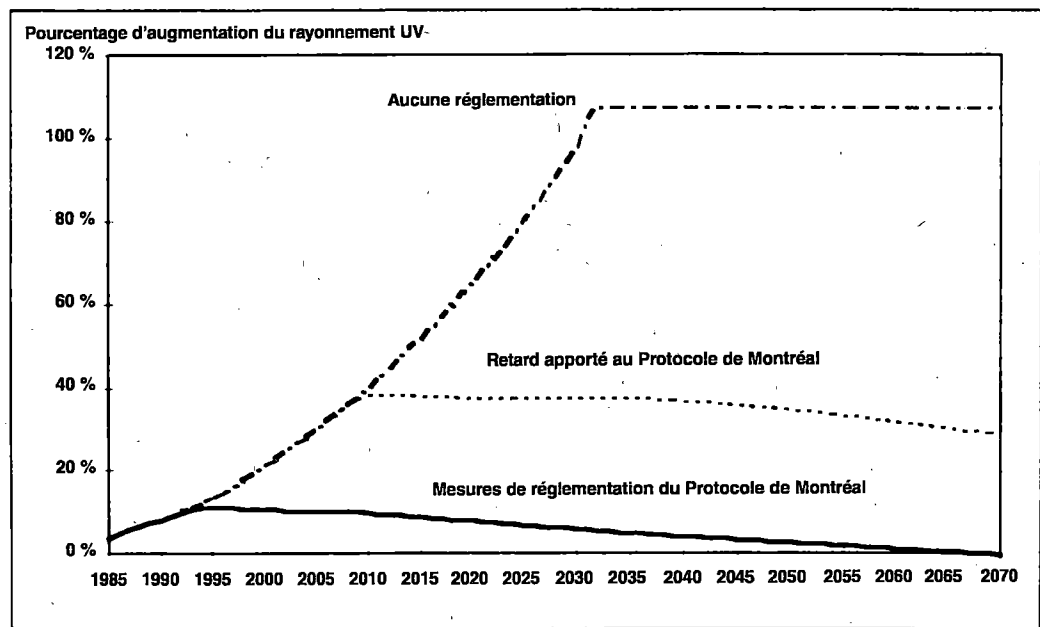
Source : Chiffres de la firme ARC.

D'après les estimations fondées sur les valeurs maximales (1,0 % des cancers cutanés sans mélanome et 20 % des cas avec mélanome causent la mort), d'ici 2060, 190 000 mortalités de moins dues aux cancers du premier type, et 305 000 de moins dues aux cancers du deuxième type seront évitées, soit un total de 496 000. D'ici 2050, le

nombre total de mortalités de moins dues aux cancers cutanés sera de 305 000, et d'ici 2070, il s'élèvera à 742 000.

Les figures II-6 et II-7 indiquent le nombre annuel de mortalités de moins dues aux cancers cutanés avec et sans mélanome compte tenu des hypothèses minimale et maximale.

**FIGURE II-10 Pourcentage d'augmentation du rayonnement UV pour divers scénarios**



**Note :** Le pourcentage d'augmentation du rayonnement UV diminue dans le scénario où la mise en œuvre du Protocole est retardée, mais cette diminution est très faible relativement à l'échelle de la figure. C'est pourquoi cette échelle a été légèrement modifiée de façon à illustrer les effets.

### Cataractes

Comme l'intensité du rayonnement UV-B qui atteint la surface de la terre diminuera en raison des mesures de réglementation du Protocole de Montréal, il est prévu qu'il en résultera de 58 à 200 millions de moins de cas de cataractes d'ici 2060. Cet intervalle de variation s'explique par les diverses hypothèses avancées au sujet du coefficient biologique d'incidence à utiliser dans l'analyse. Selon que la période d'analyse se termine en 2050 ou en 2070, l'intervalle de variation pour les cas de cataractes sera de 36 à 86 millions, ou de 86 à 300 millions. Le pourcentage de cas de cataractes évités augmente de plus en plus dans les pays en développement en raison des taux relatifs de croissance démographique des pays industrialisés et des pays en développement utilisés dans le modèle.

Les figures II-8 et II-9 indiquent le nombre annuel de cas de cataractes de moins dans les pays industrialisés et les pays en développement selon que

l'estimation de cet effet est minimal ou maximal.

Ces estimations ont été faites en fonction du niveau de développement; la probabilité d'une incidence accrue de la cécité et de la mort prématurée dans les pays en développement dues aux cataractes est discutée plus loin.

### Effet sur les résultats quantitatifs d'un retard dans la mise en œuvre du Protocole de Montréal

La présente section montre les effets qui se seraient produits si la mise en œuvre du Protocole de Montréal avait été retardée de 20 ans. Dans ce scénario, le Protocole a été signé en 2007, et les calendriers de réduction des substances appauvrissant la couche d'ozone ont été retardés de 20 ans.

Pour analyser ce nouveau scénario, l'effet prévu du Protocole de Montréal sur les niveaux de rayonnement UV-B est retardé de 20 ans dans le modèle. Les niveaux de rayonnement UV-B prévus pour 2007 dans le scénario ne comportant aucune réglementation servent de point de départ

**TABLEAU II-11 Effets sanitaires jusqu'en 2060 résultant des mesures de réglementation du Protocole de Montréal et d'un retard apporté à leur mise en œuvre, et réductions nettes attribuables au respect de la date de mise en vigueur**

| Hypothèses                                      | Nombre de cas :             |                             |                      |                      | Nombre de mortalités :                |                                       |                                       |                                       |                                           |                                           |
|-------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                                                 | Cancer cutané sans mélanome | Cancer cutané avec mélanome | Cataractes (minimum) | Cataractes (maximum) | Cancer cutané sans mélanome (minimum) | Cancer cutané sans mélanome (maximum) | Cancer cutané avec mélanome (minimum) | Cancer cutané avec mélanome (maximum) | Tous les types de cancer cutané (minimum) | Tous les types de cancer cutané (maximum) |
|                                                 | (milliers)                  | (milliers)                  | (milliers)           | (milliers)           |                                       |                                       |                                       |                                       |                                           |                                           |
| Protocole de Montréal actuel                    | 19 100                      | 1 523                       | 58 191               | 200 229              | 19 100                                | 190 996                               | 152 276                               | 304 552                               | 171 376                                   | 495 548                                   |
| Retard apporté au Protocole                     | 11 755                      | 890                         | 47 298               | 166 607              | 11 957                                | 119 565                               | 89 008                                | 178 015                               | 100 965                                   | 297 580                                   |
| Effets ne se produisant pas en raison du retard | 7 345                       | 633                         | 10 893               | 33 622               | 7 143                                 | 71 431                                | 63 269                                | 126 537                               | 70 412                                    | 197 968                                   |

au scénario révisé du Protocole. Pour les années subséquentes, les types d'effets du rayonnement UV-B prédits dans le premier scénario du Protocole de Montréal sont les mêmes. La figure II-10 montre le taux de variation des niveaux de rayonnement UV-B à l'aide du spectre des effets sur l'ADN<sup>4</sup> pour la zone de latitude de 40° N à 30° N dans les cas suivants :

- Scénario ne comportant aucune réglementation.
- Scénario du Protocole de Montréal.
- Scénario dans lequel la mise en œuvre du Protocole est retardée.

Le tableau II-11 montre les conséquences d'un retard de 20 ans dans la mise en œuvre du Protocole de Montréal et indique le nombre d'effets sanitaires évités jusqu'en 2060 dans le scénario actuel et celui où la mise en œuvre du Protocole a été retardée. La différence entre les deux représente les effets nocifs pour la santé qui se seraient produits si la mise en œuvre du Protocole avait été retardée. Les conséquences d'un retard de 20 ans auraient été les suivantes :

- 7,3 millions de cas de plus de cancers cutanés sans mélanome.
- 633 000 cas de plus de cancers cutanés avec mélanome
- de 11 à 34 millions de cas de plus de cataractes.
- de 70 000 à 198 000 autres mortalités dues aux cancers cutanés.

## AUTRES EFFETS SANITAIRES

### Introduction

Un certain nombre d'autres effets sanitaires, dont on soupçonne qu'ils sont dus à l'intensité accrue du rayonnement UV-B, ne peuvent être quantifiés pour le moment. Il s'agit d'autres cas de cécité et de mortalité résultant de la formation de cataractes, d'effets sur le système immunitaire et d'effets sur les maladies des yeux autres que les cataractes. En voici une brève description.

### Cas de cécité et de mortalité dus aux cataractes

Le modèle utilisé prédit que de 27,5 millions à 95,7 millions de cas de cataractes seront évités dans les pays en développement d'ici 2060. Des preuves semblent indiquer qu'un certain nombre de cas de cataractes dans ces pays auraient occasionné la cécité ou la mort, mais ces preuves ne sont pas claires parce que les cataractes peuvent être dues à des causes autres que le rayonnement UV-B. Ces causes, notamment la malnutrition et le diabète, peuvent avoir occasionné la formation de cataractes et, par la suite, la cécité ou la mort des personnes qui en souffrent. Il n'a donc pas été possible de quantifier le nombre de cas de cécité ou de mortalité évités et dus à la formation de cataractes causées par les rayons UV-B.

**TABLEAU II-12 Prévalence de la cécité et pourcentage de cas reliés aux cataractes dans certaines régions**

|                             | Prévalence de la cécité | Pourcentage de cas reliés aux cataractes |
|-----------------------------|-------------------------|------------------------------------------|
|                             | %                       | %                                        |
| Pays établis*               | 0,3                     | 3,5                                      |
| Inde                        | 1,0                     | 57,5                                     |
| Afrique du sud du Sahara    | 1,4                     | 43,7                                     |
| Amérique latine et Antilles | 0,5                     | 57,7                                     |

Source : B. Thylefors, A.-D. Négrel, R. Pararajasegaram et K.Y. Dadzie, «Global Data on Blindness», *Bulletin de l'Organisation mondiale de la santé*, vol. 73, n° 1 (1995), p. 117-118.

\*Europe de l'Ouest, Amérique du Nord, Australie, Japon et Nouvelle-Zélande.

<sup>4</sup> Les rayons UV-B constituent un spectre de fréquences lumineuses dont l'intensité augmentera probablement de façon non linéaire à mesure que la couche d'ozone s'appauvrira. Certaines de ces fréquences intensifient davantage certains effets sur la santé humaine. Le spectre des effets sur l'ADN représente une pondération de ces fréquences. Dans le modèle utilisé, le taux de variation du spectre des effets sur l'ADN sert à déterminer le changement dans l'incidence des cancers cutanés avec mélanome et des cataractes.

## Risque accru de mortalité à la suite de cataractes

Les résultats d'une étude réalisée dans la région centrale de l'Inde<sup>5</sup> ont indiqué que le taux de mortalité des personnes souffrant de cataractes était deux fois plus élevé que celui des individus n'ayant pas cette maladie. Les auteurs ont choisi au hasard 1 020 personnes âgées de 40 à 64 ans, et ils ont effectué des examens et des réévaluations en 1982 et 1986 respectivement. L'échantillon ne comportait aucun cas de diabète<sup>6</sup>. Toutefois, il a été impossible pour les auteurs de prendre en compte les épisodes de grave déshydratation qui auraient pu influencer sur l'incidence des cataractes.

Bien qu'il existe des preuves à l'appui de l'accroissement de la mortalité dans les pays en développement en raison de la formation de cataractes, des épisodes antérieurs de malnutrition ou de déshydratation peuvent avoir été la cause de cette maladie et des mortalités subséquentes. Néanmoins, il est plausible que les personnes souffrant de cataractes dans les pays en développement soient moins aptes à assurer leurs moyens d'existence, et donc plus susceptibles de mourir par la suite, mais il n'existe pas de données permettant de quantifier cet effet.

## Incidence accrue de cécité à la suite de cataractes

Une récente étude réalisée par l'Organisation mondiale de la santé<sup>7</sup> a conclu que la principale cause de la cécité dans le monde était les cataractes. Cette maladie a été jugée responsable de 42 % des 37,9 millions de cas de cécité estimés à l'échelle planétaire.

Le tableau II-12 indique la prévalence de la cécité et le pourcentage de cas reliés aux cataractes dans la population de certaines régions du globe. Bien que la prévalence de la cécité soit un peu plus forte dans les pays en développement que dans les pays établis (de 2 à 5 fois), le pourcentage de cas de cécité reliés aux cataractes est plus élevé dans les pays en développement (de 13 à 16 fois).

Dans la plupart des cas, la cécité due aux cataractes est opérable ou guérissable<sup>8</sup>. Toutefois, dans les pays en développement, il arrive souvent que le nombre annuel d'opérations pour les cataractes ne réponde pas aux besoins, ce qui augmente de plus en plus la liste d'attente des patients qui, devenus aveugles, tireraient avantage

d'une chirurgie. En Inde, 70 % des personnes devenues aveugles en raison de cataractes dans les deux yeux ne recevront jamais de chirurgie correctrice<sup>9</sup>. Si le Protocole de Montréal n'avait pas été mis en œuvre, l'incidence des cataractes causées par les rayons UV-B aurait grossi l'arrière des cas opérables dans les pays en développement.

Toutefois, tous les cas de cécité dus aux cataractes dans les pays en développement ne peuvent pas être attribués à l'exposition aux rayons UV-B. Comme il n'existe pas de méthode permettant de calculer séparément le pourcentage de cas dus aux rayons UV-B et celui dû à d'autres causes, il est impossible de déterminer le nombre additionnel de cas de cécité évités en raison du Protocole de Montréal.

## Effets immunologiques

Il existe de fortes preuves scientifiques selon lesquelles l'exposition accrue aux rayons UV-B produit des effets immunologiques. La peau humaine est un important organe immunitaire, et il est de plus en plus reconnu que l'exposition accrue aux rayons UV-B diminue l'immunité aux maladies infectieuses et peut déclencher l'activation de ces maladies et des affections apparentées qui sont en dormance. En outre, il est possible que les rayons UV-B diminuent l'efficacité des vaccins utilisés contre ces maladies. Toutefois, les données servant à prédire cet effet sont peu valables, et il n'existe pas de modèle permettant de le calculer.

Dans les régions du monde où les maladies infectieuses posent déjà un risque considérable et chez les populations où la fonction immunitaire est affaiblie, l'immunodépression causée par le rayonnement UV-B est un effet additionnel qui peut être important. D'après l'Organisation mondiale de la santé, 17 millions de personnes (soit 0,3 % de la population mondiale) sont décédées à la suite de maladies infectieuses en 1995<sup>10</sup>.

En outre, le pourcentage de la population humaine vulnérable aux effets immunologiques est plus élevé que celui des personnes atteintes d'un cancer cutané, car toutes les races de couleur peuvent être fortement touchées. Les mortalités additionnelles dues à l'intensification du rayonnement UV-B et les conséquences de cette intensification sur le système immunitaire peuvent être un important effet qui n'est toutefois pas quantifiable.

5 D.C. Minassian, V. Mehra et G.J. Johnson, «Mortality and Cataract: Findings from a Population-Based Longitudinal Study», *Bulletin de l'Organisation mondiale de la santé*, vol. 70, n° 2 (1992), p. 219-223.

6 Aucune relation entre la formation de cataractes et la mortalité chez la population non diabétique de Framingham, Massachusetts, n'a été constatée dans une étude réalisée par J.M. Podgor et al. et intitulée «Lens Changes and Survival in a Population-Based Study» (*New England Journal of Medicine*, vol. 313 (1985), p. 1438-1444).

7 B. Thylefors, A.-D. Négrel, R. Pararajasegaram et K.Y. Dadzie, «Global Data on Blindness», *Bulletin de l'Organisation mondiale de la santé*, vol. 73, n° 1 (1995), p. 115-121.

8 Ibid., p. 118.

9 H. Limburg, Raj Kumar et D. Bachani, «Forecasting Cataract Blindness – and Planning to Combat It», *Forum mondial de la santé*, vol. 17 (1996), p. 15-20.

10 Organisation mondiale de la santé, *Rapport sur la santé dans le monde en 1996*.

## Autres maladies des yeux

L'intensification du rayonnement UV-B, en plus d'avoir un effet sur les cataractes, en aura probablement sur d'autres maladies des yeux. Il est prévu que cette intensification occasionnera d'autres cas de photokératoconjunctivites («ophtalmie des neiges» ou «conjonctivite des soudeurs»). Cette affliction est due au rougissement de la surface du globe oculaire causé par un intense rayonnement UV. Bien qu'il s'agisse d'une maladie fréquente dont la cause est bien connue, aucune méthode permettant de déterminer l'effet d'une intensification du rayonnement UV n'a été mise au point.

Une augmentation de l'incidence d'autres maladies des yeux est à prévoir, par exemple, le ptérygion (une excroissance de la membrane muqueuse extérieure qui recouvre la lentille de l'œil) et la kératopathie bulleuse climatique (une dégénérescence de la membrane fibreuse du tissu de la cornée en dépôts ayant la forme de gouttelettes). Une méthode de mesure de cet effet probable n'a pas non plus été mise au point.

## EFFETS NON SANITAIRES

### Introduction

Un certain nombre d'effets non sanitaires dus à l'intensification du rayonnement UV-B ont été relevés, mais la plupart ne peuvent être quantifiés pour le moment. La présente section discute des effets prévus qui viennent s'ajouter à ceux sur la santé humaine.

### Animaux

Une grande partie des effets prévus pour les populations humaines seront subis par les animaux terrestres, mais il est impossible de les quantifier en raison d'un manque de renseignements. Ces effets varieront probablement selon que les animaux sont sauvages ou domestiques.

### Plantes terrestres

La recherche sur les plantes a montré que le rayonnement UV-B peut avoir plusieurs effets négatifs. Ces effets varient d'une espèce à l'autre et même selon les cultivars d'une même espèce, mais certains effets généraux des rayons UV-B ont été observés :

- Inhibition de la photosynthèse.
- Dommages causés à l'ADN.

- Changements dans la forme et la structure des plantes (morphologie).
- Changements dans le rapport entre le climat et les fonctions végétales comme la floraison (phénologie).
- Changements dans la productivité (accumulation de la biomasse).

La sensibilité des plantes au rayonnement UV-B varie aussi en fonction de leur stade phénologique et de leur habitat naturel. Un grand nombre d'études réalisées jusqu'à présent examinent les effets sur les plantes en milieu contrôlé seulement, ce qui ne correspond peut-être pas exactement aux effets qui se produisent dans l'habitat naturel.

Les dommages causés aux plantes par les rayons UV-B du soleil peuvent avoir des répercussions économiques sur l'agriculture et la foresterie. Les résultats des études scientifiques sur les cultures ne sont pas concluants. Dans une étude de six ans portant sur le soja, deux types de cultivars ont été comparés, l'un, sensible aux rayons UV-B, et l'autre, tolérant. Le rendement du cultivar sensible aux rayons UV-B a accusé une réduction allant jusqu'à 25 % dans un milieu simulant un appauvrissement d'ozone de 25 %. Dans ce même milieu, le rendement du cultivar tolérant a augmenté comparativement au milieu réel de croissance. Toutefois, on a constaté que les deux tiers des cultivars de soja étaient sensibles au rayonnement UV-B<sup>11</sup>.

Les effets dommageables pour l'agriculture pourraient peut-être donner lieu à d'importantes répercussions, compte tenu de la taille de l'industrie, notamment dans les pays en développement. Pour 1994, les données des Nations Unies montrent que la valeur de toute la production mondiale de céréales, d'huiles tirées des plantes, de café, de cacao, de fruits, de sucre, de tabac et de vin s'élevait à 619,8 milliards \$ (en dollars amér. de 1997), et que 65 % de cette production provenait des pays en développement<sup>12</sup>. Une estimation des économies de coûts pour l'agriculture pouvant être réalisées si la couche d'ozone s'appauvrit moins est présentée plus loin.

Les effets sur les forêts sont moins bien connus. Les résultats d'études sur des pins croissant dans des zones moyennement tempérées et à des latitudes moyennes portent à croire que la réduction de la biomasse est inversement proportionnelle à l'exposition aux rayons UV-B. Comme ces effets peuvent être cumulatifs à la longue, même une augmentation relativement faible de l'intensité des rayons UV-B pourrait avoir un effet important sur

11 A.H. Teramura, J.H. Sullivan et J. Lydon, «Effects of UV-B Radiation on Soybean Yield and Seed Quality: A Six-Year Field Study», *Physiology of Plants*, vol. 80 (1990), p. 5-11.

12 Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, *Commodity Review and Outlook 1994-1995*, 1994.

la durée de vie d'un arbre.<sup>13</sup> Les données des Nations Unies indiquent que, en 1994, la valeur de la production mondiale de bois rond, de sciages, de panneaux de bois, de pâtes, de papier et de carton s'élevait à 1,278 milliards \$ (en dollars amér. de 1997)<sup>14</sup>. En raison de l'incertitude que comportent les effets possibles sur les arbres de l'appauvrissement de la couche d'ozone, les économies que pourrait réaliser l'industrie forestière à la suite de l'atténuation de cet appauvrissement n'ont pas été quantifiées.

### Écosystèmes aquatiques

Il ne fait aucun doute que le rayonnement UV-B endommage les écosystèmes aquatiques, mais seule une estimation approximative de l'ampleur de ces dommages a pu être faite jusqu'à présent.

Plusieurs études ont porté sur les micro-organismes, comme le phytoplancton, qui constituent l'essentiel du réseau trophique dans les océans. Les résultats des recherches sur le phytoplancton, principalement dans l'Antarctique, ont indiqué que le rayonnement UV-B a un effet sur la productivité. De récentes études ont montré que, dans la région de l'Antarctique au-dessus de laquelle il existe un trou dans la couche d'ozone, la production de phytoplancton a diminué de 0 % à 12 % comparativement aux conditions normales d'exposition aux rayons UV-B.<sup>15</sup> D'après Lubin et Holm-Hansen, l'appauvrissement accru de la couche d'ozone au dessus de la zone méridionale de l'océan Antarctique a eu pour effet global une diminution de 0,5 % de la production annuelle de phytoplancton<sup>16</sup>. C'est à une profondeur de 10 à 15 mètres sous la surface de l'océan que certains poissons passent leurs premiers stades larvaires, et l'accroissement du rayonnement UV peut entraîner une augmentation des mortalités<sup>17</sup>.

Il est à craindre que l'intensification des rayons solaires UV-B n'ait un effet préjudiciable sur les poissons, les crustacés et les mollusques d'intérêt commercial, indirectement en raison des effets sur les éléments essentiels du réseau trophique, les micro-organismes marins, ou directement en raison de la déficience du développement des larves ou des juvéniles.

L'accroissement des niveaux de rayonnement UV-B dû à l'appauvrissement de la couche d'ozone pourrait donc avoir d'importantes répercussions sur l'industrie de la pêche. Les prises mondiales de poisson en 1993 étaient de 85,4 millions de tonnes, d'une valeur de 91,9 milliards \$ (en dollars amér. de 1997)<sup>18</sup>. Les estimations de la valeur des effets sur les organismes marins sont discutées plus loin.

### Effets sur les matériaux

Les polymères synthétiques et certains matériaux naturels d'intérêt commercial sont endommagés par les rayons UV-B. Les matériaux, notamment les plastiques, qui sont régulièrement exposés à la lumière solaire, se détériorent, ce qui limite leur durée de vie utile. La photodégradation des plastiques occasionne leur décoloration, leur fendillage ainsi que la réduction de leur résistance à la traction et de leur résilience. L'intensité du rayonnement UV-B résultant de l'appauvrissement de la couche d'ozone pourrait donc avoir un effet important sur les matériaux. Pour atténuer cet effet, un plus grand nombre de matériaux photostabilisants ou résistants aux rayons UV seront probablement utilisés, ce qui augmentera peut-être considérablement le coût des plastiques, de la peinture et d'autres matériaux servant à des applications extérieures. En 1994, la production mondiale de trois des principaux polymères, le polyéthylène, le polypropylène et le chlorure de polyvinyle, s'est élevée à 51,5 millions de tonnes, dont la valeur a été estimée à 59,6 milliards \$ en dollars amér. de 1997<sup>19</sup>. Des chiffres sur les économies possibles de matériaux résultant de l'atténuation de l'appauvrissement de la couche d'ozone sont présentés dans la section suivante.

### VALEUR DES EFFETS NON SANITAIRES

La valeur des effets non sanitaires du Protocole de Montréal est incertaine. Il existe des estimations approximatives des avantages que comporte pour les États-Unis le Protocole de Montréal en ce qui concerne les écosystèmes aquatiques, l'agriculture et les matériaux. Il est encore impossible d'estimer quantitativement la valeur des effets sur les animaux et les forêts ainsi que d'autres effets possibles, comme l'atténuation du changement climatique.

13 J.H. Sullivan et A.H. Teramura, «The Effects of Ultraviolet-B Radiation on Loblolly Pine: Growth of Field-Grown Seedlings», *Trees*, vol. 6 (1992), p. 115-120.

14 Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, *Commodity Review and Outlook 1994 1995*, 1994.

15 Robert C. Worrest et Donat P. Hader, (1997), «Overview of the Effects of Increased Solar UV on Aquatic Microorganisms», dans «Invited Review of the Impacts of Solar UVR on Aquatic Microorganisms», *Photochemistry and Photobiology*, vol. 65(2), p. 258.

16 Dan Lubin et Osmund Holm-Hansen, (1995), «Atmospheric Ozone and the Biological Impact of Solar Ultraviolet Radiation», *Encyclopedia of Environmental Biology*, vol. 1, p. 164.

17 Ibid., p. 165.

18 Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, *Fishery Statistics: Commodities*, vol. 77, (1993) p. 418.

19 Les données sur la production proviennent de la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe, *The Chemical Industry in 1994: Annual Review, 1995*. Les prix ont été calculés d'après les données sur l'importation pour les produits de polymérisation (code international CAE 583) contenues dans *L'Annuaire statistique du commerce international pour 1993* des Nations Unies.

**TABEAU II-13 Valeur actuelle des effets non sanitaires, en milliards de dollars amér. de 1997, pour la période de 1987 à 2060 (taux d'actualisation de 5 %)**

| Indicateur  |                       |      | Production des États-Unis, en % de la production mondiale |  |  | Avantages supplémentaires pour les États-Unis |      |       | Avantages supplémentaires pour le monde |       |       |
|-------------|-----------------------|------|-----------------------------------------------------------|--|--|-----------------------------------------------|------|-------|-----------------------------------------|-------|-------|
|             |                       |      |                                                           |  |  | Min.                                          | Moy. | Max.  | Min.                                    | Moy.  | Max.  |
| Pêcheries   | Prises mondiales      | 6 %  |                                                           |  |  | 7,2                                           | 14,3 | 28,6  | 119,2                                   | 238,3 | 476,6 |
| Agriculture | Production céréalière | 18 % |                                                           |  |  | 17,2                                          | 34,4 | 68,8  | 95,5                                    | 190,9 | 381,8 |
| Matériaux   | Production de CPV     | 25 % |                                                           |  |  | 3,8                                           | 7,5  | 15,0  | 15,0                                    | 30,0  | 60,0  |
| Total       |                       |      |                                                           |  |  | 28,2                                          | 56,2 | 112,4 | 229,7                                   | 459,3 | 918,4 |

Source : Chiffres de la firme ARC fondés sur les données concernant les avantages provenant de l'étude d'impact de la réglementation réalisée par l'EPA en 1992, et les données des Nations Unies sur l'industrie de la pêche, de l'agriculture et du plastique.

Les chiffres fournis par l'Environmental Protection Agency (EPA) des États-Unis ont été extrapolés pour les écosystèmes aquatiques, l'agriculture et les matériaux afin de déterminer l'ampleur possible de ces effets à l'échelle mondiale<sup>20</sup>. Les avantages supplémentaires pour les États-Unis ont d'abord été convertis en dollars de 1997, puis extrapolés pour obtenir des valeurs mondiales compte tenu du pourcentage de la production des industries américaines touchées (les pêcheries, l'agriculture et les plastiques) par rapport à la production mondiale. Il est à noter que l'étude de l'EPA est fondée sur des effets estimés sur les pêcheries beaucoup plus considérables que les dernières recherches concernant les effets sur la production de phytoplancton ne l'indiquent. Par conséquent, les chiffres ici présentés, qui sont fondés sur les données de l'EPA, devraient être considérés comme les valeurs maximales des effets potentiels sur les pêcheries.

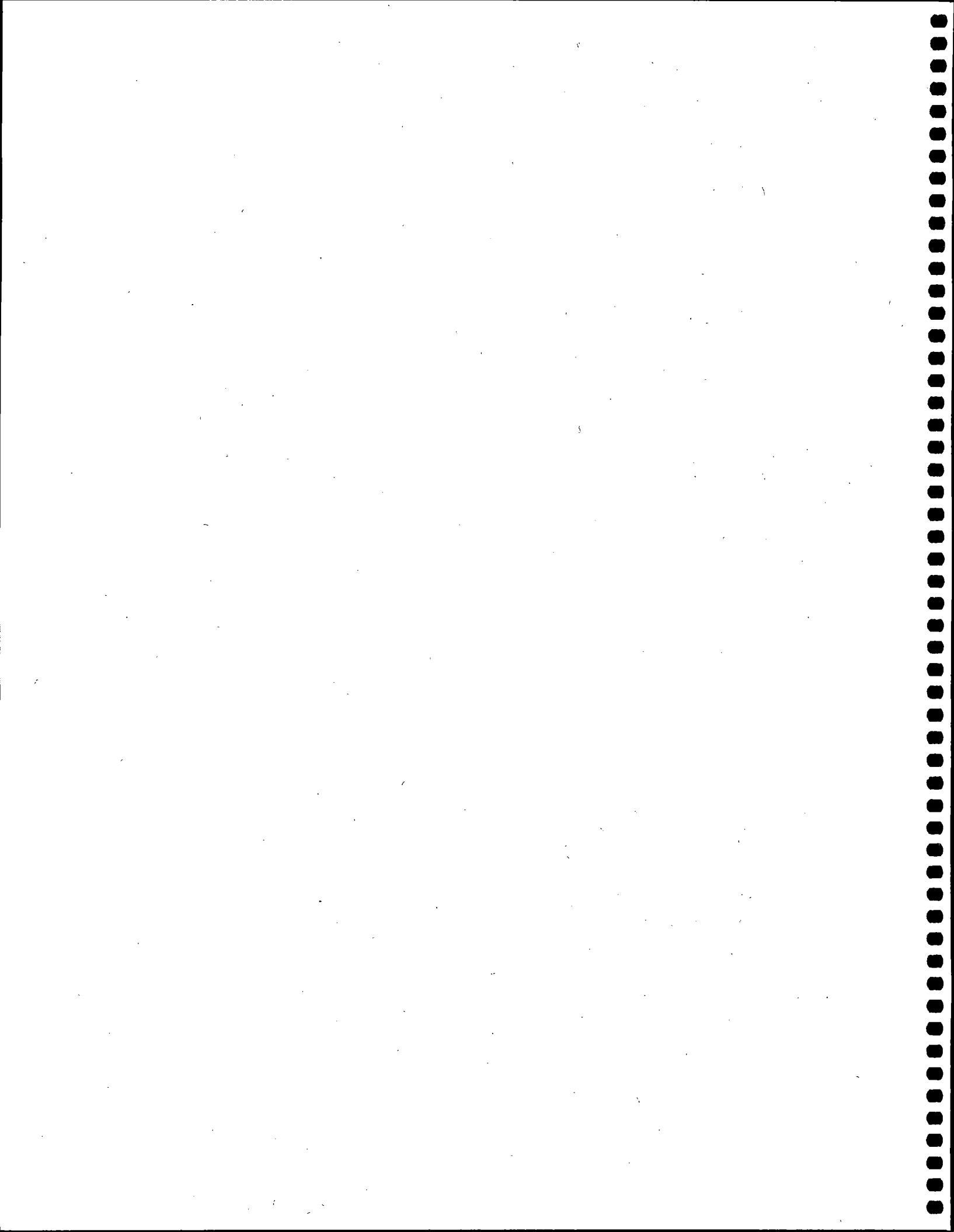
Les données américaines sont présentées dans l'étude d'impact de la réglementation pour le 1990 Clean Air Act Amendment. Ces chiffres comparent deux scénarios : celui ne comportant aucune réglementation, et le scénario du Clean Air Act dans lequel les États-Unis se conforment aux dispositions de cette loi tandis que le reste du monde respecte la modification de Londres au Protocole de Montréal. Les avantages mentionnés dans l'étude américaine valent pour la période de 1985 à 2075 (c'est-à-dire, cinq ans de plus que la période maximale d'analyse dont il est question dans le présent rapport). Il est à noter que, dans le scénario du Clean Air Act, les mesures de réglementation sont moins rigoureuses que celles de la modification de Vienne (en 1995) au Protocole de Montréal qui ont servi à l'analyse

présentée ailleurs dans le présent document. Les données américaines sur les avantages ont été ajustées pour la période de 1987 à 2060, les années critiques étant 2050 et 2070. Des taux d'actualisation (3 %, 5 % et 7 %) différents de ceux des États-Unis (2 %) ont aussi été utilisés.

Le tableau II-13 indique les valeurs minimales et maximales des intervalles de variation pour les avantages, fondées sur les valeurs présentées dans l'étude américaine et actualisées au taux de base de 5 %. Les avantages à un taux d'actualisation de 3 % et de 7 % sont aussi pris en compte. Il est à noter que toutes ces estimations comportent beaucoup d'incertitude. Ces chiffres ont pour seul but de donner une idée générale de l'ampleur potentielle des effets non sanitaires résultant des mesures de réglementation du Protocole de Montréal.

Ce tableau montre que les avantages mondiaux totaux pour les pêcheries, l'agriculture et les matériaux varient entre 229,7 et 918,4 milliards \$. Dans le scénario de référence, ces avantages seraient de 459,3 milliards \$. C'est la diminution des dommages aux pêcheries qui occasionnerait les plus importants effets non sanitaires, tandis que les effets réduits sur les matériaux rapporteraient le moins à la société planétaire. Il est toutefois à noter que cette étude tient compte seulement de la valeur des produits en CPV déterminée par l'industrie de la construction (comme c'est le cas pour l'étude d'impact de la réglementation réalisée aux États-Unis).

<sup>20</sup> U.S. Environmental Protection Agency, Regulatory Impact Analysis : Compliance with Section 604 of the Clean Air Act for the Phaseout of Ozone Depleting Chemicals, 1992. Préparé pour cette organisation par ICF Incorporated, juillet 1992.



# Coûts de remplacement des substances appauvrissant la couche d'ozone

## VUE D'ENSEMBLE ET MÉTHODES EMPLOYÉES

Les méthodes employées pour déterminer les coûts de la mise en œuvre du Protocole de Montréal sont axées sur les coûts économiques des mesures de réglementation qui ont été adoptées. Dans les publications économiques, on parle souvent de la détermination des coûts réels des ressources de la politique.

Par exemple, dans le cas des services de réfrigération et de climatisation, l'hypothèse selon laquelle une quantité constante de ces services sera fournie est avancée, c'est-à-dire que le prix n'a aucun effet sur cette quantité. Avant la réglementation, les CFC servaient de frigorigènes dans tout ce secteur, mais en raison de l'adoption du Protocole de Montréal, un certain nombre de changements sont apportés en vue de la réduction et de l'élimination subséquente des CFC. Le coût économique de cette réglementation est la différence des coûts de production de ces extrants avant et après l'adoption de la réglementation.

Dans cette méthode, les coûts réels importants des ressources sont la quantité additionnelle de ressources nécessaires pour produire cette quantité constante d'extrants. Les autres coûts pouvant être encourus par le secteur privé ne sont pas pris en compte dans les coûts économiques susmentionnés. Par exemple, si le prix des CFC augmente en raison de restrictions réglementaires sur leur quantité, certains consommateurs du secteur privé l'enregistreront comme un coût supplémentaire. Toutefois, il ne s'agit pas d'un coût économique, parce qu'aucune ressource d'intrant supplémentaire n'a été nécessaire pour produire cet extrant. D'un point de vue un peu différent, la hausse du prix n'est pas un coût économique parce que les coûts supplémentaires pour les acheteurs sont exactement compensés par les revenus supplémentaires des producteurs.

Dans tout scénario de réglementation, l'on s'attendrait à constater l'effet du coût réel des ressources et des effets de prix dont il vient d'être question. Pour les économistes, les effets de prix sont des transferts parce qu'ils comportent des transferts d'un groupe de la société à un autre. Dans le cas présent, il s'agit d'un transfert des consommateurs aux producteurs de CFC.

Comme les coûts économiques excluent les transferts, ils comprennent principalement les coûts réels supplémentaires des ressources nécessaires à la mise en œuvre de la réglementation.

Dans cette méthode de calcul des coûts, le fait que certaines entreprises continuent d'utiliser des CFC sans modifier leur procédé de production n'entraîne aucun coût supplémentaire. Ces entreprises peuvent payer davantage pour les CFC, mais il ne s'agit pas d'un coût réel des ressources pour la société. L'exemple le plus patent de coûts est celui dans lequel une entreprise utilise un nouveau frigorigène contenant un HCFC ou un HFC. Il se peut que le frigorigène lui-même coûte plus cher et que le changement comporte aussi des modifications du système ou du procédé. S'il y a des coûts d'immobilisations, ils doivent être amortis pendant la durée de vie de l'équipement et, de cette façon, ils sont répartis entre les divers utilisateurs ultimes, actuels et futurs. Par conséquent, les entreprises qui remplacent les CFC encourront des coûts supplémentaires qui doivent être mesurés. D'autres entreprises peuvent tenter de réduire leur consommation de CFC par unité d'extrant, et d'autres, de recycler ou encore de récupérer les CFC utilisés. Tous ces ajustements comportent des coûts économiques.

Le présent chapitre porte sur l'estimation des coûts économiques entraînés par le remplacement des substances appauvrissant la couche d'ozone (SACO) et indique aussi les tendances des coûts avec le temps. Au tout début, un grand nombre d'entreprises qui ont modifié leurs procédés pour réduire leur consommation de CFC n'ont pu mettre à profit les renseignements qui, plus tard, leur auraient permis de prendre des décisions. Dans le domaine de l'électronique, par exemple, certaines des méthodes initialement mises au point pour réduire et recycler les substances rejetées dans l'environnement étaient coûteuses et ont été remplacées par des solutions plus économiques. L'estimation des coûts remonte au début des années 80. Vers la fin de cette décennie, bon nombre d'analystes ont fait des estimations en se fondant principalement sur les chiffres provenant de sources industrielles. Les tendances des coûts estimés ont aussi été examinées dans divers documents du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), ce qui porte à croire que les estimations originales exagéraient en général les coûts réels d'adaptation. La comparaison des

estimations de coûts à jour ici présentées avec celles mentionnées dans des études antérieures pour divers pays parties au Protocole peut montrer dans quelle mesure les coûts actuels et initiaux diffèrent.

Cette méthode de calcul des coûts comporte les étapes suivantes :

- Relever les solutions de remplacement (A) et les modifications apportées par les entreprises dans un secteur en particulier comme la réfrigération et la climatisation ( $A_1, A_2, \dots, A_n$ ).
- Déterminer le coût par kilogramme des CFC ( $CA_1, CA_2, \dots, CA_n$ ) remplacés à la suite de chacune de ces modifications.
- Déterminer le nombre de kilogrammes de CFC remplacés annuellement dans ce secteur à la suite de chacun de ces ajustements ( $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ ).
- Calculer les coûts totaux pour le secteur ( $CA_1 * Q_1 + CA_2 * Q_2 + \dots + CA_n * Q_n$ ).

Dans le modèle original de calcul des coûts utilisé par l'Environmental Protection Agency des États-Unis, une variante de cette méthode désagrégée a été employée. L'EPA a établi un scénario pour les augmentations de prix des CFC, puis déterminé les «prix d'intervention» auxquels les différentes modifications seraient apportées. Un coût par kilogramme a été calculé pour chacune de ces modifications. Cette méthode consiste à prendre en considération les données accumulées sur les véritables coûts d'adaptation et les connaissances techniques de l'industrie qui lui ont permis de réussir à éliminer complètement les CFC pour calculer les coûts par kilogramme remplacé.

Par conséquent :

- Pour chaque secteur (comme celui de la réfrigération et de la climatisation), les données publiées et les chiffres de l'industrie ont été utilisés pour calculer les coûts par kilogramme entraînés par la réduction de la consommation annuelle de CFC.
- Les coûts par kilogramme ont été multipliés par le nombre de kilogrammes remplacés chaque année à compter de l'adoption du Protocole en 1987 jusqu'en 2060 afin d'obtenir les coûts totaux pour le secteur.
- La différence entre la consommation réelle du secteur pour une année donnée et la consommation estimée en l'absence de mesures de réglementation équivaut au nombre de kilogrammes remplacés.

- Les coûts futurs ont été estimés en presumant que le coût moyen par kilogramme pouvait valoir pour l'avenir.

Pour les pays visés au paragraphe 5(1), la méthode d'estimation des coûts est quelque peu différente. Le Groupe d'évaluation technique et économique du PNUE, le GETE, a publié en 1996 dans son *Rapport sur le réapprovisionnement* des estimations de coûts pour ces pays. Toutefois, ces chiffres étaient fondés sur les coûts supplémentaires des projets pour lesquels les pays visés au paragraphe 5(1) demandaient une aide financière du Fonds multilatéral. Le GETE n'avait pas pour but que ses chiffres, quoique représentatifs des coûts de ces projets, soient considérés comme une moyenne de tous les coûts de remplacement dans les pays visés au paragraphe 5(1).

Dans le cas d'un certain nombre de ces pays, les multinationales y faisant affaire ont été responsables d'une partie de la consommation de SACO. Leurs activités ne pouvaient être financées par le Fonds multilatéral, et leurs coûts de remplacement auraient dû être à peu près comparables à ceux calculés pour les pays industrialisés. En électronique, par exemple, le CFC-113 et le méthylchloroforme ont été largement utilisés, surtout par les grandes sociétés. Leurs coûts devraient être plus faibles que ceux des petites et moyennes entreprises (PME). En outre, certaines stratégies de réduction, comme les pratiques de conservation et d'utilisation plus efficace, pourraient être transférées assez facilement des pays industrialisés aux utilisateurs des pays en développement.

Ce qui précède porte à croire que l'éventail des coûts dans les pays en développement devrait probablement être plus large que celui dans les pays industrialisés. Il pourrait aller des coûts pour ces derniers pays aux coûts supplémentaires maximums mentionnés dans le *Rapport du GETE sur le réapprovisionnement*. Ces coûts plus élevés témoignent des problèmes de remplacement que connaissent bon nombre de PME dans les localités très dispersées. Par conséquent, la formule adoptée pour les pays visés au paragraphe 5(1) consiste à utiliser, pour chaque domaine d'application, un coût moyen par kilogramme qui reflète le prix de revient effectif de divers consommateurs de substances appauvrissant la couche d'ozone. Les sections du présent rapport qui traitent de cette question indiquent la valeur supérieure des coûts supplémentaires et le coût moyen par kilogramme pour les pays en développement.

Les paramètres utilisés pour calculer les coûts dans les pays industrialisés et les pays en développement sont mentionnés à l'annexe B.

**TABLEAU III-1 Consommation mondiale de substances appauvrissant la couche d'ozone (1986)**

| SACO                                                                                                     | PACO moyen | Pays industrialisés | Pays visés au paragraphe 5(1) | Nombre total de kilotonnes | Nombre total d'unités PACO |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| CFC                                                                                                      | 0,95       | 1 010,0             | 111,0                         | 1 121,0                    | 1 065,0                    |
| HCFC                                                                                                     | 0,05       | 169,9               | 13,4                          | 183,3                      | 9,2                        |
| Halons 1211                                                                                              | 3,00       | 11,0                | 2,7                           | 13,7                       | 41,1                       |
| 1301                                                                                                     | 10,00      | 9,9                 | 1,2                           | 11,1                       | 111,0                      |
| 2402                                                                                                     | 6,00       | 10,2                | s.o.                          | 10,2                       | 61,2                       |
| Méthylchloroforme                                                                                        | 0,11       | 581,6               | 27,4                          | 609,0                      | 67,0                       |
| Tétrachlorure de carbone<br>(Utilisations autres que comme matière première et produisant des émissions) | 1,10       | 92,2                | 4,4                           | 96,6                       | 106,3                      |
| Bromure de méthyle                                                                                       | 0,60       | 42,6                | 10,8                          | 53,4                       | 32,0                       |
| <b>TOTAL (kt)</b>                                                                                        |            | <b>1 927,4</b>      | <b>170,9</b>                  | <b>2 098,3</b>             | <b>1 492,8</b>             |

Source : Chiffres de la firme ARC fondés sur des données provenant de l'Environmental Protection Agency des États-Unis et du PNUE. Il est à noter que de faibles quantités de halon 2402 ont été utilisées dans certains pays visés au paragraphe 5(1).

## CONSUMMATION MONDIALE DE SUBSTANCES APPAUVRISANT LA COUCHE D'OZONE

Le tableau III-1 présente des données de référence sur la consommation mondiale de toutes les substances appauvrissant la couche d'ozone qui sont réglementées par le Protocole de Montréal. Dans les sections suivantes, les données sur la consommation réelle par substance ainsi que les estimations de la consommation dans le scénario ne comportant aucune réglementation servent à calculer les coûts totaux des mesures de réglementation du Protocole de Montréal.

## COÛTS DE REMPLACEMENT DES CFC

### Aérosols

Voici une estimation du coût des mesures de réglementation du Protocole de Montréal relatives à l'utilisation de CFC dans les aérosols pour les pays industrialisés et ceux visés au paragraphe 5(1).

Avant la mise en œuvre du Protocole, l'interdiction de certaines utilisations des CFC dans les aérosols, entrée en vigueur en 1979, a donné lieu à d'importantes réductions de ces substances au Canada, aux États-Unis et dans quelques pays européens. À la suite de la mise en application des mesures de réglementation du Protocole de Montréal, la consommation a diminué régulièrement dans la plupart des pays industrialisés, et les aérosols contenant des CFC servent maintenant seulement

pour des utilisations essentielles, surtout dans le domaine médical.

Pour la période de 1986 à 1995, la consommation de substances appauvrissant la couche d'ozone pour la fabrication d'aérosols est fondée sur les chiffres fournis dans le rapport de 1994 du Comité des options techniques pour les aérosols, les stérilisants, les utilisations diverses et le tétrachlorure de carbone. La consommation prévue en l'absence de mesures de réglementation a été estimée d'après la croissance observée et probable du marché des aérosols en général. Il s'agit d'un marché essentiellement établi dont la croissance sera plus lente que celle du produit intérieur brut (PIB). Pour les pays industrialisés, un taux de croissance général de 1 % par année a été utilisé dans le scénario ne comportant aucune mesure de réglementation et, dans le cas des pays visés au paragraphe 5(1), on a présumé qu'il serait de 10 % jusqu'en 2005, et de 5 % par la suite. Dans le scénario du Protocole de Montréal, une faible quantité de CFC est encore utilisée pour certaines applications essentielles, surtout dans le domaine médical, et des produits de remplacement commencent seulement à être mis sur le marché. L'on présume que cette quantité diminuera à zéro d'ici 2010, alors que l'utilisation de CFC pour ces applications cessera obligatoirement.

Dans les pays industrialisés, l'utilisation d'hydrocarbures comme produits de remplacement des CFC a occasionné une forte diminution, allant dans certains cas jusqu'à 80 %, du coût des agents propulseurs pour les aérosols. Dans l'ensemble,

l'estimation ici présentée est fondée sur une économie de deux tiers des coûts pour tous les aérosols touchés. Cette économie représente une différence négative entre les coûts pour chaque année de la période d'analyse, qui s'étend jusqu'à 2060. Il est présumé que les pompes et d'autres produits de remplacement des SACO permettront de réaliser des économies de coûts comparables.

Les principales sources de coûts supplémentaires résultant du remplacement des CFC par des hydrocarbures dans les aérosols étaient les suivantes :

- La modification des extincteurs automatiques et des ventilateurs dans les fabriques et les entrepôts, et l'espace supplémentaire nécessaire pour stocker séparément les matériaux inflammables dans les fabriques d'aérosols.
- La R-D pour les nouvelles formulations.
- Les changements dans les étiquettes.
- Les nouveaux permis.

Il s'agit là de coûts uniques. Exception faite du changement dans le coût des matériaux, il ne semble y avoir eu aucun effet sur les coûts de fonctionnement. D'après les renseignements obtenus de l'industrie, à la suite de mesures convenables de protection contre l'incendie, les primes d'assurance n'ont pas augmenté pour la peine. Quant aux bombes aérosols, il n'a pas été nécessaire de les changer.

Par conséquent, le total des coûts uniques dans les pays industrialisés pour la R-D et les autres postes susmentionnés sera plus que compensé par les économies de coût de fonctionnement résultant de la diminution du prix des agents propulseurs. Les économies réelles dues au remplacement des CFC ont été estimées à 0,88 \$ par kilogramme, c'est-à-dire que la valeur actuelle du coût réduit des agents propulseurs excède celle des coûts entraînés par l'utilisation d'hydrocarbures et d'autres produits de remplacement dans les pays industrialisés.

La facilité relative et le faible coût de remplacement des CFC par des hydrocarbures, notamment dans les pays industrialisés, sont étroitement reliés à l'interdiction imposée par de nombreux pays, vers la fin de années 70 et au début des années 80, sur l'utilisation des CFC comme agents propulseurs. Cette interdiction a permis de réduire les quantités de CFC qui devaient être remplacées conformément au Protocole de Montréal, mais surtout d'acquérir de bonnes connaissances techniques concernant l'utilisation d'hydrocarbures plutôt que de CFC comme agents propulseurs.

C'est dans le cas des inhalateurs doseurs (ID) utilisant des aérosols que le remplacement graduel des CFC a été le plus difficile. Bien que les quantités de CFC employées à cette fin dans le monde soient relativement faibles, cette application est essentielle, et d'importantes ressources ont été affectées à la mise au point de produits de remplacement. L'on présume ici que les coûts de mise au point et de mise à l'essai pour les ID totaliseront 2,5 milliards \$ amér. de 1997, ce qui compense certaines réductions de coûts pour d'autres domaines d'application des aérosols dans les pays industrialisés.

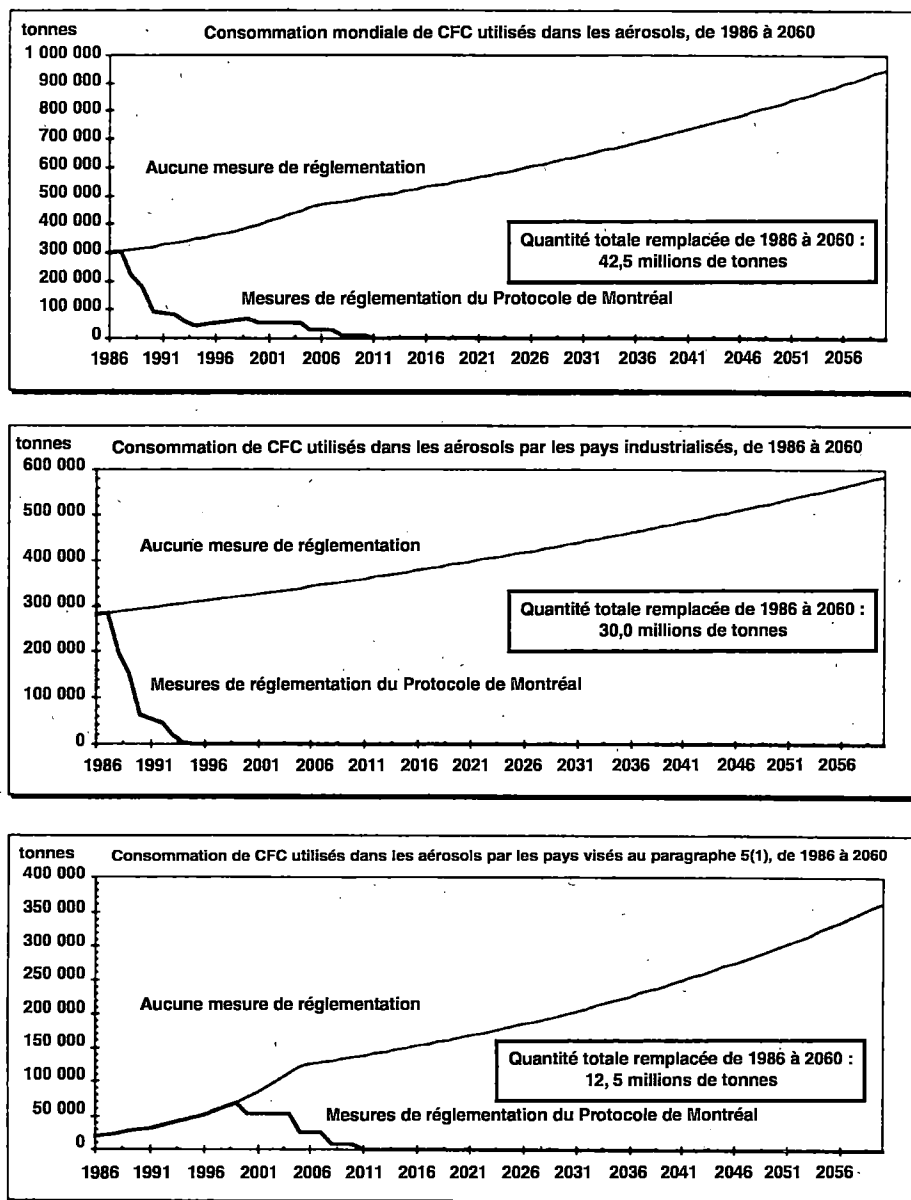
Pour les pays visés au paragraphe 5(1), le tableau est un peu différent. Bon nombre de ces pays peuvent avoir de la difficulté à se procurer des hydrocarbures et, en raison de la faible taille des entreprises, les coûts initiaux de remplacement seront plus onéreux. D'après ce que l'on sait, les coûts des mesures de réglementation pour les pays visés au paragraphe 5(1) varieront considérablement. Une réduction de 35 % de la consommation aura pour résultat les mêmes économies de coûts que celles indiquées pour les pays industrialisés, une autre du même ordre n'entraînera aucun coût supplémentaire, tandis que pour une réduction de 30 % de plus, le coût moyen sera de 2,68 \$ par kilogramme, tel qu'indiqué dans le *Rapport du GETE sur le réapprovisionnement* (1996). Dans l'ensemble, le coût par kilogramme sera de 0,50 \$.

En général, dans le cas des aérosols, la mise en œuvre du Protocole de Montréal permettra de réduire la consommation de CFC de 29,9 millions de tonnes dans les pays industrialisés, et de 12,5 millions dans les pays visés au paragraphe 5(1), pour la période de 1987 à 2060. La figure III-2 indique la consommation de CFC utilisés dans les aérosols pour le scénario du Protocole de Montréal et celui ne comportant aucune réglementation. Étant donné que le coût des agents propulseurs dans les pays industrialisés est plus faible, les coûts entraînés par le respect des exigences du Protocole se traduiront par des économies de coûts totales de 6,5 milliards \$. Ce chiffre a été calculé déduction faite des coûts de R-D pour les ID. Le coût d'adaptation dans les pays visés au paragraphe 5(1) est estimé à 1,2 milliard \$.

### Mousses souples et rigides

En 1986, la consommation de CFC par l'industrie de fabrication des mousses plastiques a considérablement varié, mais elle a été la plus forte pour les applications faisant appel au polyuréthane et au polystyrène.

**FIGURE III-2 Consommation de CFC utilisés dans les aérosols conformément au Protocole de Montréal et dans le scénario ne comportant aucune réglementation**



Source : Chiffres de la firme ARC fondés sur les données du PNUE.

La mousse de polyuréthane est produite à la suite d'une réaction chimique entre un polyol, un isocyanate et des agents gonflants. Dans certaines mousses, les alvéoles sont fermées et retiennent l'agent gonflant, tandis que dans d'autres, elles sont ouvertes, ce qui permet à l'agent gonflant de s'échapper. Utilisées dans divers produits, les mousses de polyuréthane peuvent être classées en trois catégories principales : les mousses rigides (à alvéoles fermées), les mousses souples (à alvéoles ouvertes) et les mousses à peau intégrée. Ces produits servent à fabriquer des matériaux isolants pour les bâtiments et les appareils ménagers, des coussins pour les meubles et les automobiles, des emballages pour la protection des produits de forte valeur, ainsi que des pare-chocs pour les voitures et des tableaux de bord.

La mousse de polystyrène extrudé est produite par fusion de la résine de polystyrène dans une extrudeuse et par injection d'un agent gonflant dans la résine à haute pression. Dispersé dans le polystyrène fondu, l'agent gonflant se volatilise lorsque le mélange sort de l'extrudeuse, ce qui fait mousser le plastique. Le polystyrène extrudé est produit sous deux formes différentes : la mousse en feuille, qui est ordinairement utilisée comme emballage jetable pour la restauration et comme emballage pour les produits, et la mousse en panneau, qui sert généralement de matériau isolant.

Les propriétés physiques et chimiques de l'agent gonflant ont un effet sur le traitement de la mousse dans la fabrication de même que sur les caractéristiques du produit obtenu, comme la densité et la durabilité. L'agent gonflant contribue à la capacité générale d'isolation du produit utilisé comme isolant thermique.

Dans le cas des mousses souples et rigides, voici une estimation de la consommation mondiale de CFC utilisés comme agents gonflants avant la mise en œuvre du Protocole de Montréal (Comité des options techniques du PNUE pour les mousses, 1994) :

|                                 |                          |
|---------------------------------|--------------------------|
| • Mousse de polyuréthane rigide | 149 000                  |
| • Mousse de polyuréthane souple | 60 400                   |
| • Mousse phénolique             | 1 400                    |
| • Mousse de polystyrène extrudé | 37 600                   |
| • Mousse de polyoléfine         | 19 000                   |
| Total                           | 267 400 (tonnes en 1986) |

Le CFC-11 a été l'agent gonflant auxiliaire, auquel on ajoutait parfois du chlorure de méthylène, utilisé dans la production de dalles de mousse de polyuréthane souple et de faible densité. Avant la mise en œuvre du Protocole de Montréal et même jusqu'en 1990, cette substance a été utilisée pour environ 25 % de la production mondiale de dalles de mousse souple. Afin de réduire l'utilisation du CFC-11 pour cette application, on l'a remplacé par des agents gonflants entièrement à l'eau pour les produits moulés, et par le chlorure de méthylène pour les dalles, et on a eu recours à d'autres moyens, y compris l'utilisation de nouveaux polyols, et de substances apparentées ainsi que de dioxyde de carbone liquide pour les dalles de mousse.

Pour les autres types de mousse, ce sont la mousse rigide de polyuréthane (agent gonflant : CFC-11) et la mousse de polystyrène extrudé (agent gonflant : le CFC-12) qui ont entraîné la plus forte consommation de CFC. Dans les pays industrialisés, tous les CFC ont en général été remplacés avant 1996. Les substances dont le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (PACO) est égal à zéro sont les produits de remplacement de choix pour certaines mousses rigides servant à l'isolation thermique. Toutefois, dans plusieurs marchés et pour certaines applications, l'utilisation de HCFC sera nécessaire pour ces mousses jusqu'à ce que l'efficacité des produits de remplacement ayant un PACO égal à zéro, à fort rendement énergétique ou possédant les propriétés nécessaires à la sécurité ne soit prouvée.

Ce sont surtout le HCFC-141b et le HCFC-142b qui ont été les produits de remplacement respectifs du CFC-11 et du CFC-12 comme agents gonflants. Si l'on inclut les coûts de mise au point et de mise à l'essai ainsi que les différences permanentes de coûts de fonctionnement, on estime qu'il en coûte 1,48 \$ par kilogramme pour remplacer le CFC-12 dans le polystyrène, et 2,01 \$ pour remplacer le CFC-11 dans le polyuréthane. Pour d'autres applications de la mousse de plastique, les coûts sont estimés à 2,00 \$ par kilogramme. Dans le cas des mousses souples, l'augmentation du coût de certains produits de remplacement a été compensée par une diminution pour d'autres. Par conséquent, aucun coût supplémentaire n'a été calculé pour ce secteur.

Pour tout le secteur des mousses, le coût moyen pondéré par kilogramme tient compte des coûts par kilogramme indiqués ci-dessus et des quantités utilisées pour chaque application, ce qui donne 1,48 \$ par kilogramme de quantité remplacée dans

les pays industrialisés. Dans le cas des pays visés au paragraphe 5(1), nous avons utilisé le coût par kilogramme mentionné dans le *Rapport du GETE sur le réapprovisionnement* (1996), soit 8,31 \$ pour 50 % de la production de mousse, et le chiffre de 1,48 \$ par kilogramme indiqué ci-dessus pour le reste de la production, ce qui donne dans l'ensemble 4,90 \$ par kilogramme.

L'estimation de la consommation mondiale annuelle a été fondée sur les données du rapport pour 1994-1995 du Comité des options techniques du GETE pour les mousses. Cette consommation a été répartie entre les pays industrialisés et ceux visés au paragraphe 5(1) à la lumière des chiffres fournis par la firme ARC Applied Research Consultants et est fondée sur les données de base relatives à la consommation provenant du Fonds multilatéral.

Les coûts mondiaux de remplacement des CFC dans le secteur des mousses sont estimés à 17,9 milliards \$. Quant aux coûts de remplacement des HCFC, ils sont indiqués plus loin. Les coûts mondiaux sont ventilés comme suit : 14,8 milliards \$ pour les pays industrialisés, et 3,1 milliards \$ pour les pays visés au paragraphe 5(1). Tous les coûts sont les valeurs actualisées présentes calculées pour la période de 1989 à 2060 et exprimées en dollars de 1997. La figure III-3 indique la consommation de CFC utilisés dans les mousses conformément au Protocole de Montréal et dans le scénario ne comportant aucune réglementation.

### Réfrigération et climatisation

Voici une estimation des coûts de mise en œuvre du Protocole de Montréal dans le secteur de la réfrigération et de la climatisation. Ce secteur comporte diverses applications qui, en grande majorité, utilisent des frigorigènes visés à court terme (les CFC) ou à moyen terme (les HCFC) par le Protocole de Montréal. Les coûts de remplacement des frigorigènes aux HCFC sont estimés dans une autre section du présent rapport.

Le Rapport de 1994 du Comité des options techniques du PNUE pour la réfrigération, la climatisation et les thermopompes présente un examen détaillé des différents sous-secteurs de la réfrigération et de la climatisation, des quantités de divers frigorigènes utilisés dans ces sous-secteurs ainsi que des solutions de remplacement des CFC et des HCFC, les deux principaux groupes de frigorigènes visés par le Protocole de Montréal.

Pour un certain nombre d'applications dans le secteur de la réfrigération et de la climatisation,

la mise en œuvre du Protocole comporte un processus en deux étapes. La première consiste à remplacer un CFC par un HCFC, et la deuxième, à remplacer un HCFC par un frigorigène dont le PACO est égal à zéro, habituellement un HFC. La présente section examine seulement les coûts de la première étape. Quant à ceux du remplacement des HCFC, ils seront estimés séparément.

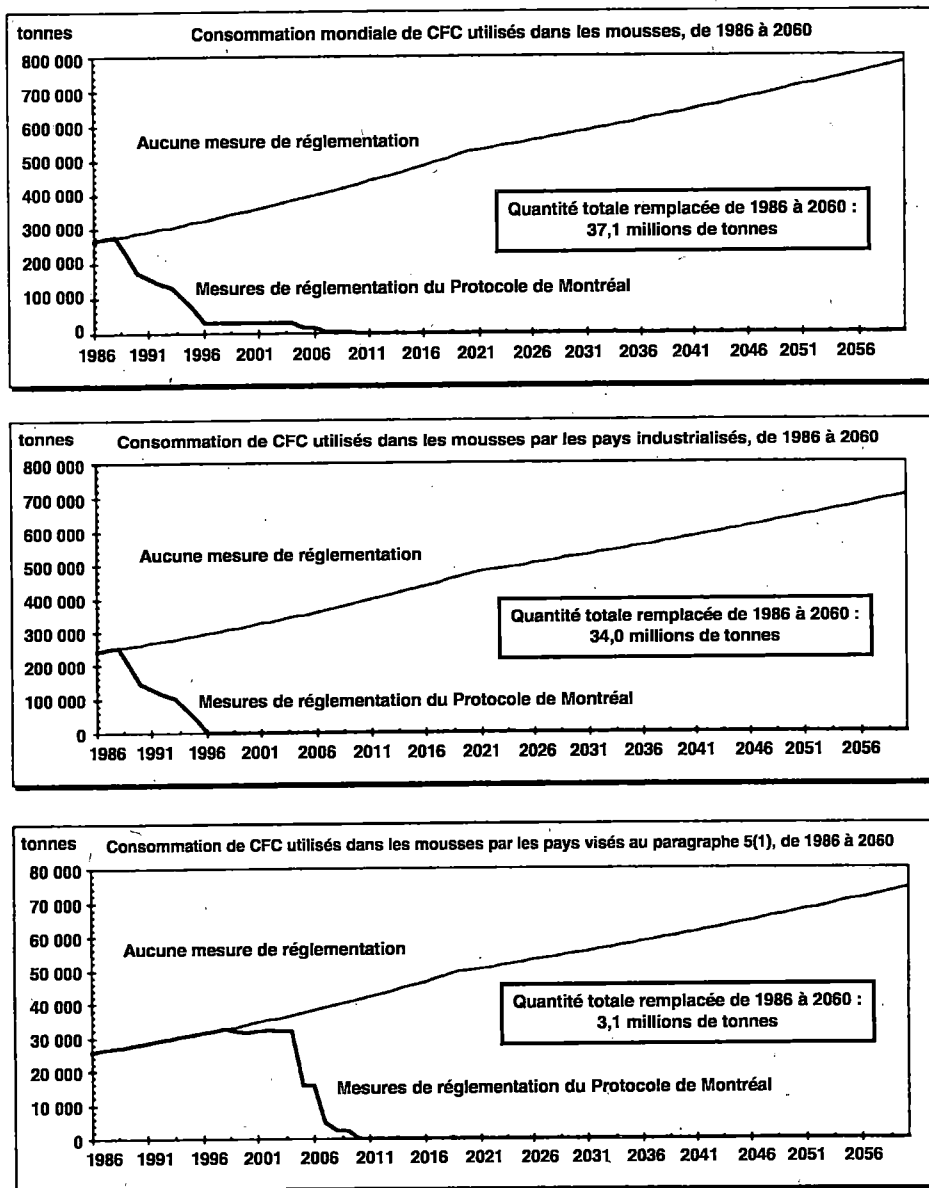
Le coût en dollars par kilogramme d'une SACO utilisée comme frigorigène qui est remplacée est un coût constant qui, multiplié par les kilogrammes économisés chaque année, donne des paiements dont la valeur nette actuelle est égale à celle de tous les coûts supplémentaires entraînés par la mise en œuvre du Protocole dans ce secteur. Ce coût est obtenu en divisant la valeur nette actuelle de tous les coûts supplémentaires par celle de la SACO utilisée comme frigorigène qui a été remplacée.

La méthode de calcul des coûts de remplacement des CFC dans le secteur de la réfrigération et de la climatisation donne un chiffre de 4,62 \$ par kilogramme pour les pays industrialisés.

Pour les pays visés au paragraphe 5(1), le *Rapport du GETE sur le réapprovisionnement* (1996) estime la valeur maximale du coût supplémentaire par kilogramme entraîné par le remplacement des CFC dans le secteur de la réfrigération et de la climatisation. Bon nombre de méthodes de réduction à faible coût, comme des techniques d'entretien améliorées, peuvent aussi être employées dans les pays visés au paragraphe 5(1). L'estimation globale des coûts ici présentée est fondée sur un coût moyen pondéré par kilogramme. Dans cette estimation, 60 % des frigorigènes utilisés sont remplacés au même coût que dans les pays industrialisés, 10 % à une fois et demie ce coût, et le reste, soit 30 %, au coût supplémentaire maximum de 15,61 \$ par kilogramme mentionné dans le Rapport du GETE (1996). Ces données permettent d'affirmer que les pays visés au paragraphe 5(1) doivent payer 8,15 \$ par kilogramme pour remplacer les CFC dans ce secteur.

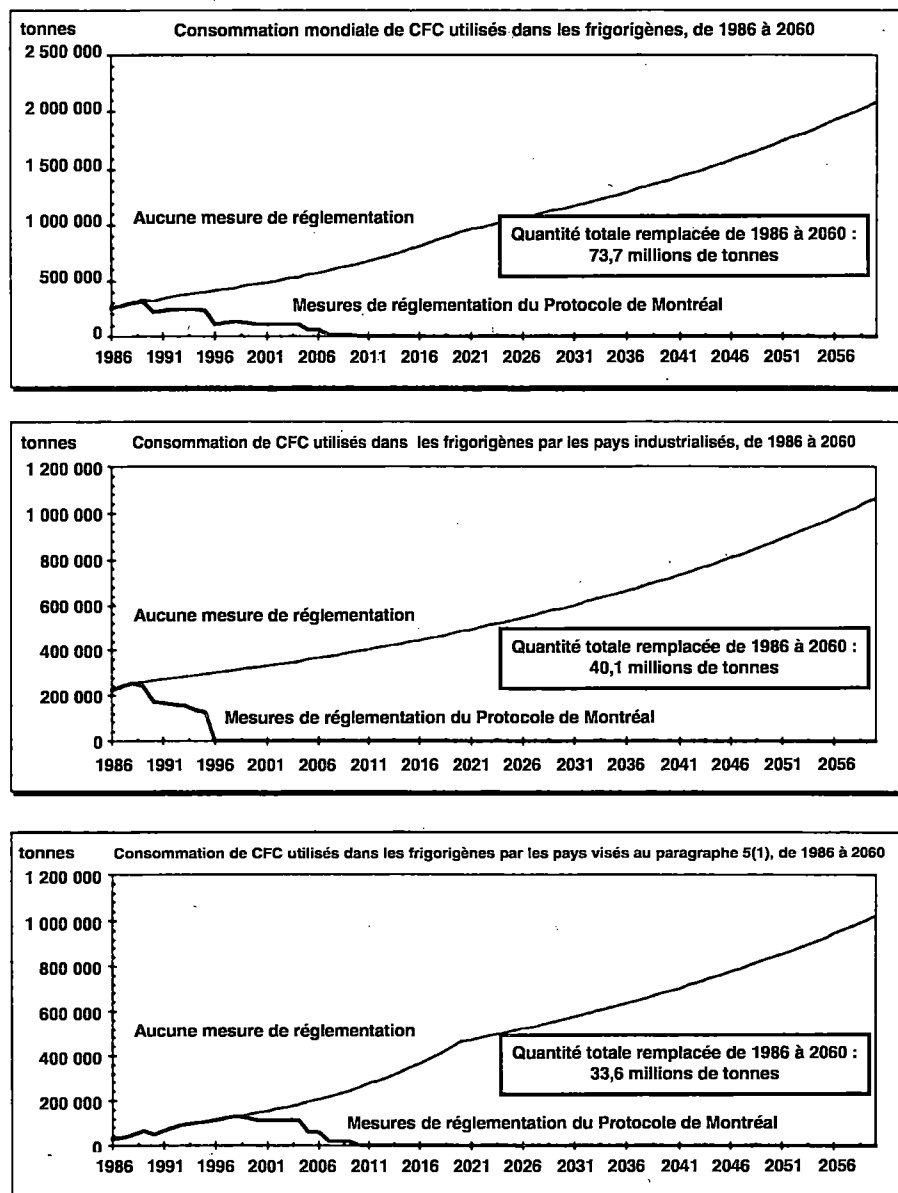
Les coûts totaux pour ce secteur sont fondés sur les coûts par kilogramme indiqués ci-dessus et sur la différence de consommation des frigorigènes aux CFC entre le scénario ne comportant aucune réglementation et celui du Protocole de Montréal. La figure III-4 indique la consommation de CFC utilisés dans les frigorigènes conformément au Protocole de Montréal et dans le scénario ne comportant aucune réglementation. Ces données montrent que les coûts mondiaux totaux de remplacement des frigorigènes aux CFC s'élèvent à 95,4 milliards \$. Ces coûts sont ventilés comme

**FIGURE III-3 Consommation de CFC utilisés dans les mousses conformément au Protocole de Montréal et dans le scénario ne comportant aucune réglementation**



Source : Chiffres de la firme ARC fondés sur les données du PNUE.

**FIGURE III-4 Consommation de CFC utilisés dans les frigorigènes conformément au Protocole de Montréal et dans le scénario ne comportant aucune réglementation**



Source : Chiffres de la firme ARC fondés sur les données du PNUE.

suit : 47,7 milliards \$ pour les pays industrialisés, et 47,7 milliards \$ pour les pays visés au paragraphe 5(1). Tous les coûts sont calculés comme la valeur actuelle pour la période de 1989 à 2060 et exprimés en dollars constants de 1997 pour un taux d'actualisation de 5 %.

## Solvants

L'utilisation comme solvant et pour des applications connexes du CFC-113 augmentait rapidement lorsque les mesures de réglementation du Protocole de Montréal ont été élaborées. (L'utilisation du méthylchloroforme et du tétrachlorure de carbone comme solvants dans diverses applications est discutée dans des sections distinctes du présent rapport.) La consommation accrue de CFC-113 témoignait de l'augmentation particulièrement marquée du nombre d'applications en électronique et de l'utilisation de cette substance plutôt que d'autres solvants dont les propriétés en matière d'inflammabilité ainsi que d'hygiène et de sécurité au travail n'étaient pas aussi désirables que celles du CFC-113. En 1986, la consommation mondiale de CFC-113 était de 176 200 tonnes, dont plus de 90 % dans les pays industrialisés. Toutefois, les chiffres publiés indiquent que cette consommation se serait considérablement accrue dans les pays industrialisés et ceux visés au paragraphe 5(1) en l'absence des mesures de réglementation du Protocole de Montréal. Sans ces mesures, la consommation aurait augmenté annuellement de 5 % dans tous les pays jusqu'en 2010, puis de 2 % par année jusqu'en 2060.

Divers produits ont été mis au point pour remplacer le CFC-113 utilisé dans les applications nécessitant un solvant. Ces applications comprennent l'enlèvement du flux de soudage en électronique, le nettoyage de précision, le nettoyage à froid, le dégraissage aux vapeurs et, dans une faible mesure, le nettoyage à sec. D'importants progrès ont été réalisés même dans les applications les plus difficiles, comme l'utilisation de carburants solides dans les moteurs d'accélération pour le programme spatial. Pour certaines applications essentielles, de faibles quantités de substances réglementées continuent d'être utilisées, même dans des pays industrialisés, en raison d'exemptions à cette fin et, dans certains cas, on fait appel aux stocks.

Dans les pays industrialisés et ceux visés au paragraphe 5(1), la distribution de la consommation de CFC-113 était très asymétrique. La consommation totale était attribuable à quelques utilisateurs importants, mais les petites et moyennes entreprises (PME) comptaient fréquemment des milliers

d'utilisateurs. Dans les pays visés au paragraphe 5(1) et ceux dont l'économie est en transition, les PME continuent d'utiliser le CFC-113 sur une grande échelle. Ces entreprises, en raison d'un manque de ressources techniques et financières, font face à des tensions de coûts occasionnées par le remplacement du CFC-113.

Les principaux moyens qui ont été employés pour éliminer le CFC-113 sont les suivants :

- Amélioration des pratiques de recyclage et de conservation.
- Réduction ou élimination des besoins en nettoyage.
- Utilisation de produits de nettoyage aqueux et semi-aqueux.
- Utilisation d'autres solvants chlorés.
- Utilisation de produits de remplacement non apparentés, comme les hydrocarbures et les terpènes.

Avant le Protocole de Montréal, la conservation et le recyclage n'avaient pas été pratiqués sur une grande échelle dans ce secteur, mais la situation a considérablement changé lorsqu'un grand nombre de sociétés importantes ont commencé à mettre l'accent sur l'élimination des substances appauvrissant la couche d'ozone dans leurs opérations. De fortes pressions ont été exercées sur les filiales et les fournisseurs afin qu'ils réduisent leur consommation de SACO beaucoup plus que ne l'exigeait le Protocole de Montréal.

Les coûts de ces moyens employés pour réduire la consommation sont difficiles à déterminer en raison de leur grande variété. Plusieurs importantes sociétés d'électronique ont fait état d'économies réelles de coûts résultant du remplacement du CFC-113. La mise au point de flux de soudage ne nécessitant aucun dégraissage est probablement l'exemple le plus patent d'économies de coûts. Des économies de l'ordre de 1,50 \$ par kilogramme de matériel qui aurait été utilisé en l'absence des mesures de réglementation du Protocole ont été signalées, et d'autres de ce genre peuvent être réalisées pour 25 % de la consommation totale.

Dans d'autres cas, les méthodes de conservation et les produits de remplacement à faible coût semblent avoir créé un segment de ce marché pour lequel les coûts de remplacement du CFC-113 étaient pratiquement nuls. Les chiffres ici présentés montrent que 25 % des produits commerciaux utilisés n'entraînent aucun coût supplémentaire. Pour 50 % des utilisations du CFC-113 dans ce secteur, il

existe divers produits de remplacement dont les coûts sont très différents. Les données provenant de sources industrielles ont permis de déterminer que le coût des autres utilisations est contrôlé à 3,00 \$ par kilogramme, ce qui donne un coût moyen pondéré de 1,13 \$ par kilogramme. Ce chiffre a été retenu pour les pays industrialisés.

Pour les pays visés au paragraphe 5(1), le coût par kilogramme pour les solvants mentionné dans le Rapport du GETE sur le réapprovisionnement (1996) a été utilisé comme valeur maximale des coûts supplémentaires. Les données ici présentées ont été pondérées par type de pays, ce qui a occasionné un coût supplémentaire maximal de 15,84 \$ par kilogramme. La politique des multinationales en matière de transfert technologique et l'amélioration des méthodes de conservation portent à croire que la moitié des ajustements devraient se faire au même coût que dans les pays industrialisés. Quant aux autres ajustements, dans une proportion de 40 %, leur coût est une fois et demie celui déterminé pour les pays industrialisés, et dans une proportion de 10 %, il équivaut à la valeur maximale du coût supplémentaire. Ces calculs donnent un coût global de 2,82 \$ par kilogramme pour les pays visés au paragraphe 5(1).

Les coûts totaux sont fondés sur les coûts par kilogramme et sur la différence de consommation de CFC-113 entre le scénario du Protocole de Montréal et celui ne comportant aucune réglementation. La figure III-5 illustre ces deux scénarios. D'après ces données, les coûts mondiaux pour ce secteur s'élèvent à 18,7 milliards \$, ce qui correspond à la valeur présente des coûts actualisée à un taux de 5 %, calculée pour la période de 1989 à 2060 et exprimée en dollars de 1997. Ces coûts comprennent 16,5 milliards \$ pour les pays industrialisés et 2,2 milliards \$ pour les pays visés au paragraphe 5(1).

### **Stérilisants**

Avant l'élaboration des mesures de réglementation du Protocole de Montréal, le CFC-12 était largement utilisé comme diluant de l'oxyde d'éthylène (OE) pour produire un gaz stérilisant employé par les hôpitaux et dans les entreprises de stérilisation commerciale. Pour cette application, la consommation mondiale de CFC-12 en 1989 s'est élevée à environ 23 000 tonnes, dont une très faible partie seulement a été utilisée dans des pays visés au paragraphe 5(1).

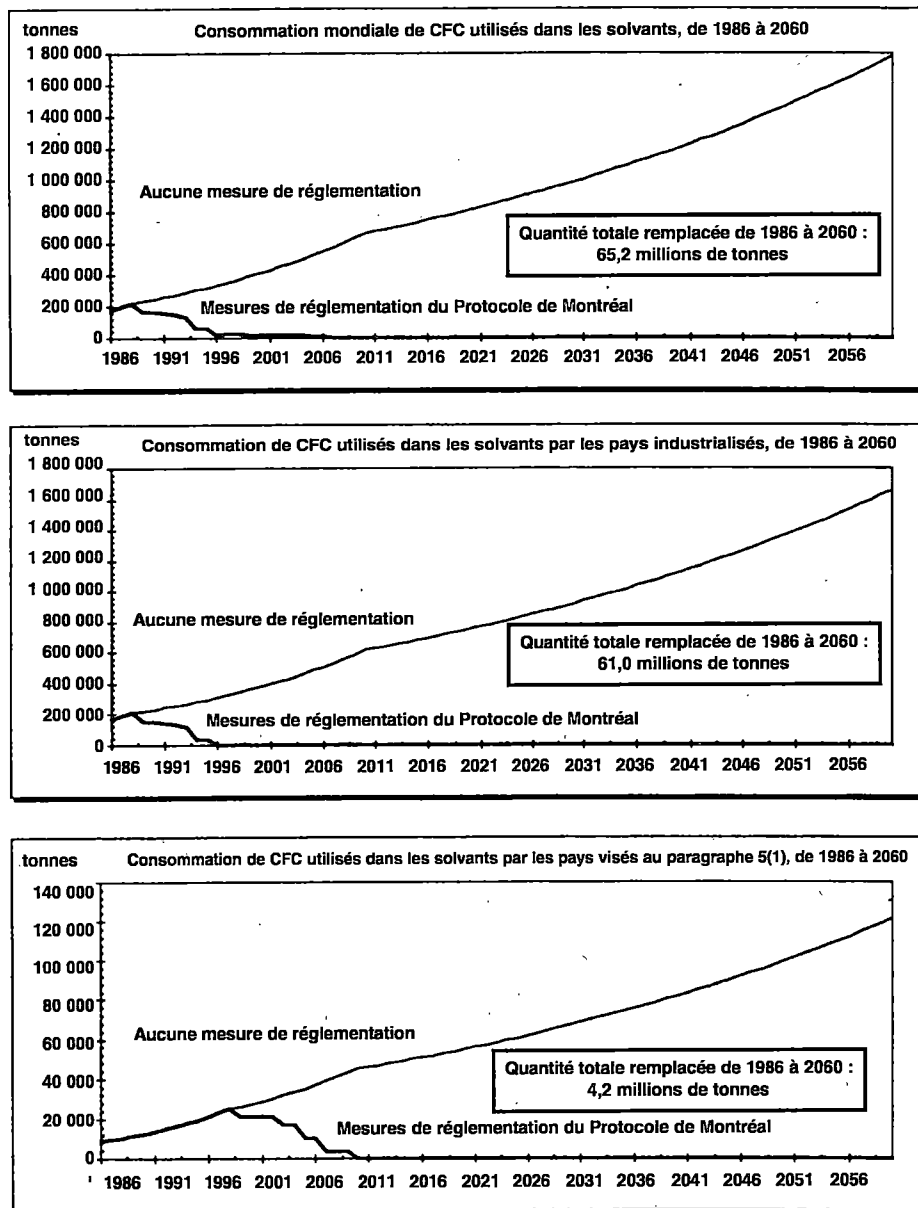
Le CFC-12 servait à réduire l'inflammabilité de l'OE. Le mélange, contenant 88 % de CFC-12 et 12 % d'OE, était rejeté dans l'environnement à la fin du cycle de stérilisation.

Pour réduire et ensuite éliminer la consommation de CFC-12 dans ce secteur, bon nombre de moyens entraînant des coûts différents ont été employés. Par exemple, la conservation a donné lieu à d'importantes réductions. Au lieu de faire fonctionner les stérilisateurs alors qu'ils étaient partiellement remplis, on a attendu qu'ils le soient entièrement. Le mélange 12/88 était particulièrement avantageux pour la stérilisation des dispositifs médicaux en chlorure de polyvinyle ou en polyéthylène qui fondaient ou se déformaient aux hautes températures de la stérilisation à la vapeur. En restreignant à ces dispositifs l'utilisation de ce mélange, on a réussi à réduire davantage la consommation de CFC-12. Les importantes entreprises de stérilisation commerciale ont réussi à trouver un produit consistant dans un mélange d'OE et d'azote afin d'éliminer complètement l'utilisation du CFC-12, et certains hôpitaux ont pu se servir de petits stérilisateurs utilisant de l'OE seulement. En outre, un produit de substitution a été mis au point afin de remplacer le CFC-12 par le HCFC-124 dans le mélange 12/88.

L'on peut donc voir que de nombreuses solutions de rechange entraînant divers coûts reliés aux mesures antipollution ont contribué à l'élimination de l'utilisation du CFC-12 comme gaz stérilisant. L'évaluation des coûts de remplacement du CFC-12 a été fondée sur un coût moyen pondéré par kilogramme tenant compte des différents coûts de chaque solution. Les méthodes de conservation et la stérilisation à la vapeur ont occasionné des réductions de coût parce qu'il n'a pas été nécessaire d'acheter la même quantité de CFC, dont le prix est élevé, et de produits de remplacement. L'utilisation d'OE par les entreprises de stérilisation travaillant à forfait et le remplacement du CFC-12 par le HCFC-124 ont entraîné des coûts importants. En 1986, par exemple, le coût du CFC-12 pour les stérilisateurs utilisant le mélange 12/88 était d'environ 1,50 \$ par kilogramme, tandis que celui du HCFC-124 était estimé à environ 12,00 \$ par kilogramme. Toutefois, l'on croit que le HCFC-124 a remplacé le CFC-12 dans seulement 15 % des utilisations de stérilisants.

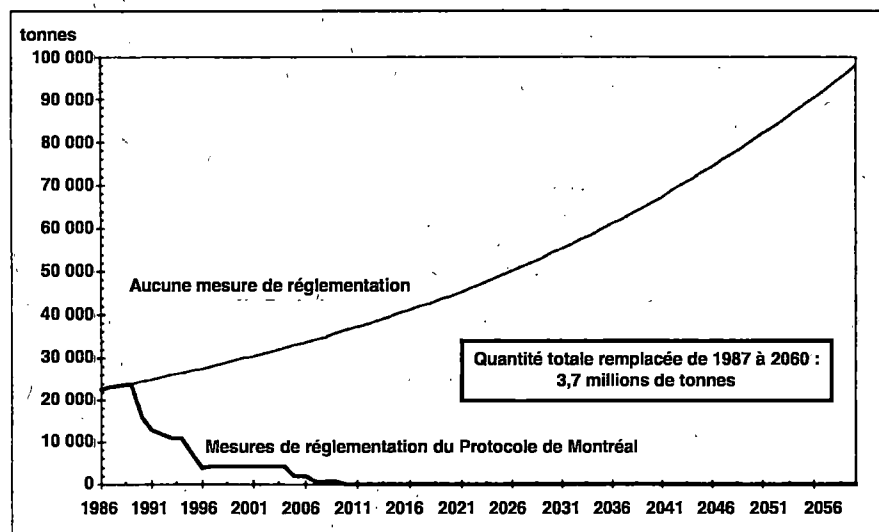
Dans l'ensemble, le coût moyen de remplacement du CFC-12 utilisé pour la stérilisation est estimé à 1,43 \$ par kilogramme. En l'absence des mesures de réglementation du Protocole de Montréal, la consommation mondiale de cette substance, qui était d'environ 23 000 tonnes en 1989, aurait augmenté annuellement de 2 % jusqu'en 2060, comme l'indique la figure III-6, où ces chiffres sont comparés à ceux prévus par le Protocole de Montréal. Les coûts des mesures de réglementation, calculés

**FIGURE III-5 Consommation de CFC utilisés dans les solvants conformément au Protocole de Montréal et dans le scénario ne comportant aucune réglementation**



Source : Chiffres de la firme ARC fondés sur les données du PNUE.

**FIGURE III-6 Consommation mondiale de CFC utilisés dans les stérilisants de 1986 à 2060**



Source : Chiffres de la firme ARC fondés sur les données du PNUE.

à compter de la mise en œuvre du Protocole de Montréal jusqu'en 2060, sont estimés à 1,3 milliard \$, une valeur actualisée en dollars de 1997. Puisque ce sont les pays industrialisés qui se servent de stérilisateurs utilisant le mélange 12/88, ces coûts devraient être répartis comme suit : 1,2 milliard \$ pour les pays industrialisés, et 0,1 milliard \$ pour les pays visés au paragraphe 5(1).

### COÛTS DE REMPLACEMENT DES HALONS

Les halons sont des hydrocarbures halogénés surtout utilisés pour l'extinction des incendies qui se sont avérés extrêmement efficaces en plus d'être peu polluants. Comme ils ne laissent pas de résidus à la suite de leur évaporation, il n'est pas nécessaire d'effectuer un nettoyage. Trois types de halons portant les numéros 1211, 1301 et 2402 sont utilisés pour lutter contre les incendies et dans d'autres applications partout dans le monde. D'ordinaire, les halons 1211 et 2402 sont utilisés dans des appareils d'arrosage, comme les extincteurs manuels. Le halon 1301 est un gaz surtout utilisé dans les systèmes d'extinction par noyage total qui déversent cette substance par des canalisations et des buses encastrées.

En raison de leur faible toxicité, les halons 1301 et 1211 ne posent aucun danger pour les personnes

qui y sont exposées. Ils ont donc été largement utilisés pour des applications militaires, commerciales et résidentielles. Le halon 2402 représente une fraction relativement faible du marché mondial des halons, et il a en très grande partie été utilisé dans l'ancienne Union soviétique, en Asie et en Europe de l'Est.

En vertu du Protocole de Montréal, les pays industrialisés ont gelé en 1992 leur consommation de halons aux niveaux de 1986, et ils en ont éliminé la consommation à compter du 1<sup>er</sup> janvier 1994. Dès 2002, les pays visés au paragraphe 5(1) gèleront leur production au niveau moyen des années 1995 à 1997, et en 2005, ils devront réduire leur production à 50 % du niveau de référence; l'élimination complète est prévue pour le 1<sup>er</sup> janvier 2010.

Les données provenant de l'Environmental Protection Agency des États-Unis et du rapport de 1991 du Comité des options techniques pour les halons ont servi à établir le profil de consommation des halons 1211 et 1301 pour le scénario du Protocole de Montréal et celui ne comportant aucune réglementation. Les chiffres sur la consommation de halon 2402 sont fondés sur les données provenant de sources industrielles. Avant la mise en œuvre du Protocole de Montréal, la consommation de halons augmentait annuellement en raison de la demande accrue des halons 1301 et 1211 qui servaient à protéger les systèmes informatiques et d'autres systèmes utilisés en électronique. En 1986, la

consommation mondiale de tous les halons était de 28,8 kilotonnes. Pendant la période de 1986 à 1989, le taux annuel de croissance de la consommation mondiale a dépassé 10 %.

Dans le scénario ne comportant aucune réglementation, la consommation de halons augmente tous les ans jusqu'en 2050, avec un taux de croissance maximum de 4 % à 5 % par année pour la période de 2003 à 2010. Dans le scénario du Protocole de Montréal, la consommation diminue régulièrement dans les pays industrialisés de 1990 à la fin de 1993 et tombe à zéro à compter du 1<sup>er</sup> janvier 1994.

Le modèle prédit que les pays visés au paragraphe 5(1) accroissent leur consommation annuelle de 7 % à 10 % jusqu'en 2002, la réduisent ensuite au niveau moyen des années 1995 à 1997, la diminuent de 50 % en 2005, et l'éliminent complètement en 2010. La figure III-7 indique les niveaux prédits de consommation de halons dans les deux scénarios.

La méthode de calcul des coûts pour les halons a consisté à interroger des spécialistes de l'industrie de la protection contre les incendies au sujet des mesures d'adaptation prises pour respecter les exigences du Protocole de Montréal. Les coûts de remplacement des halons comprennent les coûts supplémentaires des matériaux de remplacement (autre les coûts du halon), les coûts supplémentaires de l'entretien et de l'inspection des systèmes de remplacement, les coûts de nettoyage nécessités par le rejet des matériaux et l'augmentation des primes d'assurance due aux systèmes ne fonctionnant pas aux halons.

Le plus souvent, l'industrie a donné suite aux mesures de réglementation du halon 1211 en le remplaçant dans les extincteurs par des produits moins chers et dont le PACO est égal à zéro, comme le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ou un produit chimique sec. Il n'y a eu aucun coût supplémentaire permanent, car on a signalé que les coûts d'entretien et les primes d'assurance étaient les mêmes. Seul le rejet des matériaux, qui s'est rarement produit, a entraîné des coûts de nettoyage. Le remplacement du halon 1211 a donc occasionné des économies nettes de 10 \$ par kilogramme dans les pays industrialisés, pour 90 % de la consommation de cette substance. Pour le reste de la consommation, soit 10 %, le coût moyen des produits de remplacement du halon 1211 a été de 75 \$ par kilogramme. Par conséquent, le coût total par kilogramme pour le halon 1211 a été estimé à 1,50 \$. Selon le *Rapport du GETE sur le réapprovisionnement* (1996), la valeur supérieure du coût supplémentaire de remplacement dans les pays visés au

paragraphe 5(1) serait de 3,69 \$ par kilogramme. L'on présume que ce chiffre s'applique à 10 % de la consommation et que pour le reste, soit 90 %, le coût est le même que dans les pays industrialisés.

Au tout début, lorsque la production de halon 1301 a été restreinte, la plupart des produits de remplacement utilisés dans des systèmes d'arrosage et de détection n'étaient pas plus coûteux. Toutefois, à mesure qu'un plus grand nombre de produits non polluants ont été mis au point, une plus grande partie des halons a été remplacée par ces produits ou par des gaz inertes plus dispendieux que les halons, ce qui a généré des coûts nets positifs par kilogramme de halon remplacé. Les produits de remplacement non polluants peuvent nécessiter des contenants, des buses et des conduites différents. Leur coût est également plus élevé que celui du halon l'aurait été en l'absence de mesures de réglementation, ce qui donne un coût supplémentaire moyen de 120 \$ par kilogramme. Les agents d'arrosage à coût marginal nul remplaceront 75 % de ceux qui sont utilisés, et les agents non polluants, 25 %. En moyenne, les coûts nets de remplacement du halon 1301 pendant la période de 1992 à 2060 seront de 30 \$ par kilogramme dans les pays industrialisés, et dans les pays en développement, ils seront de 3,69 \$, d'après les données sur l'efficacité en regard des coûts mentionnées dans le *Rapport du GETE sur le réapprovisionnement* (1996). L'on présume donc qu'une proportion beaucoup plus faible d'agents non polluants sera utilisée dans ces pays.

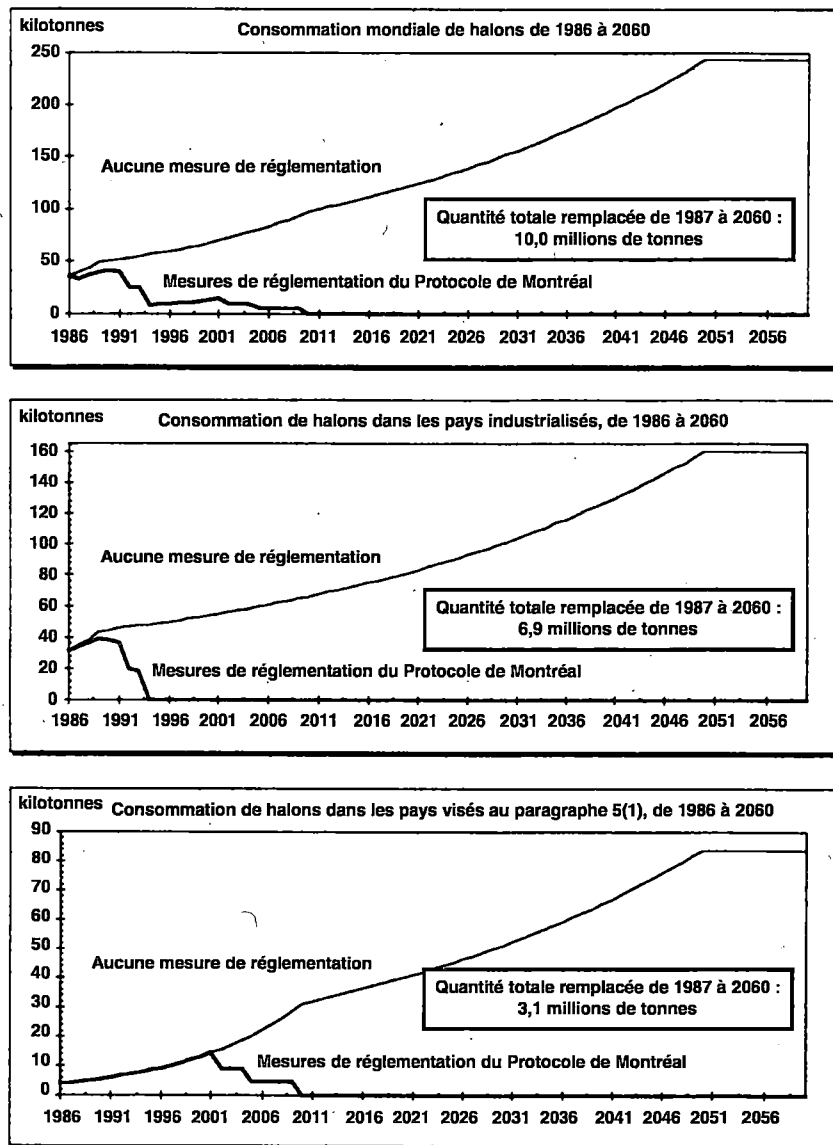
Les applications faisant appel au halon 2402 varient selon les pays. Les données existantes portent à croire que 40 % du halon 2402 consommé sera remplacé à un coût équivalant à celui du halon 1301, et 60 % à celui du halon 1211.

En se fondant sur le calcul des coûts par kilogramme de halons remplacés, on estime que les coûts totaux nets des mesures de réglementation du Protocole de Montréal relatives aux halons seront de 12,6 milliards \$ en dollars de 1997 actualisés. Dans le cas du halon 1301, ces coûts seront surtout assumés par les pays industrialisés. Il en coûtera probablement 268 millions \$ aux pays visés au paragraphe 5(1), et 12,3 milliards \$ aux pays industrialisés..

## COÛTS DE REMPLACEMENT DES HCFC

La présente section évalue les coûts de la réduction et de l'élimination éventuelle de la consommation d'hydrochlorofluorocarbures (HCFC). Le marché mondial des HCFC comprend à la fois un marché

**FIGURE III-7 Consommation de halons conformément au Protocole de Montréal et dans le scénario ne comportant aucune réglementation**



Source : ARC, Environmental Protection Agency des États-Unis et rapport de 1991 du Comité des options techniques pour les halons. Les données sur le halon 2402 proviennent d'un ancien fournisseur.

continu en ce qui concerne certaines utilisations des frigorigènes, et une série de nouveaux débouchés où les HCFC sont apparus comme des substances de transition pouvant remplacer les CFC. La nature hybride des HCFC est reconnue dans le Protocole de Montréal, qui fixe pour ces substances des quantités de référence pour une consommation de base de HCFC jointe à une consommation de base de CFC.

Les utilisations ultimes des HCFC à l'échelle mondiale sont classées dans les catégories suivantes :

- Aérosols.
- Mousses rigides et souples.
- Réfrigération et climatisation.
- Solvants et stérilisants.
- Produits de remplacement des halons pour l'extinction des incendies.

Les marchés mondiaux de HCFC peuvent aussi être subdivisés en fonction des matières premières vendues sur ces marchés. Il s'agit surtout du HCFC-22, du HCFC-141b et du HCFC-142b.

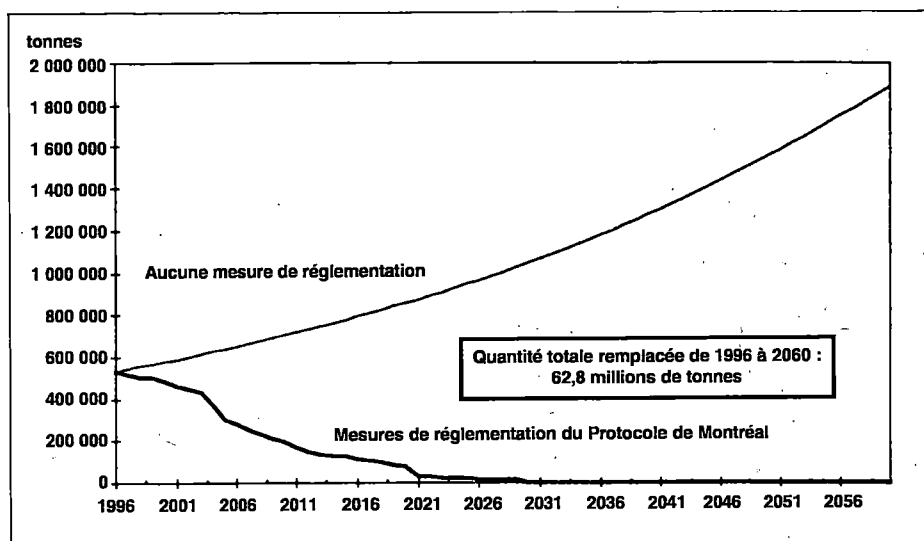
Les ventes mondiales de ces substances représentent peut-être 90 % de ces marchés. Le reste du marché est principalement occupé par le HCFC-124, utilisé comme gaz stérilisant, le HCFC-123, qui sert de frigorigène, et divers HCFC faisant partie de mélanges de frigorigènes.

Les coûts de la réduction et de l'élimination subséquente de la consommation des HCFC dépendent des solutions choisies par l'industrie pour les remplacer. Des stratégies de réduction des CFC ont été établies il y a quelques années, mais le remplacement de ces substances par un certain nombre de HCFC s'est fait récemment seulement. Il est donc impossible de connaître exactement les solutions qui seront adoptées pour remplacer les HCFC conformément aux exigences du Protocole en matière de réduction.

Dans le domaine de la réfrigération et de la climatisation, le HCFC-22 est largement utilisé depuis nombre d'années. L'on présume qu'un mélange azéotropique de HFC-32 et de HFC-125 remplacera le HCFC-22 comme frigorigène. Les coûts de cette transition sont encore incertains. Les données existantes et les chiffres fournis par l'industrie portent à croire que l'efficacité de ce nouveau frigorigène contiendra les coûts de remplacement du HCFC-22, dont on estime que, dans l'ensemble, ils seront probablement de l'ordre de 3,00 \$ par kilogramme.

Le HCFC-142b est utilisé comme agent gonflant dans la fabrication de la mousse de polystyrène extrudé. Il a remplacé le CFC-12. Pour cette application, l'on présume que les coûts de remplacement de ce HCFC s'étaleront de 2010 à 2060. Un certain nombre de solutions sont encore à l'étude, mais pour les fins du calcul des coûts, l'on présume que le HCFC-142b sera remplacé par le HFC-134a, auquel on ajoutera probablement du

**FIGURE III-8 Consommation mondiale de HCFC de 1996 - 2060**



Source : Chiffres de la firme ARC fondés sur les données du PNUE.

CO<sub>2</sub> et de l'alcool. D'après des sources industrielles, on s'attend à ce que ce remplacement soit légèrement plus coûteux que celui du CFC-12 par le HCFC-142b. Compte tenu de ces hypothèses, on estime que les coûts de remplacement seront probablement de l'ordre de 2,50 \$ par kilogramme.

Pour ce qui est des mousses de polyuréthane rigides, le HCFC-141b a été utilisé dans le cadre d'un effort général pour remplacer le CFC-11. Le HFC-245fa est le produit qui a le plus de chances de remplacer le HCFC-141b. D'après des sources industrielles, les coûts de ce remplacement seront de l'ordre de 2,50 \$ par kilogramme et s'étaleront de 2003, lorsque la consommation de HCFC-141b aura été éliminée, à 2060.

En raison de la forte incertitude que comporte la nature exacte de bon nombre de produits de remplacement des HCFC, les coûts de remplacement ont été calculés pour ce groupe de substances plutôt que par secteur d'utilisation ultime. Les coûts par kilogramme mentionnés précédemment ont été utilisés pour les principales applications des HCFC. Ces chiffres ont permis de calculer un coût moyen pondéré par kilogramme pour le groupe des HCFC, compte tenu des quantités utilisées dans différentes applications. Dans l'ensemble, plus de 95 % de la quantité totale de HCFC a servi au gonflement des mousses et à la réfrigération. Le coût moyen pondéré du remplacement des HCFC a été estimé à 2,89 \$ par kilogramme.

La valeur actualisée présente des coûts de remplacement des HCFC pour la période allant de la date de mise en œuvre des mesures de réglementation jusqu'en 2060 est de 33,1 milliards \$. Ce chiffre représente les coûts par kilogramme et le nombre de kilogrammes remplacés, tel qu'indiqué dans la figure III-821. Compte tenu des quantités relatives consommées dans les pays industrialisés et ceux visés au paragraphe 5(1), les coûts totaux de remplacement sont répartis comme suit : 25,8 milliards

\$ pour les pays industrialisés, et 7,3 milliards \$ pour les pays visés au paragraphe 5(1), en dollars de 1997 actualisés.

## COÛTS DE REMPLACEMENT DU MÉTHYLCHLOROFORME

Le méthylchloroforme (MCF) a été ajouté à la liste des substances appauvrissant la couche d'ozone qui sont réglementées lors de la réunion de Londres des Parties au Protocole de Montréal, en juin 1990. La consommation mondiale de MCF, dont le PACO est de 0,1, a été considérable. Par exemple, en 1986, elle s'élevait à 609 kilotonnes, soit environ 60 % en volume de la consommation de tous les CFC.

Le méthylchloroforme est un solvant utilisé surtout pour le dégraissage aux vapeurs et le nettoyage à froid, dans les aérosols et les adhésifs, pour le traitement chimique, en électronique et dans les revêtements. C'est en raison de sa faible toxicité et inflammabilité et de la réglementation accrue d'autres solvants considérés comme des composés organiques volatils (COV) qu'il a été utilisé dans une aussi large mesure.

Divers produits ont été mis au point pour remplacer le méthylchloroforme utilisé comme solvant et dans des applications connexes. Dans les pays industrialisés et ceux visés au paragraphe 5(1), la répartition de la consommation de méthylchloroforme entre les utilisateurs a été fortement asymétrique. Une grande partie de la consommation totale a été attribuable à quelques utilisateurs principaux, mais les petites et moyennes entreprises (PME) compaient souvent des milliers d'utilisateurs. Les PME des pays visés au paragraphe 5(1) et de ceux dont l'économie est en transition continuent de consommer de grandes quantités de méthylchloroforme. Ces entreprises font face à des tensions de coûts lorsqu'elles veulent utiliser des produits de remplacement parce qu'elles manquent de ressources techniques et financières.

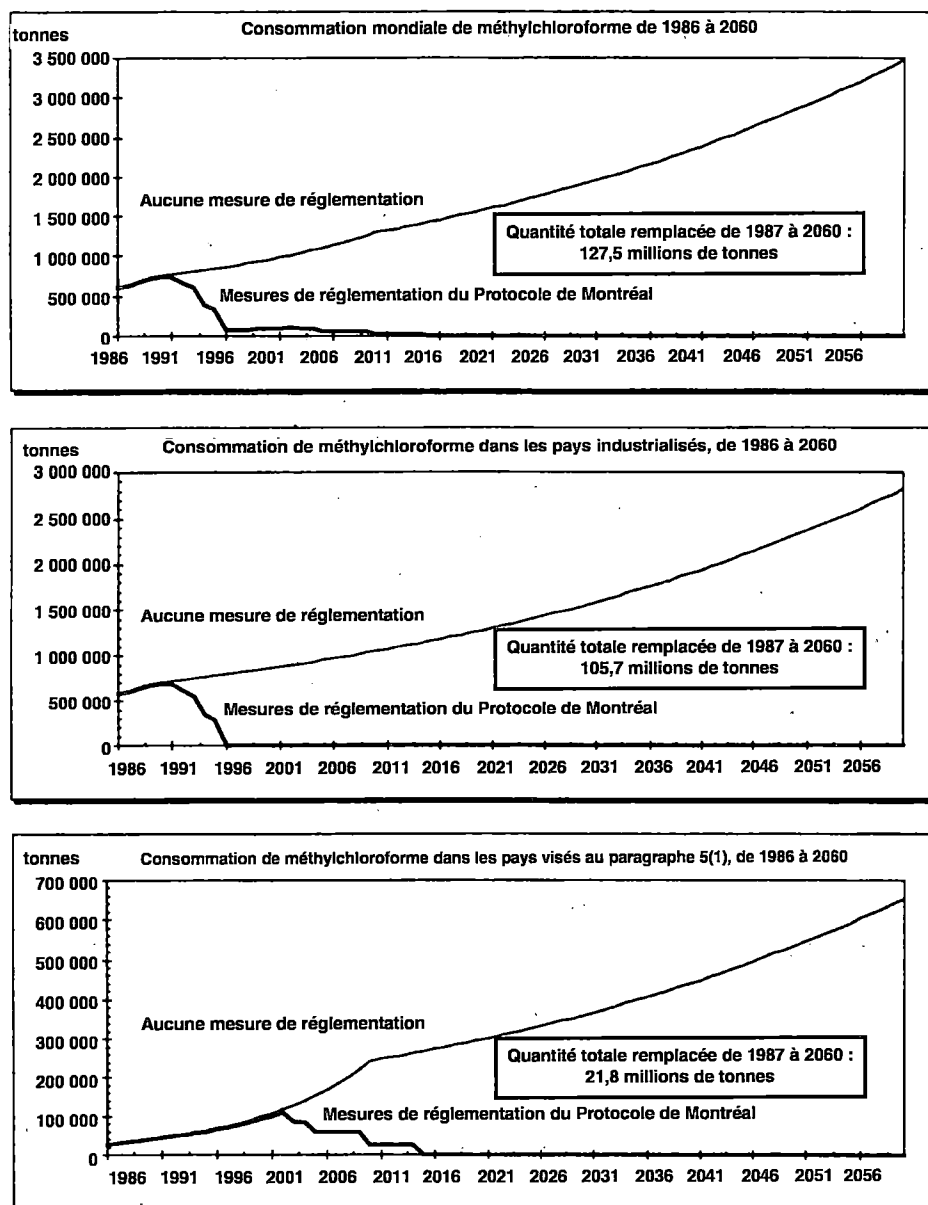
21 Dans l'estimation des coûts de HCFC, il est évident qu'il est important de ne pas les calculer deux fois. La méthode ici employée a trait au coût de remplacement des CFC en premier lieu. Si des HCFC n'avaient pas été disponibles, les coûts de remplacement des CFC auraient été plus élevés. Les HCFC permettent donc de contenir les coûts de remplacement des CFC, mais le Protocole exige ensuite le remplacement des HCFC. Ces coûts ont été calculés tel qu'indiqué.

Dans chaque figure du présent chapitre indiquant les quantités de CFC remplacées, le scénario du Protocole de Montréal est comparé à celui ne comportant aucune réglementation, compte tenu du fait que les HCFC ne sont pas réglementés. Dans la figure indiquant les quantités de HCFC remplacées, le scénario du Protocole de Montréal est comparé à celui ne comportant aucune réglementation, compte tenu du fait que les CFC sont réglementés.

Si les HCFC n'étaient pas des substances destructrices de l'ozone, ils auraient continué d'être utilisés pour remplacer les CFC, et la courbe de consommation aurait été celle du scénario ne comportant aucune réglementation, ce qui n'aurait eu aucun effet sur les coûts de remplacement des CFC qui ont été calculés. Les mesures de réglementation des CFC ont créé la plus grande partie du marché des HCFC, mais si ces derniers n'avaient pas été réglementés, leur consommation aurait augmenté. Ces substances ont en fait remplacé les CFC, et les coûts en sont une indication, mais les HCFC doivent maintenant être remplacés. Les coûts ont été calculés en fonction des quantités qui auraient été consommées.

Par exemple, dans le cas d'un secteur hypothétique, si l'on présume que les HCFC remplaceront 100 % des CFC, la quantité de ces dernières substances remplacée en 2040 sera égale à la quantité de HCFC remplacée. Dans l'hypothèse où il s'agit de 100 kg, où les HCFC coûtent 2 \$ par kg de plus que les CFC et où le remplacement des HCFC coûte 3 \$ par kg de plus que les HCFC, le coût en 2040 sera de  $(2 + 3 \$)^{\circ} 100$ , soit 500 \$. La méthode ici employée consiste à calculer ces coûts séparément pour les CFC et les HCFC, c'est-à-dire  $(2 \$^{\circ} 100)$  pour les CFC plus  $(3 \$^{\circ} 100)$  pour les HCFC, au lieu de calculer un coût global pour le secteur. Comme les 100 kg sont utilisés deux fois dans le calcul, mais avec des coûts différents par kg, les coûts ne sont pas calculés deux fois.

**FIGURE III-9 Consommation de méthylchloroforme conformément au Protocole de Montréal et dans le scénario ne comportant aucune réglementation**



Source : Chiffres de la firme ARC fondés sur les données du PNUE.

La méthode de calcul des coûts ici employée pour le méthylchloroforme fait fond sur des études antérieures ayant trait à la réglementation de la consommation de MCF. Dans ces études, les coûts par kilogramme ont été calculés pour le remplacement du MCF. Pour calculer ces coûts, des prix d'intervention auxquels les consommateurs choisiraient d'éliminer l'utilisation du MCF dans certaines applications ont été établis. Cette méthode prend en compte la différence considérable des coûts de la réglementation entraînés pour tous les utilisateurs de MCF. Pour le dégraissage aux vapeurs, par exemple, il existe des produits de remplacement moins coûteux que dans les cas des aérosols et des adhésifs. Dans ce contexte, l'augmentation des prix témoigne des coûts de la réglementation parce que les consommateurs remplaceront le MCF seulement si son prix devient suffisamment élevé pour que celui des autres produits semble plus intéressant.

Dans les pays industrialisés, le coût moyen de remplacement du MCF est estimé à 1,50 \$ par kilogramme. Ce coût sera probablement étalé sur la période de 1987 à 2060. Les chiffres de la firme ARC pour les pays industrialisés sont fondés sur les coûts et les quantités estimés pour les États-Unis par l'EPA américain (1992) avec et sans mesures de réglementation. Pour les pays visés au paragraphe 5(1), l'on présume que le coût par kilogramme de 3,87 \$ mentionné dans le *Rapport du GETE sur le réapprovisionnement* s'applique à 25 % de la consommation de ces pays, et que celui établi pour les pays industrialisés s'applique à 75 % de cette consommation, ce qui donne un coût global de 2,09 \$ par kilogramme.

Les autres données nécessaires pour calculer les coûts sont la consommation annuelle en l'absence de mesures de réglementation et les quantités qui seront consommées dans le scénario du Protocole de Montréal. La figure III-9 illustre ces deux scénarios. En l'absence de mesures de réglementation, la consommation dans les pays industrialisés augmentera probablement de 6 % jusqu'en 1990 et ensuite de 2 %, tandis que dans les pays visés au paragraphe 5(1), elle s'accroîtra annuellement de 9,5 % jusqu'en 2010, puis de 2 % par la suite. Ces données, jointes à l'estimation du coût par kilogramme, permettent de déterminer les coûts annuels des mesures de réglementation, puis la valeur actualisée de ces coûts pour la période de 1987 à 2060.

Ces mesures de réglementation auront probablement pour effet de réduire la consommation de méthylchloroforme de 105,7 millions de tonnes

dans les pays industrialisés et de 21,8 millions de tonnes dans les pays visés au paragraphe 5(1) pendant la période de 1987 à 2060. La valeur nette actuelle du coût de ces réductions est estimée à 39,6 milliards \$ pour les pays industrialisés, et à 8,2 milliards \$ pour les pays visés au paragraphe 5(1), ce qui donne un total de 47,8 milliards \$ en dollars de 1997.

## COÛTS DE REMPLACEMENT DU TÉTRACHLORURE DE CARBONE

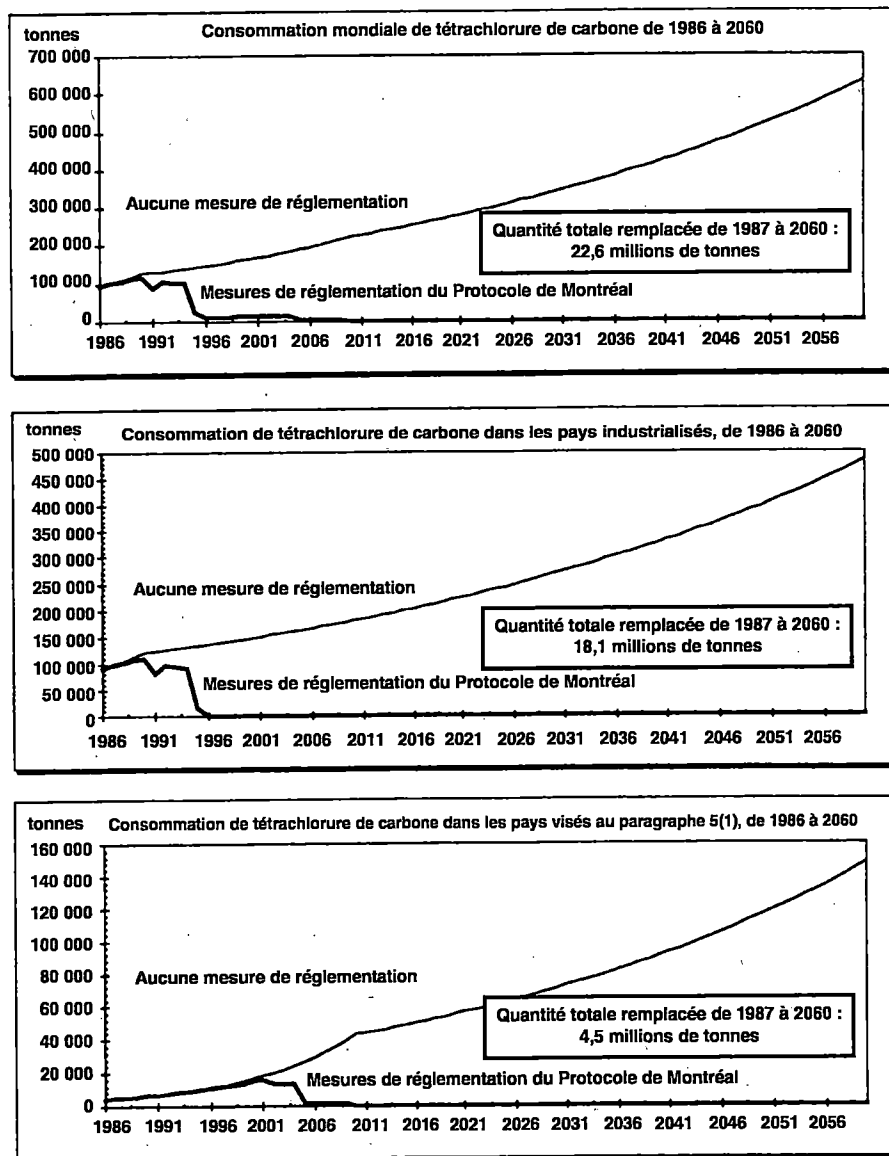
À la suite des modifications apportées en juin 1990 au Protocole de Montréal, le tétrachlorure de carbone, dont le PACO est de 1,1, a été ajouté à la liste des substances appauvrissant la couche d'ozone qui sont réglementées. La présente section fournit une estimation des coûts de l'élimination totale du tétrachlorure de carbone dans les pays industrialisés à compter de janvier 1996, et dans les pays visés au paragraphe 5(1) à compter de janvier 2010, en vertu des modifications de Copenhague apportées au Protocole de Montréal.

Avant la mise en œuvre du Protocole, de grandes quantités de tétrachlorure de carbone étaient consommées à l'échelle mondiale, mais cette substance servait en très grande partie de matière première à la fabrication de CFC sans production d'émissions. Le tétrachlorure de carbone, dont on croit qu'il est probablement carcinogène pour l'humain, a été utilisé dans un nombre relativement limité d'applications produisant des émissions. Le Protocole de Montréal prévoit une exemption pour la production de tétrachlorure de carbone servant de matière première dans la fabrication des CFC directement réglementés. Aucune estimation des coûts n'a donc été faite dans ce dernier cas.

De faibles quantités de tétrachlorure de carbone ont été utilisées, dans le procédé de fabrication du chlore, pour prévenir l'accumulation de trichlorure d'azote en quantité suffisante pour provoquer une explosion. Le tétrachlorure de carbone a aussi été utilisé en laboratoire et pour des essais de même que dans certaines applications faisant appel à un solvant. Dans l'ensemble, on estime que la consommation mondiale de tétrachlorure de carbone pour des utilisations donnant lieu à des émissions a atteint un maximum de 116 900 tonnes en 1990.

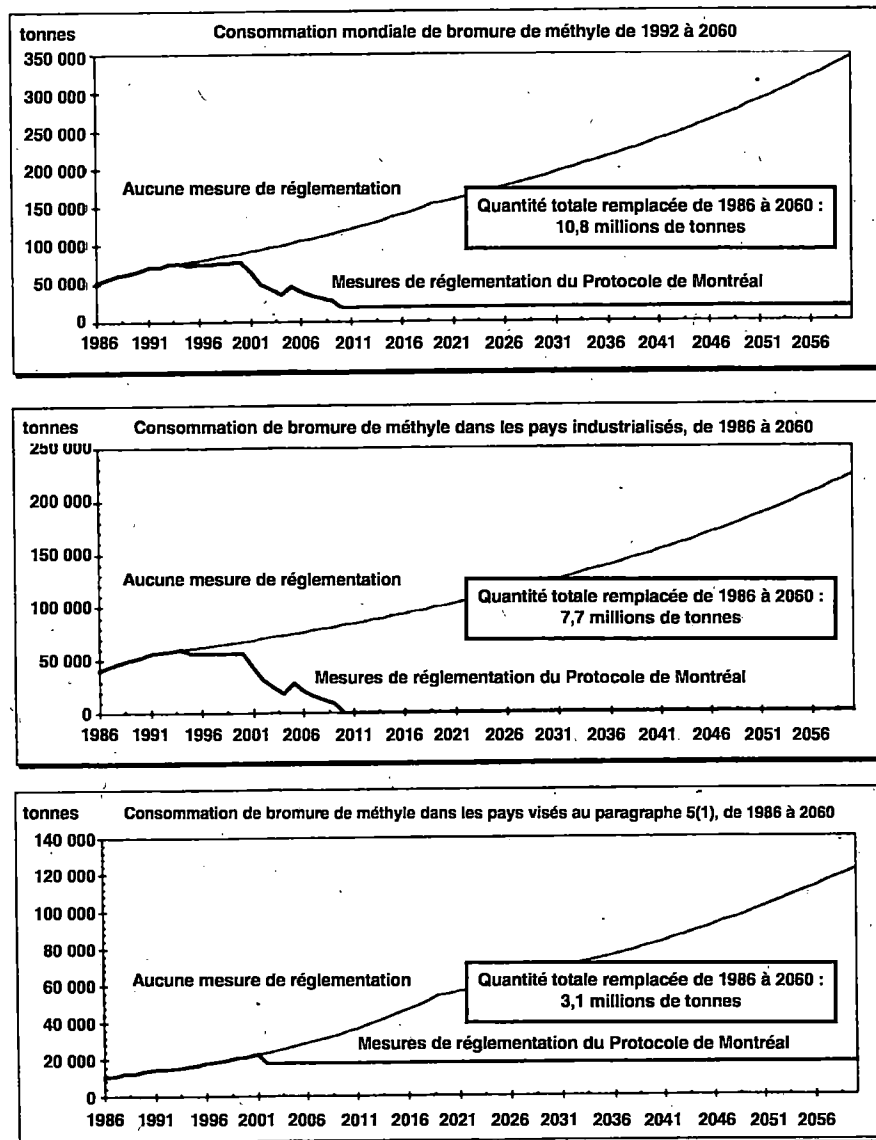
D'après la firme ARC, le coût de l'élimination complète du tétrachlorure de carbone en 1996 dans les pays industrialisés a été de 0,92 \$ par kilogramme. Ce chiffre est fondé sur les renseignements obtenus de l'industrie nord-américaine au

**FIGURE III-10** Consommation de tétrachlorure de carbone conformément au Protocole de Montréal et dans le scénario ne comportant aucune réglementation



Source : Chiffres de la firme ARC fondés sur les données du PNUE.

**FIGURE III-11 Consommation de bromure de méthyle conformément au Protocole de Montréal et dans le scénario ne comportant aucune réglementation**



Source : Chiffres de la firme ARC fondés sur les données du PNUE. Il est à noter que les mesures de réglementation ne s'appliquent pas au bromure de méthyle utilisé pour la mise en quarantaine et avant l'expédition.

sujet des coûts de remplacement. Comme il a été impossible d'avoir accès à une bonne source de données sur les coûts entraînés pour les pays visés au paragraphe 5(1), on a présumé que le coût de remplacement dans ces pays serait le double de celui pour les pays industrialisés, soit 1,84 \$ par kilogramme.

En l'absence de mesures de réglementation, la consommation de tétrachlorure de carbone dans les pays industrialisés aurait augmenté annuellement de 7 % jusqu'en 1991, et de 2 % par la suite. Dans les pays visés au paragraphe 5(1), cette augmentation aurait été de 10 % par année jusqu'en 2010, et ensuite de 2,5 %. La figure III-10 montre ces profils de consommation.

Les quantités prévues «en l'absence de mesures de réglementation» mentionnées dans le présent rapport devraient être considérées comme des valeurs maximales. Les valeurs extrapolées de la consommation dans le scénario ne comportant aucune réglementation ne tiennent pas compte des restrictions de plus en plus fortes imposées sur l'utilisation du tétrachlorure de carbone en raison de sa toxicité plutôt que de son potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone. Étant donné que cette substance est relativement peu utilisée autrement que comme matière première, d'autres hypothèses de consommation auraient eu peu d'effet sur les résultats globaux.

Ces hypothèses permettent de prédire que, en dollars de 1997 actualisés, les coûts de l'élimination complète du tétrachlorure de carbone s'élèveraient à 4,2 milliards \$ dans les pays industrialisés, et à 1,5 milliard \$ dans les pays visés au paragraphe 5(1), ce qui donnerait au total 5,7 milliards \$.

## COÛTS DE REMPLACEMENT DU BROMURE DE MÉTHYLE

Le bromure de méthyle a été ajouté à la liste des substances appauvrissant la couche d'ozone qui sont réglementées par le Protocole de Montréal lors de la réunion des Parties à Copenhague en novembre 1992. Les calendriers de réduction prévoient des exemptions pour la mise en quarantaine et avant l'expédition. L'estimation des coûts ici présentés est fondée seulement sur les quantités consommées dans les utilisations réglementées.

Les coûts entraînés par le respect du calendrier de réduction du bromure de méthyle sont représentatifs de la méthode de calcul des coûts globaux employée dans le présent rapport. La consommation de bromure de méthyle est calculée en l'absence de mesures de réglementation et ensuite comparée à celle prévue en vertu du Protocole de Montréal. La figure III-11 montre ces deux scénarios.

Pour les pays industrialisés, les coûts ont été calculés à l'aide des données contenues dans le rapport préparé pour Environnement Canada par Apogee Research et intitulé *A Study to Assess Alternative Economic Options Available for the Control of Production and Consumption of Methyl Bromide* (1994).

À la lumière de ces données, nous avons estimé que le coût moyen de remplacement du bromure de méthyle nécessaire pour respecter les exigences du Protocole de Montréal en matière de réduction était de 4,40 \$ par kilogramme dans les pays industrialisés. Il a été plus difficile de trouver des estimations acceptées des coûts dans les pays visés au paragraphe 5(1). Puisque ces pays doivent commencer en 2002 à réduire leur consommation aux niveaux moyens des années 1995 à 1998, on a présumé que le coût par kilogramme devrait être inférieur à celui pour les pays industrialisés, probablement 50 % de moins, soit 2,20 \$. On a aussi présumé qu'en l'absence des mesures de réglementation du Protocole, la consommation aurait augmenté annuellement de 2 % dans les pays industrialisés et de 5 % dans les pays visés au paragraphe 5(1) jusqu'en 2020, puis de 2 % jusqu'en 2060.

À un taux social d'actualisation de 5 %, les réductions obligatoires indiquées à la figure III-11 entraînent des coûts de réglementation dont la valeur actualisée présente est de 6,7 milliards \$ dans les pays industrialisés, et de 1,1 milliard \$ dans les pays visés au paragraphe 5(1), pour un total de 7,8 milliards \$.

## ESTIMATION DES COÛTS TOTAUX

Les coûts mondiaux totaux entraînés par le respect des mesures de réglementation du Protocole de Montréal pour toutes les substances appauvrissant la couche d'ozone s'élèvent à 235 milliards \$ en dollars actualisés de 1997. La ventilation de ces coûts est résumée au tableau III-12. Les coûts par kilogramme sous-jacents aux coûts totaux sont résumés dans le tableau III-13.

**TABLEAU III-12 Résumé des coûts totaux à un taux d'actualisation de 5 %  
(en milliards de dollars amér. de 1997)**

|                                                                                      | Coûts totaux        |                            |               |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------|---------------|
|                                                                                      | Pays industrialisés | Pays visés au paragr. 5(1) | Tous les pays |
| <b>CFC</b>                                                                           |                     |                            |               |
| Aérosols                                                                             | -6,5                | 1,2                        | -5,3          |
| Mousses                                                                              | 14,8                | 3,1                        | 17,9          |
| Réfrigération                                                                        | 47,7                | 47,7                       | 95,4          |
| Solvants                                                                             | 16,5                | 2,2                        | 18,7          |
| Stérilisants                                                                         | 1,2                 | 0,1                        | 1,3           |
| <b>Halons</b>                                                                        | 12,3                | 0,3                        | 12,6          |
| <b>HCFC</b>                                                                          | 25,8                | 7,3                        | 33,1          |
| Aérosols                                                                             |                     |                            |               |
| Mousses                                                                              |                     |                            |               |
| Réfrigération                                                                        |                     |                            |               |
| Solvants                                                                             |                     |                            |               |
| Stérilisants                                                                         |                     |                            |               |
| <b>Méthylchloroforme</b>                                                             | 39,6                | 8,2                        | 47,8          |
| <b>Tétrachlorure de carbone</b><br>(Utilisé autrement que<br>comme matière première) | 4,2                 | 1,5                        | 5,7           |
| <b>Bromure de méthyle</b> <sup>6,7</sup>                                             | 1,1                 | 7,8                        |               |
| <b>TOTAL</b>                                                                         | <b>162,3</b>        | <b>72,7</b>                | <b>235,0</b>  |

Source : Chiffres de la firme ARC, tel qu'indiqué dans le texte.

**TABLERAU III-13**      **Résumé des coûts par kilogramme (en dollars amér. de 1997)**

|                                                                                      | Pays visés au paragr. 5(1) |            |                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------|----------------------|
|                                                                                      | Pays industrialisés        | Coût moyen | Coût supplémentaire* |
| <b>CFC</b>                                                                           |                            |            |                      |
| Aérosols                                                                             | -0,88                      | 0,50       | 2,68                 |
| Mousses                                                                              | 1,48                       | 4,90       | 8,31                 |
| Réfrigération                                                                        | 4,62                       | 6,64       | 15,61                |
| Solvants                                                                             | 1,13                       | 2,82       | 15,84                |
| Sterilisants                                                                         | 1,43                       | 1,43       | s.o.                 |
| <b>Halons</b>                                                                        |                            |            |                      |
| 1211                                                                                 | -1,50                      |            | 3,69                 |
| 1301                                                                                 | 30,00                      |            | 3,69                 |
| 2402                                                                                 | 11,10                      |            | 3,69                 |
| <b>HCFC</b>                                                                          | 2,89                       | 2,89       | s.o.                 |
| <b>Méthylchloroforme</b>                                                             | 1,50                       | 2,09       | 3,87                 |
| <b>Tétrachlorure de carbone</b><br>(Utilisé autrement que<br>comme matière première) | 0,92                       | 1,84       |                      |
| <b>Bromure de méthyle</b> 4,40                                                       | 2,20                       |            | s.o.                 |

\*Calculé d'après le Rapport du GETE sur le réapprovisionnement (1996).  
Source : Chiffres de la firme ARC, tel qu'indiqué dans le texte.

# Avantages nets du Protocole de Montréal

## AVANTAGES ET COÛTS

Dans le présent rapport, les avantages du Protocole de Montréal sont répartis en deux volets. Dans le cas des avantages associés à une atténuation des dommages causés aux matériaux, à une moindre diminution des ressources halieutiques, nous estimons la valeur monétaire de ces avantages. Pour ce qui est des effets sur la santé, incluant une baisse de l'incidence des cancers cutanés, de la mortalité due au cancer cutané et de l'incidence des cas de cataractes, nous donnons une estimation des effets sanitaires évités. Dans les deux cas, nous présentons les estimations selon la même grille, à savoir une mise en parallèle de deux scénarios : scénario de non-réglementation de la consommation des substances destructrices d'ozone par rapport au scénario de rechange représenté par l'introduction du Protocole de Montréal.

Le tableau IV-1 résume les avantages totaux du Protocole de Montréal. Outre ses avantages financiers quantifiés à 459 milliards de dollars, le Protocole ferait baisser de 3,4 millions le nombre de cancers cutanés, de 129 millions les cas de cataractes et de plus de 330 000 les décès attribuables au cancer cutané.

Le Protocole de Montréal entraîne aussi des coûts considérables, mais qui s'avèrent faibles relativement à ses avantages. Au chapitre III du présent rapport, on apprend que la valeur actuelle capitalisée des coûts du Protocole pour la période 1987-2060 totalise 235 milliards de dollars. Bien que substantiel, ce montant est inférieur aux avantages quantifiables découlant d'une moindre altération des ressources agricoles, halieutiques et matérielles. Quant à l'évitement des effets sanitaires, il a des avantages beaucoup plus importants que ses coûts. Uniquement au titre de la mortalité causée par des cancers cutanés, on évitera 333 500 décès entre 1987 et 2060.<sup>1</sup>

## ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Notre analyse porte sur les effets qui s'étendent sur de nombreuses années. Il faut ramener à un dénominateur commun aussi bien les coûts de l'application du Protocole de Montréal que ses avantages monétairement quantifiés. Lorsqu'on applique aux problèmes environnementaux les principes de l'analyse avantages-coûts, il est pratique courante d'actualiser les avantages comme les coûts, quoique les recherches et les débats se poursuivent sur le taux particulier d'actualisation à appliquer.

Pour tenir compte de l'incertitude constante entourant le taux d'actualisation à appliquer, nous recourons à une analyse de sensibilité basée sur divers taux d'actualisation. La documentation existante prône un «faible» taux d'actualisation de l'ordre de 3 %, représentant la préférence de la société pour les avantages actuels par rapport aux avantages futurs (importance du «lien social»). Le taux d'actualisation «élevé» de 7 % sert à représenter l'optique du «coût d'opportunité sociale en capital». En outre, nous employons comme scénario de référence un taux d'actualisation de 5 %, pour donner voix à l'opinion également exprimée par certains chercheurs selon lesquels les ressources nécessaires pour couvrir les coûts des initiatives environnementales proviennent à la fois d'une consommation au faible taux et d'un investissement au taux élevé. De nombreuses analyses économiques portant sur les politiques environnementales, notamment la récente étude de l'EPA *The Benefits and Costs of the Clean Air Act: 1970 to 1990*, font appel à une telle analyse de sensibilité pour le choix du taux d'actualisation.

Dans la présente section, nous examinons dans quelle mesure les effets estimés du Protocole de Montréal sont sensibles à certaines des hypothèses clés qui sous-tendent l'analyse. L'analyse de sensibilité exposée dans ces pages nous permet de considérer les effets de différents taux d'actualisation et de divers horizons temporels pour ce qui est de l'évaluation des conséquences.

Notre scénario de référence porte sur un taux d'actualisation de 5 % et un horizon temporel couvrant 1987-2060. Une analyse de sensibilité permettant d'apporter des modifications à ce scénario de référence est effectuée :

- Pour les termes (fins de période) 2050 et 2070 dans le cas des avantages et des coûts quantifiés en dollars et pour tous les effets sur la santé.
- Pour des taux d'actualisation de 3 % et de 7 % dans le cas des avantages et des coûts quantifiés en dollars.

En ce qui concerne les effets sanitaires, on voit au tableau IV-2 que le terme de la période a un effet considérable sur les conséquences estimées du Protocole de Montréal. Cela reflète le degré croissant de destruction de l'ozone qui amplifie les effets sanitaires pour les périodes plus longues.

Le tableau IV-3 illustre les effets de divers taux d'actualisation et de divers horizons temporels sur les avantages du Protocole quant à l'atténuation des dégâts subis par les ressources agricoles et halieutiques

**TABEAU IV-1 Avantages et coûts du Protocole de Montréal, 1987-2060**

**AVANTAGES**

**Avantages pour la santé**

|                                                    |             |
|----------------------------------------------------|-------------|
| Diminution des cas de cancer cutané sans mélanome  | 19 100 000  |
| Diminution des cas de cancer cutané avec mélanome  | 1 500 000   |
| Diminution des cas de cataractes*                  | 129 100 000 |
| Diminution des mortalités dues aux cancers cutanés | 333 500     |

**Avantages financiers**

|                                         |                  |
|-----------------------------------------|------------------|
| Diminution des dommages aux pêcheries   | 238 milliards \$ |
| Diminution des dommages à l'agriculture | 191 milliards \$ |
| Diminution des dommages aux matériaux   | 30 milliards \$  |

|                             |                  |
|-----------------------------|------------------|
| Avantages financiers totaux | 459 milliards \$ |
|-----------------------------|------------------|

**COÛTS**

|              |                  |
|--------------|------------------|
| Coûts totaux | 235 milliards \$ |
|--------------|------------------|

**AVANTAGES NETS**

|                           |                                                   |
|---------------------------|---------------------------------------------------|
| Avantages moins les coûts | 224 milliards \$ plus les avantages pour la santé |
|---------------------------|---------------------------------------------------|

Source : Estimations d'ARC décrites au chapitre II.

\*Moyenne des estimations des limites supérieure et inférieure de l'intervalle de variation. Le taux d'actualisation du cas de référence est de 5 %. À noter que les avantages totaux représentent la somme des effets sanitaires et des avantages exprimés en dollars.

**TABEAU IV-2 Analyse de sensibilité : Fins de période**

| Année | Cas                         |                             |             | Décès                       |                             |
|-------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|
|       | Cancer cutané sans mélanome | Cancer cutané avec mélanome | Cataractes  | Cancer cutané sans mélanome | Cancer cutané avec mélanome |
| 2050  | 11 509 000                  | 952 000                     | 61 194 000  | 63 300                      | 142 773                     |
| 2060  | 19 100 000                  | 1 523 000                   | 129 210 000 | 105 048                     | 228 414                     |
| 2070  | 29 408 000                  | 2 241 000                   | 194 874 000 | 161 742                     | 336 072                     |

Source : Tableau II-3. Moyenne des estimations des limites supérieure et inférieure de l'intervalle de variation.

et les matériaux. Ces estimations sont sensibles aussi bien au taux d'actualisation qu'à l'horizon temporel. Dans le cas de l'horizon temporel, c'est encore une fois parce que les avantages s'accroissent en raison de l'intensification de la perte d'ozone avec l'extension de l'horizon temporel.

Au sujet des coûts engendrés à l'échelle planétaire par l'observation des exigences du Protocole de Montréal, le tableau IV-4 illustre les résultats de l'analyse de sensibilité pour les taux d'actualisation et les horizons temporels. Pour ce qui est des

coûts, la modification de l'horizon temporel exerce un effet relativement modeste, alors qu'un changement de taux d'actualisation a un effet très substantiel. L'effet global de la différence observée entre les avantages et les coûts est que les avantages nets s'accroissent proportionnellement à l'extension des horizons temporels et à la baisse du taux d'actualisation. Dans tous les scénarios, cependant, les avantages financiers continuent d'excéder les coûts, et les avantages sanitaires viennent s'ajouter aux avantages évalués en termes monétaires.

**TABLEAU IV-3 Analyse de sensibilité pour les avantages non sanitaires  
(en milliards de \$ amér. de 1997)**

| Taux d'actualisation | 1987-2050 | 1987-2060 | 1987-2070 |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 3 %                  | 536       | 570       | 599       |
| 5 %                  | 448       | 459       | 467       |
| 7 %                  | 402       | 406       | 408       |

Source : Estimations faites par ARC pour le scénario de référence présenté au tableau II-13.

**TABLEAU IV-4 Analyse de sensibilité pour la valeur actuelle des coûts du Protocole de Montréal — coûts à l'échelle planétaire actualisés (en milliards de \$ amér. de 1997)**

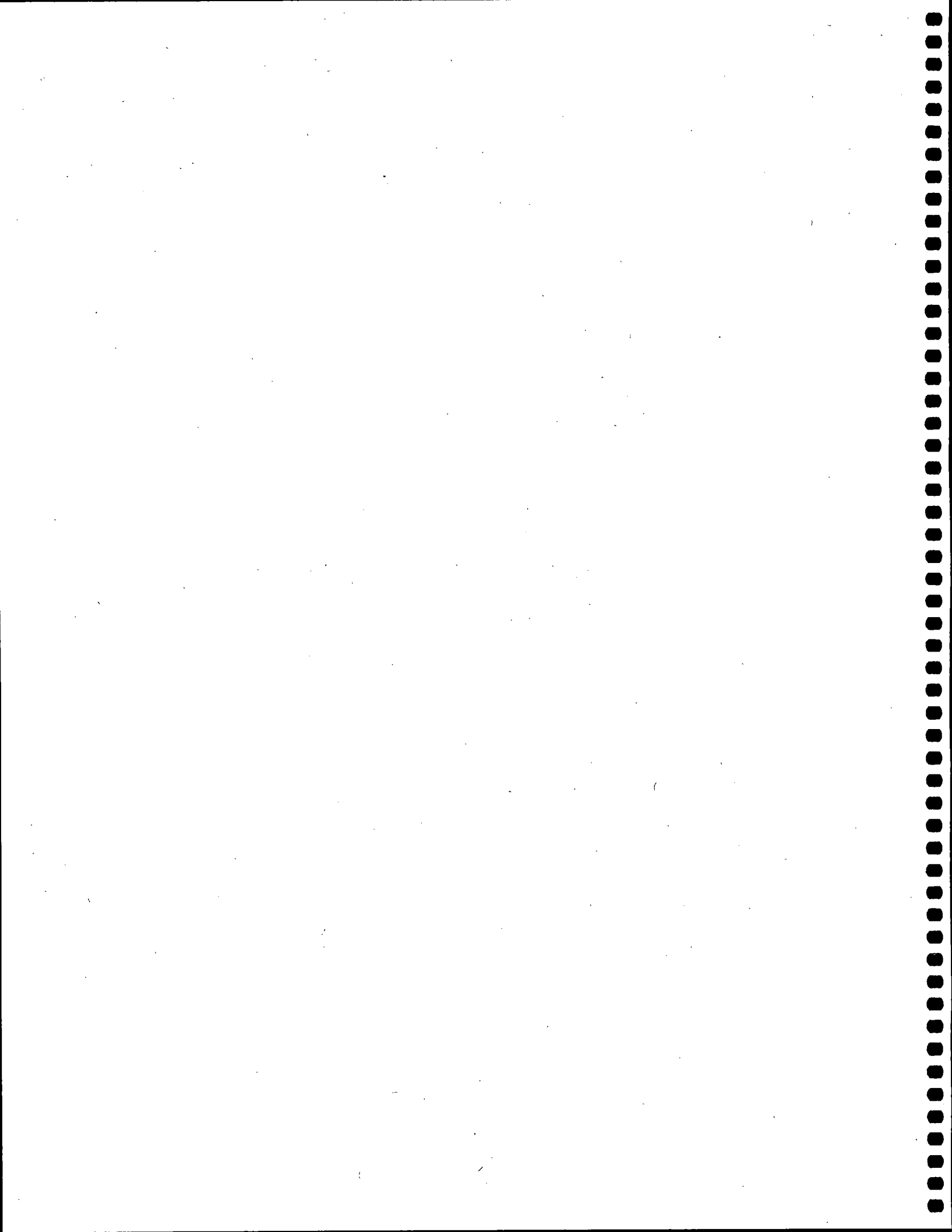
| Taux d'actualisation | 1987-2050 | 1987-2060 | 1987-2070 |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 3 %                  | 343       | 394       | 438       |
| 5 %                  | 219       | 235       | 247       |
| 7 %                  | 121       | 126       | 129       |

Source : Estimations faites par ARC pour le scénario de référence présenté au chapitre III.

## PROBLÈMES DE QUANTIFICATION

Bon nombre des estimations avancées dans ce rapport représentent une première tentative de quantifier les répercussions planétaires du Protocole de Montréal. On trouve, dans la documentation existante, des évaluations portant sur les avantages et les coûts pour un pays donné, mais — particulièrement au sujet des avantages — rien à l'échelon mondial. Dans tous les cas, nous avons puisé aux meilleures données disponibles publiées, en complétant cette information par les renseignements émanant du comité consultatif international créé pour la présente étude.

Dans le domaine de l'estimation des avantages, ce rapport offre une évaluation des conséquences sanitaires de l'amenuisement de la couche d'ozone. De nombreuses études menées dans des pays individuels ont fait appel à diverses méthodes d'évaluation pour convertir en termes monétaires ces estimations des effets sanitaires. De concert avec le comité consultatif international, nous avons déterminé qu'il était impossible d'établir des méthodes d'évaluation applicables à l'échelle mondiale pour une vaste gamme d'effets (allant des cas de cataractes à la mortalité causée par le cancer cutané). L'annexe A de ce rapport passe en revue les méthodes d'évaluation examinées.



# Leçons tirées du Protocole

## ÉLABORATION DU PROTOCOLE DE MONTRÉAL

La signature de la version initiale du Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone, le 16 septembre 1987, a constitué un tournant historique pour la politique environnementale au niveau mondial. Cette entente, qui prend appui sur les progrès initiaux réalisés par le truchement de la Convention de Vienne de 1985 et qui a été ultérieurement signée par 163 pays (en date de mars 1997), fixait un calendrier afin de réduire la consommation des chlorofluorocarbures (CFC) et des halons. Le Protocole de Montréal prévoyait un processus d'étude continue, par les Parties, du calendrier de réduction et de la liste des substances réglementées destructrices d'ozone. Au cours de réunions qui ont eu lieu à Londres (1990), à Copenhague (1992) et à Vienne (1995), les Parties ont accéléré les calendriers de réduction et augmenté la liste des substances réglementées en y ajoutant les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), les hydrobromofluorocarbures (HBFC), le tétrachlorure de carbone, le méthylchloroforme et le bromure de méthyle.

Réussite intrinsèquement marquante pour la préservation de la couche d'ozone nécessaire à la vie sur terre, le Protocole de Montréal et son processus d'élaboration et de mise en oeuvre a d'importantes répercussions sur la manière dont sont abordés d'autres problèmes environnementaux d'envergure mondiale. La présente section du rapport s'intéresse aux éléments du Protocole de Montréal qui s'avèrent importants en vue de la négociation de nouveaux accords internationaux touchant la protection de l'environnement.

Les modalités d'établissement et de mise en oeuvre du Protocole de Montréal se distinguent de nombreuses façons. Comme indiqué ci-dessus, 163 pays sont aujourd'hui Parties au Protocole de Montréal. Ces pays reflètent une gamme extrêmement diversifiée de groupes et d'intérêts économiques, politiques et sociaux. Tous ont intérêt à protéger la couche d'ozone, mais l'existence d'une communauté d'intérêts ne suffit pas toujours à l'obtention d'un consensus, particulièrement au sujet d'un enjeu aussi fondamental qu'une vaste convention visant à limiter la consommation de substances destructrices d'ozone.

Le présent chapitre donne un bref aperçu de certains facteurs associés au succès du processus d'élaboration du Protocole de Montréal.

## DISPOSITIONS RELATIVES AUX PAYS EN DÉVELOPPEMENT

Une des raisons expliquant le succès du Protocole de Montréal est qu'il a expressément reconnu et pris en compte l'hétérogénéité caractérisant la capacité de chaque pays de réduire et d'éliminer sa consommation de substances destructrices d'ozone. On en trouve l'exemple le plus manifeste au paragraphe 5(1) du Protocole, qui prévoit un processus d'ajustement reconnaissant les particularités des pays en développement. En outre, des dispositions subséquentes ont été adoptées pour refléter la situation particulière des pays aux économies en transition.

Les dispositions du Protocole de Montréal concernant les pays en développement ont joué un rôle clé dans le succès mondial de cette entente. Les Parties au Protocole qui sont des pays en développement et dont la consommation annuelle par habitant des substances initialement réglementées était inférieure à 0,3 kg ont bénéficié d'un calendrier de réduction plus long. Le Protocole de Montréal de 1987 permettait aux pays visés par le paragraphe 5(1) de surseoir de dix ans à l'application des mesures de réduction. Le chapitre I du présent rapport expose en détail les mesures de réduction applicables aux pays industrialisés et aux pays visés par le paragraphe 5(1).

En plus d'accorder aux pays visés par le paragraphe 5(1) un calendrier particulier pour satisfaire aux exigences du Protocole, les Parties ont instauré un mécanisme financier provisoire afin d'offrir aux pays visés par le paragraphe 5(1) la coopération technique et les ressources financières dont ils ont besoin pour honorer le Protocole. Ce mécanisme, établi initialement à titre provisoire entre 1991 et 1993 et ultérieurement de façon permanente, incluait un Fonds multilatéral visant à aider les pays visés par le paragraphe 5(1) à financer des projets précis pour réduire leur consommation de substances destructrices d'ozone.

Le Fonds multilatéral a donc été établi pour offrir un soutien financier et technique aux pays visés par le paragraphe 5(1). Les contributions versées au Fonds par les pays industrialisés serviraient à couvrir les coûts supplémentaires supportés par les pays en développement pour des projets approuvés. Le Fonds multilatéral constituait un mode clairement inédit de mise en oeuvre d'ententes internationales. En effet, la diversité de la situation et des capacités financières des Parties était

reconnue dans un cadre qui fixait des exigences et des responsabilités pour tous les pays membres. Le Fonds multilatéral a été doté d'un mandat, d'un processus budgétaire et de procédures administratives fixes, dont le principal objectif était de protéger l'environnement. Il est important de souligner l'interaction des éléments purement financiers de ce processus avec le volet de transfert technologique. Ainsi, plusieurs pays visés par le paragraphe 5(1) ont pu recourir au Fonds multilatéral pour se doter d'installations de production d'avant-garde, faisant appel à des technologies non fondées sur des substances destructrices d'ozone.

## ENTENTE GRANDISSANTE DES AVANTAGES DE LA RÉGLEMENTATION

Dans un cadre économique, des politiques de réglementation sont conçues lorsqu'on s'attend à ce que leurs avantages dépassent leurs coûts. Comme indiqué tout au long du présent rapport, les avantages des mesures de réglementation résident dans l'évitement des dommages qu'ils ont permis de prévenir. Durant les années 80, la classe politique comme le grand public ont pris de plus en plus conscience de l'acuité croissante des problèmes associés à la destruction de la couche d'ozone et de la menace d'une aggravation beaucoup plus marquée de la situation. La perception de l'aggravation d'un problème s'accompagne d'une volonté croissante d'assumer des coûts nécessaires au traitement du problème. Les leaders d'opinion, les politiciens et la population ont fini par être convaincus que le coût d'une réglementation serait minime en regard du coût de l'inaction. L'élaboration du Protocole et l'effort constant déployé pour en élargir la portée doivent beaucoup à cette perception des avantages. Le présent rapport démontre le bien-fondé de cette perception.

Dans les années qui ont immédiatement précédé l'adoption du Protocole de Montréal, l'incertitude scientifique entourant les avantages d'une protection de la couche d'ozone a constitué un enjeu de taille. Il est difficile de traiter analytiquement ce type d'incertitude, puisqu'on peut toujours arguer de la possibilité d'élaborer de meilleures politiques en attendant l'avancement des connaissances scientifiques. Bien qu'une meilleure information comporte des avantages de ce type, un report d'action implique des coûts. Dans le cas de la couche d'ozone, nous démontrons que les coûts d'un tel report auraient été importants par rapport aux avantages obtenus. Selon certains observateurs, le Protocole de Montréal est un exemple d'applica-

tion du principe de précaution, en l'occurrence la prise de mesures malgré une information incomplète sur les avantages d'une réglementation. En outre, grâce au processus d'élaboration du Protocole de Montréal, on a pu consacrer davantage de ressources scientifiques aux recherches sur la destruction de l'ozone et ses conséquences.

## COÛTS MOINDRES QUE PRÉVU

Notre rapport souligne que le processus d'élaboration du Protocole de Montréal établissait une comparaison entre deux séries de coûts. La première série, évidente, porte sur le remplacement des substances appauvrissant la couche d'ozone. L'autre série, incitant à continuer d'utiliser ces substances, est moins claire mais, dans ce cas, plus importante. Il s'agit des dégâts qui seraient survenus sans la protection offerte à la couche d'ozone par le Protocole. Selon les données accumulées depuis la signature du Protocole en 1987, la mise en œuvre de ce dernier a entraîné des coûts globaux substantiellement inférieurs aux prévisions initiales.

Les données obtenues sur l'ampleur des coûts des mesures de réglementation ont exercé un effet important pour la période écoulée depuis 1987, puisque les modifications apportées au Protocole ont accéléré le calendrier de réduction. Cette accélération est partiellement attribuable à l'accumulation des preuves voulant qu'il soit possible d'appliquer à un coût raisonnable les mesures de réglementation. Cependant, l'évolution des perspectives pour ce qui est des coûts aide également à expliquer l'arrivée du Protocole lui-même, en 1987. Pour Rowlands (1995), l'introduction du Protocole reflétait la perception selon laquelle la réglementation avait des avantages substantiels et impliquait des coûts beaucoup moindres qu'on ne l'assumait durant la décennie précédente.

Les coûts considérés ici pertinents sont les coûts associés à une moindre utilisation des substances destructrices d'ozone par la mise au point de procédés et de produits de substitution. L'innovation, soit la création de nouveaux produits chimiques et de solutions de rechange non apparentées pouvant remplacer les substances destructrices d'ozone, a joué un rôle déterminant dans le succès du Protocole de Montréal. Quels sont les facteurs qui influent sur la recherche et le développement de nouveaux produits et de nouveaux procédés? La réponse courante porte sur le taux de rendement prévu de ce type d'innovation, mais cela se traduit en perceptions par l'industrie des coûts d'une incapacité de se convertir. L'industrie a consacré à ce secteur

d'importantes ressources de R-D immédiatement après la découverte initiale, vers le milieu des années 70, du pouvoir destructeur des CFC pour l'ozone stratosphérique. Ce processus de recherche s'est intensifié après la publication, au milieu des années 80, d'études scientifiques plus précises sur les dégâts considérables subis par la couche d'ozone. Dans ce contexte, French (1997, p. 170) fait valoir que «les engagements par traité exécutoires peuvent faire émerger diverses formes d'innovation technologique qui sont impossibles à prévoir et qui transforment en mesures à l'aveuglette les projections financières initiales».

## RÉGLEMENTATION DES QUANTITÉS

Le Protocole de Montréal de 1987 contenait un cadre de réglementation remarquablement simple. On n'y tentait aucunement d'imposer des stratégies de réduction particulières. Pour réduire leur consommation de substances destructrices d'ozone en conformité avec les prescriptions du Protocole, les pays membres étaient libres de mettre au point leurs propres politiques de réduction.

Autrement dit, le Protocole de Montréal mettait l'accent sur les *cibles* plutôt que sur les *instruments*. Cette distinction a acquis une grande importance quant à la façon dont de nombreux pays membres ont également choisi de mettre en oeuvre le Protocole sur leur territoire. Nombre de pays industrialisés ont, par le passé, adopté des politiques d'environnement prévoyant une réglementation axée non seulement sur les cibles, mais également sur la manière dont l'industrie doit les atteindre. Une telle façon de procéder peut s'avérer utile dans certains cas, mais le nombre croissant d'études scientifiques sur l'économie environnementale nous apprend qu'il existe également tout un éventail de cas où l'on peut obtenir de meilleurs résultats en faisant appel aux forces du marché pour atteindre les objectifs environnementaux. En raison du caractère clairement quantitatif des cibles fixées par le Protocole de Montréal, on peut davantage s'attendre à ce que les pays membres tentent de les atteindre directement au moyen de politiques de réglementation axées sur le marché.

Comme l'ont souligné de nombreux analystes, les divers secteurs recourant aux CFC et aux autres substances destructrices d'ozone ne se sont pas convertis au même rythme aux technologies sans CFC. Dans de nombreux pays, les cadres de réglementation fixaient des cibles générales sous forme de quotas à la consommation, mais sans

imposer de réductions sectorielles. Pour cette raison, les premiers secteurs à se convertir ont été ceux où la conversion coûtait moins cher, alors que ceux où la logistique de conversion s'avérait plus ardue y ont mis plus de temps. Sur le plan de l'efficacité économique, une telle optique peut avoir de très grands avantages comparativement à l'adoption, dans chaque secteur, de réductions égales durant toutes les périodes temporelles. Cette optique a également incité le secteur privé à déployer des efforts pour réduire efficacement la consommation et à appuyer les initiatives de réglementation visant l'atteinte des cibles fixées par le Protocole.

## COOPÉRATION INTERNATIONALE ET TRANSFERT TECHNOLOGIQUE

De nombreux observateurs ont souligné à quel point le transfert de l'information et de la technologie avait contribué au succès du Protocole de Montréal. Le processus d'élaboration du Protocole a, d'une manière unique en son genre, favorisé une coopération internationale constante dans ce domaine. Cet aspect a été crucial au succès du Protocole puisqu'il a été la clé d'une réduction à bon rapport coût-efficacité, à l'échelle planétaire, dans l'emploi des substances destructrices d'ozone. Là aussi, contrairement à d'autres initiatives environnementales, la coopération internationale a évolué à divers niveaux. Certains organismes gouvernementaux et quasi gouvernementaux sont intervenus, mais la coopération avec les entreprises et les associations du secteur privé, quelquefois de concert avec des groupes gouvernementaux, a aussi joué un rôle déterminant.

## POSSIBILITÉS D'AUTRES INITIATIVES MONDIALES EN MATIÈRE D'ENVIRONNEMENT

Notre rapport expose l'énorme succès du Protocole de Montréal quant au coût relativement faible des avantages et des conséquences positives qui en découlent. Les sections précédentes expliquent jusqu'à un certain point les éléments du Protocole qui ont contribué à ce succès. Divers documents s'attardent plus longuement à cette question, notamment le *Report of the Economic Options Committee* (1994) du Programme des Nations Unies pour l'environnement, ainsi que Rowlands (1995) et French (1997).

Nous démontrons clairement que le fait de surseoir de vingt ans à l'introduction du Protocole aurait engendré d'importants coûts sanitaires et autres, qu'une action rapide a permis d'éviter. Une telle intervention rapide a été rendue possible en raison de l'apport direct des études scientifiques sur les avantages des mesures de réglementation. Le consensus croissant qui émerge dans les milieux professionnels concernés au sujet de la destruction de la couche d'ozone a joué un rôle essentiel dans l'acceptation de cette perspective. Cela illustre l'importance d'intégrer, dans les ententes futures, les volets scientifiques et stratégiques.

La communauté internationale a prouvé qu'elle pouvait élaborer des ententes internationales efficaces sur l'environnement, lorsqu'elle percevait une menace de destruction constante de l'environnement. Le présent rapport démontre l'importance d'une action rapide. Par exemple, un report de

vingt ans aurait entraîné un amenuisement possiblement catastrophique de la couche d'ozone. L'établissement de liens concrets entre les décideurs internationaux et la communauté scientifique a décisivement contribué à une action rapide. L'adaptabilité du processus d'élaboration du Protocole a joué un rôle peut-être tout aussi important. Le Protocole de 1987 représentait un pas en avant crucial, mais son insuffisance est rapidement devenue manifeste. Dans l'établissement des futures ententes internationales, on pourra considérer le Protocole de Montréal comme un modèle de processus efficace d'intégration des nouvelles informations scientifiques et techniques relatives aux avantages et aux coûts d'une modification des calendriers de réduction.

# Références

- Adams, Richard M., et Robert D. Rowe. «The Economic Effects of Stratospheric Ozone Depletion on U.S. Agriculture: A Preliminary Assessment.» *Journal of Environmental Management*, vol. 30, (1990). pp. 321-335.
- Andrady, A.L., M.B. Amin, S.H. Hamid, X. Hu, et A. Torikai. «Effects of Increased Solar Ultraviolet Radiation on Materials.» *Ambio*, vol. 24, n° 3, (1995). pp. 91-196.
- Banque mondiale. (1996). Atlas de la Banque mondiale 1996. Washington, D.C.
- Caldwell, M.M., Tevini M. Teramura, J.F. Bomman, L.O. Bjorn, et G. Kulandaivelu. «Effects of Increased Solar Ultraviolet Radiation on Terrestrial Plants.» *Ambio*, vol. 24, n° 3, (1995). pp. 166-173.
- Commission économique des Nations Unies pour l'Europe. (1995). *The Chemical Industry in 1994: Annual Review, Production and Trade Statistics 1991-1993*.
- French, H.F. «Learning from the Ozone Experience,» dans L.R. Brown (éd.), *State of the World*. Norton, New York, (1997). pp. 151-171.
- Hader, D.P., R.C. Worrest, H.D. Kumar, et R.C. Smith. «Effects of Increased Solar Ultraviolet Radiation on Aquatic Ecosystems.» *Ambio*, vol. 24, n° 3, (1995). pp. 174-180.
- Limburg, H., Raj Kumar, et D. Bachani. «Forecasting Cataract Blindness —and Planning to Combat It.» *World Health Forum*, vol. 17, (1996). pp. 15-20.
- Longstreth, J.D., F.R. de Gruijl, Y. Takizawa, et J.C. van der Leun. «Effects of Increased Solar Ultraviolet Radiation on Human Health.» *Ambio*, vol. 24, n° 3, (1995). pp. 153-165.
- Lubin, Dan, et Osmund Holm-Hansen. «Atmospheric Ozone and the Biological Impact of Solar Ultraviolet Radiation.» *Encyclopedia of Environmental Biology*, vol. 1, (1995). page 164.
- McDevitt, Thomas M. (1996). *World Population Profile: 1996*. U.S. Bureau of the Census Report WP/96. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Minassion, D.C., V. Mehra, et G.J. Johnson. «Mortality and Cataract: Findings from a Population-Based Longitudinal Study.» *Bulletin of the World Health Organization*, vol. 70, n° 2, (1992). pp. 219-223.
- Nations Unies, Annuaire statistique du commerce international pour 1993.
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture *Fishery Statistics: Catches and Landings*, vol. 76 (1993).
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture *Fishery Statistics: Commodities*, vol. 77 (1993).
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (1995). *Commodity Review and Outlook 1994-95*.
- Organisation mondiale pour la santé. *World Health Report: 1996*.
- Organisation mondiale pour la santé. *Cancer Incidence in Five Continents*, Vol. VI (1992). Publication scientifique du CIRC n° 120. Centre international de recherche sur le cancer, Lyon, France.
- Podgor, J.M. et al. «Lens Changes and Survival in a Population-Based Study.» *New England Journal of Medicine*, vol. 313, (1985). pp. 1438-1444.
- Programme des Nations Unies pour l'environnement (1991). *Montreal Protocol: 1991 Assessment Report of the Halons Technical Options Committee*. Décembre.
- Programme des Nations Unies pour l'environnement (1994). *Report of the Economic Options Committee*.
- Programme des Nations Unies pour l'environnement (1994). *Report of the Halon Fire Extinguishing Agents Technical Options Committee*. Décembre.
- Rowlands, Ian. (1995). *The Politics of Global Atmospheric Change*. Manchester University Press.
- Sullivan, J.H., et A.H. Teramura. «The Effects of Ultraviolet-B Radiation on Loblolly Pine: Growth of Field-Grown Seedlings.» *Trees*, vol.6, (1992). pp.115-120.

Tang, X., et S. Madronich. «Effects of Increased Solar Ultraviolet Radiation on Tropospheric Composition and Air Quality.» *Ambio*, vol. 24, n° 3, (1995). pp. 188-190.

Teramura, A.H., J.H. Sullivan, et J. Lydon. «Effects of UV-B Radiation on Soybean Yield and Seed Quality: A Six-Year Field Study.» *Physiology of Plants*, vol. 80, (1990). pp. 5-11.

Thylefors, B., A.-D. Négrel, R. Pararajasegaram, et K.Y. Dadzie. «Global Data on Blindness.» *Bulletin of the World Health Organization*, vol. 73, n° 1, (1995). pp. 115-121.

U.S. Bureau of the Census. World Population Profile: 1996. Washington, D.C.

U.S. Central Intelligence Agency. (1995). *The World Factbook 1995-96*. Brassey's, Washington, D.C.

U.S. Environmental Protection Agency. (1987). Regulatory Impact Analysis: Protection of Stratospheric Ozone, Vol. I, Regulatory Impact Analysis Document. Préparé pour le Stratospheric Protection Program. Washington, D.C.

U.S. Environmental Protection Agency. (1992). Regulatory Impact Analysis: Compliance with Section 604 of the Clean Air Act for the Phaseout of Ozone Depleting Chemicals. Préparé pour la U.S. Environmental Protection Agency. Juillet 1992.

U.S. Environmental Protection Agency. (1996). *The Benefits and Costs of the Clean Air Act: 1970 to 1990*.

Worrest, Robert C., et Donat P. Hads. «Overview of the Effects of Increased Solar UV on Aquatic Microorganisms.» *Photochemistry and Photobiology*, vol. 65(2), (1997). page 258.

# Annexe A

## Estimation des effets sanitaires

### INTRODUCTION

La présente section indique la méthode employée pour estimer les effets sur la santé humaine du Protocole de Montréal. Elle présente en dernier lieu les valeurs trouvées dans des publications pour les effets sanitaires dans les pays industrialisés.

### MODÉLISATION DES EFFETS ATMOSPHÉRIQUES

Le modèle utilisé avait été mis au point pour l'Environmental Protection Agency des États-Unis afin d'évaluer les effets atmosphériques du Protocole de Montréal et du scénario ne comportant aucune réglementation. (Ce modèle a servi à toutes les études d'impact de la réglementation effectuées aux États-Unis et au Canada.)

Les données sur les émissions annuelles de substances appauvrissant la couche d'ozone dans le scénario du Protocole de Montréal et dans celui ne comportant aucune réglementation ont été entrées dans le modèle, qui a déterminé la concentration mondiale d'ozone pour chaque année. Le pourcentage d'appauvrissement de la couche d'ozone a ensuite été calculé pour les deux scénarios. Ces données ont été le point de départ qui a permis au modèle de déterminer les effets sanitaires.

Le changement annuel dans la concentration mondiale d'ozone a servi à calculer, à l'aide d'une formule employée dans l'étude d'impact de la réglementation effectuée pour l'EPA des États-Unis<sup>1</sup>, le pourcentage de changement dans le rayonnement UV-B pour le spectre des effets dans la région centrale des États-Unis (à environ 35 degrés de latitude Nord). Ce changement, pondéré pour divers spectres d'effets, a été calculé, par année, pour la zone de latitude s'étendant de 40° N à 30° N.

Des valeurs ont été obtenues pour d'autres zones de latitude en se fondant sur les changements dans le rayonnement UV-B calculé pour les mesures de l'ozone stratosphérique de 1979 à 1993.<sup>2</sup> Les changements relatifs dans le rayonnement UV-B entre le 35° degré de latitude Nord et d'autres latitudes ont servi à calculer annuellement pour d'autres zones de latitude les changements mesurés pour la première zone.

L'on a donc présumé que les futurs changements par latitude dans le rayonnement UV-B suivraient les tendances antérieures. En fait, plus la couche d'ozone s'appauvrira, il est probable que l'intensification du rayonnement UV-B aux hautes latitudes s'accroîtra dans une proportion plus grande qu'aux basses latitudes. Les changements prévus représentent une estimation modérée des conséquences du Protocole de Montréal.

### MODÉLISATION DES EFFETS SANITAIRES

#### Effets du rayonnement UV-B

Les données sur les changements dans le rayonnement UV-B ont été entrées dans le tableau du modèle utilisé pour estimer les effets sanitaires. Ce modèle consistait essentiellement en une série de tableaux comprenant des cohortes de naissance de 5 ans, de 1890 à 2100, et des groupes d'âge de 5 ans allant de 0 à 4 et de 90 à 94 ans. Il y avait des tableaux distincts pour chacune des zones de latitude suivantes :

|                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| de 70° N à 60° N. | de 0° à 20° S.    |
| de 60° N à 50° N. | de 20° S à 30° S. |
| de 50° N à 40° N. | de 30° S à 40° S. |
| de 40° N à 30° N. | de 40° S à 50° S. |
| de 30° N à 20° N. | de 50° S à 60° S. |
| de 20° N à 0°     |                   |

L'exposition annuelle au rayonnement UV-B (pondérée pour les différents spectres selon les effets sanitaires estimés) dans le scénario du Protocole de Montréal et celle dans le scénario ne comportant aucune réglementation étaient les deux premières composantes du modèle. D'autres composantes sont décrites ci-dessous.

#### Incidence des effets sanitaires

Ensuite, une série de modèles ont été utilisés pour déterminer l'incidence des divers effets sanitaires si la couche ne s'appauvrisait pas. Les taux d'incidence de cancer cutané (exprimés en nombre de cas par 100 000) ont été calculés à l'aide des données publiées par le Centre international de recherches sur le cancer<sup>3</sup>. Un modèle de régression a été utilisé pour déterminer l'incidence des effets sanitaires par latitude et groupe de population.

1 *Regulatory Impact Analysis: Protection of Stratospheric Ozone*, U.S. Environmental Protection Agency, 1987, vol. II, Annexe E, p. E-11.

2 Les expositions annuelles aux rayons UV-B ont été calculées d'après les mesures de l'ozone stratosphérique effectuées de 1979 à 1993. *Environmental Effects of Ozone Depletion: 1994 Assessment*, Programme des Nations Unies pour l'environnement, novembre 1994, chapitre 1, tableau 1.2, p. 20.

3 *Cancer Incidence in Five Continents*, Organisation mondiale de la santé, Centre international de recherches sur le cancer, vol. VI, n° 120, 1992.

Les paramètres démographiques du modèle de régression utilisé pour calculer l'incidence étaient la latitude, la couleur de la peau (cinq catégories), l'espérance de vie moyenne, le développement économique et les conventions en matière d'habillement (surtout celles dictées par la religion). Ce modèle a servi à prédire les taux de base d'incidence de cancer chez les populations pour lesquelles les données étaient inexistantes ou douteuses parce qu'on craignait qu'elles n'avaient pas toutes été communiquées ou que tous les cas n'avaient pas été diagnostiqués.

Les taux d'incidence ont été choisis à l'aide des meilleures données existantes. Par exemple, ceux provenant des pays industrialisés ont généralement été utilisés par crainte que les pays en développement ne communiquent pas toutes leurs données. Des exceptions ont été faites lorsque la population de base d'un pays industrialisé vivant dans une certaine zone de latitude et appartenant à une race de couleur était relativement faible. Les taux d'incidence de cancer cutané ont été calculés pour les populations suivantes en fonction de leur race de couleur :

- Race blanche
- Race noire
- Asiatiques
- Autres groupes de population (séparément pour les hémisphères nord et sud).

Les taux d'incidence pour les cancers cutanés sans mélanome étaient plus élevés que pour les cancers avec mélanome; en général, ils variaient davantage selon la latitude. Les taux d'incidence augmentaient généralement en direction des pôles, et ils étaient les plus élevés aux hautes latitudes de l'hémisphère sud pour toutes les populations autres que les Asiatiques (qui sont sous-représentés à ces latitudes). Les valeurs élevées dans la zone de latitude de 0° à 20° S pour toutes les populations constituent une anomalie. C'est chez les populations de race blanche et d'autres populations de l'hémisphère sud que les taux d'incidence de cancer cutané sans mélanome étaient les plus élevés. Ces taux étaient généralement plus forts chez les hommes que chez les femmes. Dans toutes les populations, l'incidence augmentait avec l'âge.

Pour calculer séparément les taux d'incidence de cancers des cellules basales et des cellules

squameuses, les taux pour le cancer cutané sans mélanome ont été respectivement multipliés par 0,8 et 0,24.

Les taux d'incidence de cancer cutané avec mélanome ne variaient pas de façon aussi marquée selon la latitude. Dans l'hémisphère sud, ils étaient généralement plus élevés que dans l'hémisphère nord aux mêmes latitudes, notamment dans la zone de 0° à 20° S. Les taux d'incidence étaient les plus faibles chez les Asiatiques et dans d'autres groupes de population de l'hémisphère nord, et les plus élevés dans les populations de race blanche et d'autres groupes de l'hémisphère sud. Ils étaient également plus élevés chez les hommes que chez les femmes et augmentaient avec l'âge dans toutes les populations.

Dans le cas des cataractes, les taux d'incidence de base dans les pays industrialisés ont été utilisés pour les pays en développement. Les cataractes sont dues à un certain nombre de facteurs, dont l'exposition aux rayons UV-B, mais bon nombre d'entre eux, comme la malnutrition et le diabète, sont minimisés dans les pays industrialisés. Les taux d'incidence de cataractes causées par l'exposition aux rayons UV-B ont donc été calculés d'après les taux pour les pays industrialisés. Cette estimation est modérée parce que les populations des pays en développement peuvent être davantage exposées aux rayons UV-B que celles des pays industrialisés.

Les données sur l'incidence de cataractes ont été obtenues de l'American Academy of Ophthalmology pour la Beaver Dam Eye Study. Les nombres de cas par 100 000 étaient les suivants (les groupes d'âge sont entre parenthèses) : hommes, 3 900 (55-64), 14 300 (65-74) et 38 800 (75+); femmes, 10 000 (55-64), 23 500 (65-74) et 45 900 (75+). Ces données ont été recueillies pour les cas où les cataractes étaient apparentes dans l'œil le plus touché.

Les opinions sont partagées au sujet du nombre de cas de cataractes attribuables à l'exposition aux rayons UV-B, même dans les pays où d'autres importants facteurs causals sont minimisés. Les uns disent que la lumière solaire est le principal facteur causal<sup>5</sup>, et d'autres, à l'opposé, qu'elle n'est pas un facteur important<sup>6</sup>. Les conclusions suivantes ont été tirées des preuves existantes<sup>7</sup> :

4 1994 Assessment, PNUE, p. 16.

5 R.W. Young, «Optometry and the Presentation of Visual Health», *Ophthalmology Visual Science*, vol. 70, 1993. p. 255-262.

6 J.J. Harding, «Physiology, Biochemistry, Pathogenesis and Epidemiology of Cataract», *Current Opinion in Ophthalmology*, vol. 3, 1992. p. 3-12.

7 Paul J. Dolin, «Ultraviolet Radiation and Cataract: A Review of the Epidemiological Evidence», *British Journal of Ophthalmology*, vol. 78, 1994. p. 478-482.

- Il existe suffisamment de preuves expérimentales selon lesquelles l'exposition à des sources artificielles de rayons UV-B peut opacifier la lentille de l'œil des animaux de laboratoire.
- Il existe seulement des preuves restreintes étayant que l'exposition aux rayons UV-B opacifie la substance corticale chez l'humain.
- Il existe seulement des preuves restreintes étayant que l'exposition aux rayons UV-B cause la formation de cataractes subcapsulaires chez l'humain.
- Les preuves épidémiologiques portent à croire que les cataractes nucléaires ne sont pas causées par l'exposition aux rayons UV-B du soleil.

Ces conclusions indiquent que tous les cas de cataractes ne sont pas causés par le rayonnement UV-B. Dans le présent rapport, le pourcentage de cas de cataractes attribuables au rayonnement UV-B dans le scénario où la couche d'ozone ne s'appauvrit pas a été établi à 20 %, et les taux d'incidence mentionnés ci-dessus ont été rajustés en conséquence. Ce rajustement est modéré, mais en raison du débat actuel sur le pourcentage de cas de cataractes attribuables au rayonnement UV-B, tout rajustement est incertain.

## DONNÉES DÉMOGRAPHIQUES

Les données démographiques pour 1990 ont été calculées par groupe de population, pour les pays industrialisés et les pays en développement et, dans le cas des cancers avec mélanome et des cataractes, par sexe, pour chaque latitude. Elles ont été rajustées en fonction des taux de croissance historiques et prévus dans les pays en développement ainsi que dans les pays industrialisés. Ces taux étaient les suivants : pour les pays en développement, 2,0 % (avant 1960), 2,4 % (de 1960 à 1970), 2,2 % (de 1970 à 1980), 2,0 % (de 1980 à 1990), 1,7 % (de 1990 à 2000), 1,4 % (de 2000 à 2010) et 1,2 % (après 2010); pour les pays industrialisés : 1,2 % (avant 1960), 1,0 % (de 1960 à 1970), 0,7 % (de 1970 à 1980), 0,6 % (de 1980 à 1990), 0,4 % (de 1990 à 2000), 0,3 % (de 2000 à 2010) et 0,2 % (après 2010). Pour simplifier cette hypothèse, le profil d'âge des populations a été maintenu constant pendant ces périodes. Les données démographiques mondiales entrées dans le modèle provenaient d'un certain nombre de sources<sup>8</sup>.

## EFFETS SANITAIRES

Les expositions répétitives aux rayons UV-B (pondérées pour les effets sanitaires) ont servi à calculer le pourcentage d'augmentation de l'incidence des effets sanitaires dans le scénario ne comportant aucune réglementation et celui du Protocole de Montréal; un coefficient biologique d'incidence a été utilisé pour chaque effet sanitaire (et pour chaque sexe dans le cas des cancers avec mélanome et des cataractes). Ces calculs ont été effectués pour chaque groupe d'âge de 5 ans, par cohorte de naissance, et par zone de latitude pour tous les groupes de population.

Des modèles de ce genre s'ajustent probablement au développement de cancers des cellules squameuses, l'une des formes de cancer cutané avec mélanome (lentigo maligna melanoma), et des cataractes<sup>9</sup>. Le développement de certaines formes de cancer cutané avec mélanome (mélanome superficiel extensif et mélanome nodulaire) semble davantage relié à des expositions intermittentes et intenses (insolation) ou à des expositions pendant l'enfance. Le premier type de cancer peut être corrélé avec des expositions répétitives aux rayons UV-B. Un «premier épisode» suivi d'un certain nombre d'autres peut contribuer au développement du cancer des cellules basales. De nouveau, ces épisodes peuvent être corrélés avec une exposition répétitive. Les modèles d'exposition répétitive semblent être les seuls permettant d'évaluer les effets sanitaires. Bien qu'imparfaits, ils correspondent à la méthode normalisée employée pour déterminer les effets sanitaires de l'intensification du rayonnement UV-B.

Voici l'équation utilisée pour évaluer les effets :

$$I = (E + 1)b - 1,$$

où :

I = nombre fractionnaire indiquant le changement dans l'incidence

E = nombre fractionnaire indiquant le changement dans l'exposition (durée de vie moyenne)

b = coefficient dose-réponse, ou coefficient biologique d'incidence (CBI).

Les coefficients biologiques d'incidence utilisés dans l'analyse ont été calculés pour la population de race blanche des États-Unis et employés dans

8 Les données démographiques ont été tirées de l'Atlas de la Banque mondiale pour 1996. Les renseignements détaillés sur les caractéristiques démographiques, comme les proportions dans les groupes, ont été tirés de The World Factbook 1995-1996, U.S. Central Intelligence Agency, Washington, D.C. Les taux de croissance démographique ont été tirés de la publication World Population Profile: 1996, U.S. Bureau of the Census, Washington, D.C.

9 Voir 1994 Assessment, PNUE, p. 16-20.

### Coefficients biologiques d'incidence

| Effets sanitaires              | Hommes | Femmes | Spectre des effets |
|--------------------------------|--------|--------|--------------------|
| Cancer cutané avec mélanome    | 0,41   | 0,51   | ADN                |
| Cancer des cellules basales    | 1,4    | 1,4    | CCUP-h             |
| Cancer des cellules squameuses | 2,5    | 2,5    | CCUP-h             |
| Cataractes                     | 0,225  | 0,225  | ADN                |

les études d'impact de la réglementation réalisées pour les États-Unis et le Canada. Pour simplifier l'hypothèse, on a présumé que le pourcentage de changement dans l'incidence d'un effet sanitaire était le même pour tous les groupes de population. Les CBI suivants ont donc été utilisés<sup>10</sup> :

Les opinions sont partagées au sujet de la mesure dans laquelle l'exposition aux rayons UV-B influe sur la formation de cataractes. Tel qu'indiqué précédemment, les taux d'incidence aux États-Unis ont été choisis pour minimiser les cas de cataractes dus à d'autres causes (par exemple, la malnutrition et le diabète). Un facteur de 0,2 a également été utilisé pour calculer les cas de cataractes uniquement dus aux rayons UV-B. Toutefois, il existe encore une incertitude en ce qui concerne l'effet de l'intensification du rayonnement UV-B sur l'augmentation de l'incidence de base des cataractes (causées par les rayons UV-B). Par conséquent, un coefficient biologique d'incidence de 0,225 a été utilisé pour calculer l'effet minimum sur les cataractes, et un coefficient de 0,7, pour l'effet maximum<sup>11</sup>.

Les nombres de cas en fonction des effets sanitaires ont été calculés séparément pour les deux scénarios. Les chiffres pour les deux scénarios ont été déduits les uns des autres, et les résultats ont été indiqués pour chaque année de 1985 à 2060.

## MORTALITÉS

On a estimé que de 0,1 à 1,0 % de tous les cas de cancer cutané sans mélanome étaient mortels. De ces mortalités, 75 % ont été attribuées au cancer des cellules squameuses, et 25 % au cancer des

cellules basales. Ces hypothèses sont conformes aux chiffres actuels utilisés par l'EPA des États-Unis. D'après le PNUE, la valeur maximale des mortalités dues au cancer cutané sans mélanome est également de 1 %<sup>12</sup>.

Un intervalle de 10 % à 20 % a été choisi pour les cas de cancer cutané avec mélanome causant la mort. La valeur maximale se rapproche probablement du taux actuel de mortalité due au cancer cutané avec mélanome, mais il existe des preuves montrant que les taux de survie tendent à augmenter, ce qui porte à croire que la probabilité de mortalité sera plus faible à l'avenir<sup>13</sup>. La valeur minimale de 10 % a donc été utilisée.

## ÉVALUATION DES EFFETS SUR LA SANTÉ

Dans notre rapport, nous n'évaluons pas les effets sanitaires. Il existe pour ce faire diverses méthodes, fondées sur la volonté de payer pour éviter les risques associés aux effets sanitaires. Malheureusement, relativement peu de pays – et généralement des pays industrialisés – ont appliqué ces méthodes. Il n'existe aucune technique permettant d'évaluer à l'échelle mondiale les effets sanitaires évités à la suite de la mise en oeuvre du Protocole de Montréal.

Les sections suivantes indiquent les valeurs appliquées aux effets sanitaires dans les pays industrialisés. Bien que ces mesures permettent d'estimer la valeur des effets sanitaires du Protocole de Montréal dans les pays industrialisés, il n'y a aucune méthode généralement acceptée pour étendre ces valeurs aux pays en développement.

10 Ces CBI ont été utilisés dans la publication *Regulatory Impact Analysis: Protection of Stratospheric Ozone*, Environmental Protection Agency des États-Unis, 1987, Annexe E.

11 Le coefficient de 0,225, utilisé par l'EPA des États-Unis dans l'étude d'impact de la réglementation réalisée en 1987, a été tiré de la publication de R. Hiller, R. Sperduto et F. Eder, «Epidemiological Associations with Cataract in the 1971-1972 National Health and Nutrition Examination Survey», *American Journal of Epidemiology*, vol. 118, n° 2, 1983. Le coefficient de 0,7 a été calculé par J.C. van der Leun et F.R. de Gruijl, «Influences of Ozone Depletion on Human and Animal Health», *UV-B Radiation and Ozone Depletion*, p. 95-123.

12 *1994 Assessment*, PNUE, p. 16.

13 *Trends in Cancer Incidence and Mortality*, International Agency for Research on Cancer, Lyon, J. Scotto, H. Pitcher et J.A.H. Lee, «Indications of Future Decreasing Trends in Skin Melanoma Mortality Among Whites in the United States», *International Journal of Cancer*, vol. 49, 1993; p. 1-8, 1991.

## VOLONTÉ DE PAYER POUR ÉVITER LE RISQUE POSÉ À LA SANTÉ HUMAINE

Par leurs choix de carrière et autres (p. ex., respect des limites de vitesse, port de la ceinture de sécurité), les gens démontrent constamment leur volonté d'accepter le risque de blessure ou de décès. Les gouvernements, eux aussi, doivent prendre des décisions touchant les risques courus par ces individus et peuvent s'inspirer à ce sujet des préférences manifestées par les citoyens.

La technique de mesure de la volonté de payer (VDP) consiste à évaluer le changement de bien-être qui résulte d'une modification de la probabilité de risque de blessure ou de décès. Dans ce dernier cas, la technique VDP mesure la quantité de biens et de services à laquelle une personne est disposée à renoncer pour réduire légèrement le risque de décès. En étendant cette quantité à l'ensemble de la population, on obtient une estimation de la valeur conférée à une réduction de risque équivalant à la préservation d'une vie. Les économistes reconnaissent généralement que la méthode VDP est la meilleure technique pour mesurer la valeur d'une réduction du risque<sup>14</sup>.

## VALEUR DE LA RÉDUCTION DU RISQUE À L'ÉGARD DE LA VIE HUMAINE

La méthode la plus efficace pour estimer les valeurs d'une réduction du risque à l'égard de la vie humaine fait appel aux données du marché de la main-d'œuvre. Cette technique impute une valeur à la sécurité en estimant les différences de revenu entre, d'une part, les travailleurs occupant

des emplois risqués et, d'autre part, ceux qui exercent un travail plus sûr. Cette démarche s'est avérée la plus probante dans les études économiques, et la majorité des pays industrialisés y recourent dans leurs études coûts-avantages sur le risque.

Il y a eu récemment cinq recensions documentaires des études concernant l'estimation de cette valeur<sup>15</sup>. Le tableau A-1 en donne les résultats. Les auteurs postulent un intervalle de variation qu'ils considèrent pertinent d'appliquer aux décisions stratégiques modifiant légèrement les risques de décès pour les membres de la société.

Ces recensions ont généralement couvert le même fonds documentaire constitué d'études américaines et britanniques. Viscusi (1992) inclut quelques sources ne figurant pas dans les autres recensions. Chaque auteur a choisi d'exclure certaines estimations, jugées potentiellement erronées ou insuffisamment étayées. La majorité des estimations restantes font appel à la méthode de l'analyse portant sur l'arbitrage salaire-risque, exposée précédemment, pour estimer la valeur d'un décès statistique.

Miller englobe dans sa recension la même série fondamentale d'études sur l'arbitrage salaire-risque, et y ajoute d'autres études basées sur l'analyse des habitudes de consommation (qui produisent généralement des estimations inférieures) et les techniques de sondage. Pour corriger les erreurs systématiques perçues dans bon nombre des études sur l'arbitrage salaire-risque, il y apporte divers ajustements (différences du risque dans les sources de données, absence des blessures non mortelles dans l'analyse de risque, uniformisation des horizons temporels ou des taux d'actualisation d'une

**TABEAU A-1 Valeur de la réduction du risque à l'égard de la vie humaine, selon diverses recensions d'études internationales (en millions de \$ amér.) de 1997**

| Auteur(s) de la recension (année) | Bas    | Haut    |
|-----------------------------------|--------|---------|
| Viscusi (1992)                    | 3,1 \$ | 7,0 \$  |
| Cropper et Freeman (1991)         | 2,3 \$ | 6,2 \$  |
| Miller (1990) (\$ après impôt)    | 2,0 \$ | 3,9 \$  |
| Fisher et al. (1989)              | 2,3 \$ | 10,1 \$ |
| Miller (1989) (\$ après impôt)    | 1,6 \$ | 3,9 \$  |

<sup>14</sup> Cancer Incidence in Five Continents, Organisation mondiale de la santé, *Centre international de recherches sur le cancer*, vol. VI, n° 120, 1992.

<sup>15</sup> W. Kip Viscusi, *Fatal Tradeoffs: Public and Private Responsibilities for Risk*. Oxford University Press, New York, 1992; M.L. Cropper et A.M. Freeman III, «Environmental Health Effects», *Measuring the Demand for Environmental Quality*, J.B. Braden et C.D. Kolstad (éd.), North Holland, New York, 1991; T.R. Miller, «The Plausible Range for the Value of Life — Red Herrings Among the Mackerel», *Journal of Forensic Economics*, vol. 3, n° 3, 1990, p. 25; A. Fisher, L.G. Chestnut et D.M. Violette, «The Value of Reducing Risks of Death: A Note on New Evidence», *Journal of Policy Analysis and Management*, vol. 8, n° 1, 1989; pp. 88-100, T.R. Miller, «Willingness to Pay Comes of Age: Will the System Survive?», *Northwestern University Law Review*, vol. 83, 1989, pp. 876-907.

étude à l'autre, différences entre les risques réels et les risques perçus; salaire en dollars après impôt) qui ont tendance à abaisser les valeurs estimatives de la vie statistique. Par exemple, la majorité des études sur l'arbitrage salaire-risque analysent comment les salaires avant impôt varient avec le risque professionnel. Cependant, le traitement après impôt représente une mesure plus appropriée pour évaluer le compromis fait par l'individu pour compenser l'accroissement de risque. L'emploi du salaire après impôt réduit la valeur estimative de la vie. Ces ajustements, ainsi que les autres effectués par Miller pour corriger les erreurs systématiques éventuelles, expliquent les valeurs quelque peu inférieures figurant au tableau A-1.

La majorité des études pertinentes portent sur un groupe relativement homogène de travailleurs, principalement du secteur industriel, qui acceptent de plein gré une hausse relativement faible du risque de décès pour obtenir un salaire plus élevé. Toutefois, aux fins de l'analyse du Protocole de Montréal, les estimations peuvent sous-évaluer la réduction du risque parce que, dans le scénario ne comportant aucune mesure de réglementation, le risque accru de décès n'est pas accepté volontairement, contrairement au scénario du marché de la main-d'œuvre. La compensation devant être versée aux individus qui acceptent volontairement ces risques peut être plus élevée, ce qui nous amène à accorder à la réduction du risque une valeur supérieure aux valeurs citées dans les études précédentes.

## **VALEUR DES EFFETS SANITAIRES QUANTIFIABLES NON MORTELS**

Il existe certaines données permettant d'évaluer les effets sanitaires non mortels reliés au Protocole de Montréal dans les pays en développement.

Rowe et Neithercut<sup>16</sup> estiment à 21 100 \$, aux États-Unis, la volonté de payer pour éviter un cas de cataracte. Leur estimation englobe la valeur des pertes entraînées par l'apparition de la cataracte (hausse des frais médicaux, augmentation de la perte de travail, accroissement des coûts pour les corvées domestiques et les soins, augmentation des frais non payés pour les corvées domestiques et les soins, pertes associées à un plus grand inconfort et à une baisse des activités de loisir, etc.).

Cependant, leur estimation est rendue quelque peu obsolète par les récents progrès dans le traitement des cataractes, qui ont abaissé les frais médicaux de la procédure (environ 1 000 \$ par œil) et la durée de la période de récupération postopératoire, avec les réductions qui vont de pair quant au coût des soins auxiliaires et à une moindre diminution des activités de loisir. La volonté de payer pour éviter une cataracte serait donc, en réalité, inférieure aux 21 100 \$ dollars indiqués ci-dessus.

L'Environmental Protection Agency américaine a établi des estimations de coût des lésions pour les cancers cutanés, à l'aide de groupes de discussion.<sup>17</sup> Ces groupes ont déterminé les frais associés aux traitements médicaux, à la perte de travail et aux mesures de prévention pour trois types de cancer typiques (pondérés par gravité) : le cancer des cellules basales, le cancer des cellules squameuses et le mélanome malin cutané. On a obtenu des estimations respectives de 5 900 \$, 10 400 \$ et 22 200 \$. À noter que ces valeurs représentent, pour chaque type de cancer, une moyenne pondérée de cas variant en gravité. Les cas individuels retenus pour l'établissement des moyennes variaient entre 4 000 \$ et 160 000 \$.

16 R.D. Rowe et T.N. Neithercut, *Economic Assessment of the Impacts of Cataracts*, préparé pour l'Environmental Protection Agency des États-Unis, Office of Policy, Planning and Evaluation, Washington, D.C., 1987.

17 *Regulatory Impact Analysis: Protection of Stratospheric Ozone*, U.S. Environmental Protection Agency, 1987, Annexe E.

# Annexe B

## Calcul des coûts

### SOMMAIRE DES CALCULS POUR LES AÉROSOLS

|                                                   | Pays industrialisés                | Pays visés au paragr. 5(1)              |
|---------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|
| Consommation en 1986 (tonnes)                     | 280 000                            | 20 000                                  |
| Taux de croissance sans mesures de réglementation | 1 %                                | 10 % jusqu'en 2005<br>5 % jusqu'en 2060 |
| Nbre total de tonnes déplacées (1987-2060)        | 29,9 millions                      | 12,5 millions                           |
| Coût estimatif par kilogramme                     | (0,88 \$)                          | 0,50 \$                                 |
| Recherche-développement sur les aérosols-doseurs  | 2,5 milliards \$ (dollars de 1997) |                                         |

#### Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)

35 % dans l'hypothèse d'une estimation de -0,88 \$ pour les pays industrialisés

35 % dans l'hypothèse de coûts supplémentaires nuls, les investissements étant compensés par les futures économies de coûts

30 % dans l'hypothèse où la limite supérieure de l'écart de variation des coûts marginaux supplémentaires est fixée à 2,68 \$ par kilogramme, d'après le GETE (1996).

La moyenne pondérée est de 0,50 \$ par kilogramme.

#### Coûts totaux

|                                           |                           |
|-------------------------------------------|---------------------------|
| Pays industrialisés                       | (9,0)\$                   |
| Coûts des aérosols-doseurs                | 2,5                       |
| Coûts nets pour les pays industrialisés   | (6,5)                     |
| Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1) | 1,2                       |
| <b>Total à l'échelle mondiale</b>         | <b>(5,3 \$) milliards</b> |

## SOMMAIRE DES CALCULS POUR LES MOUSSES FLEXIBLES ET RIGIDES

|                                                   | Pays industrialisés                    | Pays visés au paragr. 5(1)             |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| Consommation en 1986 (tonnes)                     | 241 793                                | 25 607                                 |
| Taux de croissance sans mesures de réglementation | 2 % jusqu'en 2020<br>1 % jusqu'en 2060 | 2 % jusqu'en 2020<br>1 % jusqu'en 2060 |
| Nbre total de tonnes déplacées (1987-2060)        | 34,0 millions                          | 3,1 millions                           |
| Coût estimatif par kilogramme                     | 1,48 \$                                | 4,90 \$                                |

### Coûts pour les pays industrialisés

|                     | Proportion | Coût par kg |
|---------------------|------------|-------------|
| Mousse flexible     | 22,6       | 0           |
| Polyuréthane rigide | 55,7       | 2,01 \$     |
| Polystyrène rigide  | 14,0       | 1,48 \$     |
| Autre               | 7,6        | 2,00 \$     |

La moyenne pondérée est de 1,48 \$ par kilogramme.

### Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)

50 % dans l'hypothèse d'une estimation de 1,48 \$ pour les pays industrialisés.

50 % dans l'hypothèse où la limite supérieure de l'écart de variation du coût marginal supplémentaire est fixée à 15,61 \$ par kilogramme, selon le GETE (1996).

La moyenne pondérée est de 4,90 \$.

### Coûts totaux

|                                           |                          |
|-------------------------------------------|--------------------------|
| Pays industrialisés                       | 14,8 \$                  |
| Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1) | 3,1                      |
| <b>Total à l'échelle mondiale</b>         | <b>17,9 milliards \$</b> |

## SOMMAIRE DES CALCULS POUR LA RÉFRIGÉRATION ET LA CLIMATISATION

|                                                   | Pays industrialisés | Pays visés au paragr. 5(1)             |
|---------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------|
| Consommation en 1986 (tonnes)                     | 223 000             | 30 000                                 |
| Taux de croissance sans mesures de réglementation | 2 %                 | 6 % jusqu'en 2020<br>2 % jusqu'en 2060 |
| Nbre total de tonnes déplacées (1987-2060)        | 40,1 millions       | 33,6 millions                          |
| Coût estimatif par kilogramme                     | 4,62 \$             | 8,15 \$                                |

### Coûts pour les pays industrialisés

|                                           | Proportion | Coût par kg |
|-------------------------------------------|------------|-------------|
| Réfrigération domestique                  | 6          | 5,93 \$     |
| Frigorigènes à faible pression (R-11)     | 6,7        | 5,93 \$     |
| Frigorigènes à haute pression (R-12)      | 3,4        | 5,93 \$     |
| Climatiseurs mobiles                      | 32,4       | 3,70 \$     |
| Réfrigération commerciale et industrielle | 51,2       | 4,81 \$     |

La moyenne pondérée est de 4,62 \$ par kilogramme.

### Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)

60 % dans l'hypothèse d'une estimation de 4,62 \$ pour les pays industrialisés.

10 % dans l'hypothèse d'une estimation correspondant à 1,5 fois la valeur de 4,62 \$ pour les pays industrialisés.

30 % dans l'hypothèse où la limite supérieure de l'écart de variation du coût marginal supplémentaire est de 15,61 \$ par kilogramme, selon le GETE (1996)

La moyenne pondérée est de 8,15 \$.

### Coûts totaux

|                                             |                          |
|---------------------------------------------|--------------------------|
| Pays industrialisés                         | 47,7 \$                  |
| Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)   | 47,7                     |
| <b>Total des coûts à l'échelle mondiale</b> | <b>95,4 milliards \$</b> |

## SOMMAIRE DES CALCULS POUR LES SOLVANTS À BASE DE CFC

|                                                   | Pays industrialisés                    | Pays visés au paragr. 5(1)             |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| Consommation en 1986 (tonnes)                     | 167 200                                | 9 000                                  |
| Taux de croissance sans mesures de réglementation | 5 % jusqu'en 2010<br>2 % jusqu'en 2060 | 5 % jusqu'en 2010<br>2 % jusqu'en 2060 |
| Nbre total de tonnes déplacées (1987-2060)        | 61 millions                            | 4,2 millions                           |
| Coût estimatif par kilogramme                     | 1,13 \$                                | 2,82 \$                                |

### Coûts pour les pays industrialisés

Des économies de coût de 1,50 \$ par kg sont estimées pour 25 % de la consommation.

Aucuns coûts supplémentaires pour 25 % de la consommation.

L'autre 50 % de la consommation est forcé vers des options plus coûteuses, comme l'utilisation de solvants aqueux, à un coût de 3,00 \$ par kilogramme.

La moyenne pondérée est de 1,13 \$ par kilogramme.

### Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)

50 % dans l'hypothèse d'une estimation de 1,13 \$ pour les pays industrialisés.

40 % dans l'hypothèse d'une valeur équivalant à 1,5 fois le coût pour les pays industrialisés.

10 % dans l'hypothèse où la limite supérieure de l'écart de variation du coût marginal supplémentaire est de 15,84 \$ par kilogramme, selon le GETE (1996).

La moyenne pondérée est de 2,82 \$.

### Coûts totaux

|                                             |                          |
|---------------------------------------------|--------------------------|
| Pays industrialisés                         | 16,5 \$                  |
| Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)   | 2,2                      |
| <b>Total des coûts à l'échelle mondiale</b> | <b>18,7 milliards \$</b> |

## SOMMAIRE DES CALCULS POUR LES GAZ STÉRILISANTS

|                                                   | Pays industrialisés    | Pays visés au paragr. 5(1) |
|---------------------------------------------------|------------------------|----------------------------|
| Consommation en 1996 (tonnes)                     | 20 876                 | 1 740                      |
| Taux de croissance sans mesures de réglementation | 2 %                    | 2 %                        |
| Nbre total de tonnes déplacées (1987-2060)        | 3,4 millions           | 0,3 million                |
| Coût estimatif par kilogramme                     | 1,43 \$                | 1,43 \$                    |
| <b>Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)</b>  |                        |                            |
| Même estimation que pour les pays industrialisés. |                        |                            |
| <b>Total des coûts</b>                            |                        |                            |
| Pays industrialisés                               | 1,2 \$                 |                            |
| Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)         | 0,1                    |                            |
| <b>Total à l'échelle mondiale</b>                 | <b>1,3 milliard \$</b> |                            |

## SOMMAIRE DES CALCULS POUR LES HALONS

|                                                     | Pays industrialisés                                               | Pays visés au paragr. 5(1)                                        |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Consommation en 1986 (tonnes)                       | 31 100                                                            | 3 900                                                             |
| Taux de croissance sans mesures de réglementation : |                                                                   |                                                                   |
| Halon 1211, 1301                                    | 9,0 % jusqu'en 2010<br>2,5 % jusqu'en 2050<br>0,0 % jusqu'en 2060 | 9,0 % jusqu'en 2010<br>2,5 % jusqu'en 2050<br>0,0 % jusqu'en 2060 |
| Halon 2 402                                         | 0,0 %                                                             | s.o.                                                              |
| Nbre total de tonnes déplacées (1987-2060)          | 6,9 millions                                                      | 3,1 millions                                                      |
| Coût estimatif par kilogramme                       | 6,61 \$                                                           | 3,69 \$                                                           |

### Coûts pour les pays industrialisés

|            | Pondération | Coût par kg |
|------------|-------------|-------------|
| Halon 1211 | 0,680       | -1,50       |
| Halon 1301 | 0,216       | 30,00       |
| Halon 2402 | 0,104       | 11,10       |

La moyenne pondérée est de 6,61 \$ par kilogramme.

### Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)

La moyenne pondérée est de 3,69 \$ par kilogramme, conformément au Rapport du GETE sur le réapprovisionnement (1996).

### Coûts totaux

|                                   |                          |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Pays industrialisés               | 12,3 \$                  |
| Pays visés au paragr. 5(1)        | 0,3 \$                   |
| <b>Total à l'échelle mondiale</b> | <b>12,6 milliards \$</b> |

## SOMMAIRE DES CALCULS POUR LES HCFC

|                                                   | Pays industrialisés | Pays visés au paragr. 5(1) |
|---------------------------------------------------|---------------------|----------------------------|
| Consommation en 1996 (tonnes)                     | 479 166             | 53 545                     |
| Taux de croissance sans mesures de réglementation | 2 %                 | 2 %                        |
| Nbre total de tonnes déplacées (1987-2060)        | 48,9 millions       | 13,9 millions              |
| Coût estimatif par kilogramme                     | 2,89 \$             | 2,89 \$                    |

### Coûts pour les pays industrialisés

Moyenne estimative représentant les coûts par kilogramme et les quantités, par secteur.

|                                | Pondération | Coût/kg |
|--------------------------------|-------------|---------|
| Aérosols                       | 0,0006      | 2 \$    |
| Mousses                        | 0,18        | 2,5 \$  |
| Protection-incendie            | 0,009       | 3 \$    |
| Réfrigération et climatisation | 0,78        | 3 \$    |
| Solvants                       | 0,03        | 3 \$    |
| Stérilisants                   | 0,009       | 2 \$    |

La moyenne pondérée est de 2,90 \$ par kilogramme.

### Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)

Même estimation que pour les pays industrialisés.

### Coûts totaux

|                                             |                          |
|---------------------------------------------|--------------------------|
| Pays industrialisés                         | 25,8 \$                  |
| Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)   | 7,3                      |
| <b>Total des coûts à l'échelle mondiale</b> | <b>33,1 milliards \$</b> |

## SOMMAIRE DES CALCULS POUR LE MÉTHYLCHLOROFORME

|                                                   | Pays industrialisés                    | Pays visés au paragr. 5(1)               |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|
| Consommation en 1986 (tonnes)                     | 581 600                                | 27 400                                   |
| Taux de croissance sans mesures de réglementation | 6 % jusqu'en 2010<br>2 % jusqu'en 2060 | 9,5 % jusqu'en 2010<br>2 % jusqu'en 2060 |
| Nbre total de tonnes déplacées (1987-2060)        | 105,7 millions                         | 21,8 millions                            |
| Coût estimatif par kilogramme                     | 1,50 \$                                | 2,09 \$                                  |

### Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)

75 % dans l'hypothèse d'une valeur de 1,50 \$ pour les pays industrialisés.

25 % dans l'hypothèse où la limite supérieure de l'écart de variation des coûts marginaux supplémentaires est fixée à 3,87 \$ par kilogramme, d'après le GETE (1996).

La moyenne pondérée est de 2,09 \$ par kilogramme.

### Coûts totaux

|                                             |                          |
|---------------------------------------------|--------------------------|
| Pays industrialisés                         | 39,6 \$                  |
| Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)   | 8,2                      |
| <b>Total des coûts à l'échelle mondiale</b> | <b>47,8 milliards \$</b> |

# SOMMAIRE DES CALCULS POUR LE TÉTRACHLORURE DE CARBONE

|                                                                  | Pays industrialisés                    | Pays visés au paragr. 5(1)                 |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| Consommation en 1996 (tonnes)                                    | 92,2                                   | 4,4                                        |
| Taux de croissance sans mesures de réglementation                | 7 % jusqu'en 1991<br>2 % jusqu'en 2060 | 10 % jusqu'en 2010-<br>2,5 % jusqu'en 2060 |
| Nbre total de tonnes déplacées (1987-2060)                       | 18,1 millions                          | 4,5 millions                               |
| Coût estimatif par kilogramme                                    | 0,92 \$                                | 1,84 \$                                    |
| <b>Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)</b>                 |                                        |                                            |
| Double de la valeur par kg estimée pour les pays industrialisés. |                                        |                                            |
| <b>Coûts totaux</b>                                              |                                        |                                            |
| Pays industrialisés                                              | 4,2 \$                                 |                                            |
| Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)                        | 1,5                                    |                                            |
| <b>Total des coûts à l'échelle mondiale</b>                      | <b>5,7 milliards \$</b>                |                                            |

## SOMMAIRE DES CALCULS POUR LE BROMURE DE MÉTHYLE

|                                                   | Pays industrialisés | Pays visés au paragr. 5(1)             |
|---------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------|
| Consommation en 1996 (tonnes)                     | 40,2                | 10,2                                   |
| Taux de croissance sans mesures de réglementation | 2 %                 | 5 % jusqu'en 2010<br>2 % jusqu'en 2060 |
| Nbre total de tonnes déplacées (1987-2060)        | 7,7 millions        | 2,9 millions                           |
| Coût estimatif par kilogramme                     | 4,40 \$             | 2,20 \$                                |

### Coûts pour les pays visés au paragr. 5(1)

La moitié de la valeur par kg estimée pour les pays industrialisés, en raison d'exigences moins strictes.

### Coûts totaux

|                                             |                         |
|---------------------------------------------|-------------------------|
| Pays industrialisés                         | 6,7 \$                  |
| Pays visés au paragr. 5(1)                  | 1,1                     |
| <b>Total des coûts à l'échelle mondiale</b> | <b>7,8 milliards \$</b> |