

N° 1573

N° 462

ASSEMBLÉE NATIONALE

SÉNAT

CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958

NEUVIÈME LÉGISLATURE

SECONDE SESSION ORDINAIRE DE 1989-1990

SECONDE SESSION ORDINAIRE DE 1989-1990

Annexe au procès-verbal de la séance du 29 juin 1990.

Rattaché pour ordre au procès-verbal de la séance du 30 juin 1990.

Enregistré à la présidence du Sénat le 3 juillet 1990.

ARCHIVES

**OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION
DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES**

RAPPORT

*concernant les effets des chlorofluorocarbones sur l'environnement
et les moyens de supprimer ou de limiter leurs émissions,*

PAR MM. ROBERT GALLEY,

Député.

et LOUIS PERREIN,

Sénateur.

Déposé sur le Bureau de l'Assemblée nationale
par M. JEAN-YVES LE DÉAUT,
Président de l'Office.

Déposé sur le Bureau du Sénat
par M. JEAN FAURE,
Vice-Président de l'Office.

SAISINES DE L'OFFICE

L'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques a été saisi :

- le 14 juin 1989 par la Commission des Affaires économiques et du Plan du Sénat ;

- le 28 juin 1989 par la Commission de la Production et des Echanges de l'Assemblée nationale ;

des problèmes posés par les effets des chlorofluorocarbures (CFC) sur l'environnement et par le remplacement de ces substances.

La Commission des Affaires économiques et du Plan du Sénat souhaitait que l'Office étudie, notamment, «les garanties que les substituts devraient présenter aussi bien du point de vue du consommateur que de notre environnement, ainsi que les implications économiques de leur utilisation».

La Commission de la Production et des Echanges de l'Assemblée nationale demandait que l'Office examine «la position de l'industrie française dans un contexte européen et mondial» ainsi que «l'état de la concertation internationale, les conséquences économiques pour le tiers monde et les solutions adoptées dans ce domaine par les principaux pays concernés.»

SOMMAIRE

	Pages
Introduction	11
I - UN CONSTAT SCIENTIFIQUE ALARMANT	13
A - DES SOUPÇONS CONFIRMÉS	13
1. Précarité et importance de l'ozone	14
1.1. <i>Un équilibre fragile</i>	14
1.1.1. Les réactions photochimiques avec les composés oxygénés	14
1.1.2. Les réactions avec les constituants minoritaires	15
1.1.3. Un destin lié à celui des autres composants de l'atmosphère	15
1.2. <i>Une grande variabilité</i>	19
1.2.1. Une distribution verticale inégale	19
1.2.2. Une distribution spatiale et temporelle fluctuante	20
1.3. <i>Un rôle vital</i>	21
1.3.1. Le filtrage des UV	21
1.3.2. La contribution à l'effet de serre naturel	22
2. La mise en cause des composés chlorés industriels	23
2.1. <i>La charge en chlore dans l'atmosphère a considérablement augmenté sous l'effet des activités humaines...</i>	23
2.1.1. Les sources naturelles de chlore	24
2.1.2. Les sources industrielles	25
2.1.2.1. Surtout les CFC	25
2.1.2.2. ... Mais aussi d'autres composés organo-halogénés	28
2.2. <i>... Des travaux de laboratoire menés dans les années soixante-dix ont conduit à redouter qu'il en résulte une diminution de la concentration d'ozone</i>	30
2.2.1. Les travaux de Stolarski et Cicerone sur les oxydes de chlore	31
2.2.2. Les hypothèses de Molina et Rowland sur les effets ozonocides des CFC	31
2.2.3. Les travaux de Wolfsy et Mac Elroy sur les oxydes de brome	32
2.3. <i>Les investigations qui ont suivi la découverte du trou d'ozone antarctique ont confirmé ces présomptions</i>	32
2.3.1. Seule l'action du chlore d'origine industrielle permet actuellement de comprendre ce phénomène	33
2.3.2. Une chimie identique explique les minitrous de l'Arctique	38
2.3.3. La diminution globale de l'ozone	39
2.4. <i>Les CFC contribuent, en outre, à l'effet de serre dont les conséquences peuvent être très graves</i>	40

	Pages
B - DES INCERTITUDES QUI N'INCITENT GUÈRE À L'OPTIMISME	43
1. La compréhension imparfaite de la situation présente...	43
<i>1.1. Les limites des instruments de mesure</i>	43
1.1.1. Instruments traditionnels	44
1.1.2. Nouveaux instruments	45
1.1.3. L'insuffisance des réseaux au sol	47
1.1.4. Le manque de fiabilité des données recueillies par satellite	48
1.1.5. La nécessité de moyens d'observation complémentaires	51
1.1.5.1. Les avions	51
1.1.5.2. Les ballons	51
<i>1.2. L'explication incomplète des phénomènes atmosphériques</i>	52
1.2.1. La difficulté d'établir une théorie générale de l'atmosphère	52
1.2.2. Les inconnues qui subsistent concernant la destruction de l'ozone	56
1.2.2.1. La chimie hétérogène	56
1.2.2.2. La dilution des trous polaires	57
1.2.2.3. Les échanges entre la troposphère et la stratosphère	58
2. ... rend toute prévision aléatoire	59
<i>2.1. Grandeurs et servitudes des modèles</i>	59
2.1.1. Des instruments de réflexion irremplaçables	59
2.1.2. ...mais aux possibilités inévitablement restreintes	62
<i>2.2. Les illustrations récentes de leurs défaillances</i>	66
3. ... Il n'est pas exclus, dans ces conditions, que l'avenir nous réserve de mauvaises surprises	68
<i>3.1. La non linéarité éventuelle des évolutions atmosphériques</i>	68
<i>3.2. La sous-estimation possible de la destruction d'ozone</i>	70
3.2.1. L'impact probable de la diffusion des trous polaires	71
3.2.2. L'influence présumée de la chimie hétérogène aux autres latitudes	73
3.2.3. Du concept d'ODP à celui de CLP	74
<i>3.3. L'aggravation éventuelle de l'effet serre</i>	75
<i>3.4. Des incertitudes au total plus inquiétantes que rassurantes</i>	76
C - LES RÉSULTATS DES DERNIÈRES OBSERVATIONS SONT PRÉOCCUPANTS	80
1. La saturation, entre 12 et 22 km d'altitude du trou d'ozone antarctique	80
2. La diffusion en Europe, en 1990, d'un trou formé en Scandinavie	80
D - L'ÉVALUATION DE LA GRAVITÉ DES CONSÉQUENCES DE LA DESTRUCTION D'OZONE DEMEURE DIFFICILE	83
1. Les dangers d'une augmentation du rayonnement UV-B	83
2. Des effets difficiles à mettre en évidence	83
3. Les compensations possibles	84

	Pages
II - DES OPTIONS TECHNOLOGIQUES VARIÉES	86
A - LES CFC CONVIENNENT PARFAITEMENT À DE NOMBREUSES UTILISATIONS	87
1. Des nomenclatures diverses	87
1.1. <i>Nomenclature technique R des CFC</i>	87
1.2. <i>Des marques commerciales multiples</i>	90
2. Les propriétés remarquables des CFC	91
2.1. <i>Des propriétés physiques et chimiques exceptionnelles</i>	91
2.2. <i>Des coûts réduits et des savoir-faire relativement simples pour leur fabrication</i>	93
2.3. <i>Un large éventail d'utilisations</i>	94
3. Des consommations fonction des spécialisations industrielles et des comportements	98
4. Une production mondiale concentrée	99
4.1. <i>La domination des pays industrialisés</i>	99
4.2. <i>La prédominance des CFC-11, 12 et 113</i>	101
4.3. <i>L'avance commerciale de cinq producteurs dont le français Atochem</i>	102
B - IL EST NÉANMOINS TECHNIQUEMENT ENVISAGEABLE DE SE PASSER DES CFC OU DE LES ÉCONOMISER	105
1. Les substituts des CFC : HCFC et HFC	109
1.1. <i>Nomenclature</i>	109
1.2. <i>Les études sur les HCFC et HFC</i>	111
1.3. <i>Leurs propriétés physiques</i>	114
1.3.1. <i>Thermodynamiques</i>	114
1.3.2. <i>Propriétés d'absorption dans l'ultraviolet</i>	117
1.3.3. <i>L'absorption infrarouge</i>	117
1.4. <i>Leurs propriétés chimiques</i>	117
1.5. <i>Des effets nettement moins dangereux pour l'ozone que ceux des CFC</i>	118
1.6. <i>Une contribution à l'effet de serre plus faible que celle des CFC mais non nulle</i>	123
1.7. <i>Les tests toxicologiques</i>	124
1.8. <i>Des coûts de production élevés et des capacités de productions encore limitées</i>	125
1.9. <i>Le remodelage inévitable de l'appareil de production mondial</i>	127
1.9.1. <i>Des investissements lourds et risqués</i>	128
1.9.2. <i>Les restructurations à venir</i>	130
1.9.3. <i>Vers une offensive japonaise</i>	133
2. Les produits de remplacement et les technologies alternatives constituent des solutions complémentaires	134
2.1. <i>Définitions</i>	134
2.2. <i>Le cas des aérosols</i>	135
2.3. <i>Le cas des fluides frigorigènes</i>	136
2.3.1. <i>Peu de fluides de remplacement compétitifs pour les cycles à compression (condensation/évaporation)</i>	136
2.3.2. <i>Les technologies fondées sur l'effet Peltier</i>	137
2.3.3. <i>Les technologies fondées sur les cycles à absorption ou à adsorption</i>	138
2.3.3.1. <i>Principes techniques communs</i>	138
2.3.3.2. <i>Principe des cycles à absorption</i>	138
2.3.3.3. <i>Les cycles à adsorption</i>	139
2.3.3.4. <i>Les systèmes mixtes absorption/adsorption</i>	140
2.3.3.5. <i>Application des différents procédés</i>	140
2.3.3.6. <i>La nécessité de valoriser les acquis de la recherche française</i>	145

	Pages
2.4. <i>Le cas des mousses</i>	146
2.4.1. <i>Produits de remplacement</i>	146
2.4.2. <i>Technologies alternatives</i>	147
2.5. <i>Le cas des solvants</i>	148
2.6. <i>Le cas des agents d'extinction</i>	150
3. La nécessité d'une gestion économe des CFC et de leurs substituts	151
3.1. <i>Le confinement</i>	153
3.2. <i>La récupération</i>	155
3.3. <i>Le recyclage et/ou la destruction</i>	155
4. Conclusion	156
III - LES MESURES PRÉVUES PAR LE PROTOCOLE DE MONTRÉAL ÉTAIENT OPPORTUNES MAIS S'AVÈRENT INSUFFISANTES	158
A DES MESURES OPPORTUNES	158
1. Le premier exemple d'une coopération internationale pour la protection de l'environnement	159
2. L'objectif d'une réduction de 50 % des CFC à l'horizon 1999	160
3. Une réglementation internationale bien ciblée	162
3.1. <i>Les composés chlorés les plus dangereux ont été visés</i>	162
3.2. <i>... ainsi que les CFC les plus produits</i>	163
4. Un relais efficace pris au niveau de pays industrialisés	163
4.1. <i>Méthodes utilisées dans les principaux pays consommateurs</i>	164
4.1.1. <i>Les Etats-Unis</i>	164
4.1.1.1. <i>La situation de départ</i>	164
4.1.1.2. <i>La taxe sur les CFC</i>	166
4.1.1.3. <i>Vers un remplacement rapide des CFC aux Etats-Unis</i>	171
4.1.2. <i>La situation du Japon</i>	172
4.1.3. <i>La CEE</i>	173
4.1.4. <i>Le cas de la RFA : une attitude offensive en faveur de l'environnement et de la compétitivité industrielle</i>	174
4.1.5. <i>Données générales sur la France</i>	178
5. Une application sectorielle qui peut être améliorée	179
5.1. <i>Aérosols</i>	179
5.1.1. <i>Données de consommation</i>	179
5.1.2. <i>L'attitude constructive des aérosoliers et la convention sur les aérosols</i> ...	181
5.1.2.1. <i>La structure de la profession en France</i>	181
5.1.2.2. <i>Les aérosols devançant l'évolution de la réglementation</i>	182
5.1.2.3. <i>Les choix techniques et leur validité pour l'avenir</i>	183
5.2. <i>Le domaine du froid</i>	185
5.2.1. <i>Données de consommation</i>	185
5.2.2. <i>De nombreux intervenants rassemblés en France dans la convention du 7 février 1989</i>	188
5.2.3. <i>Les options techniques et leur validité pour l'avenir</i>	191
5.2.3.1. <i>Informé et impulser</i>	191
5.2.3.2. <i>Substituts, produits de remplacement et technologies alternatives</i>	191
5.2.3.3. <i>Confinement, récupération et recyclage : l'importance de la formation</i>	194

	Pages
5.3. <i>Mousses</i>	196
5.3.1. Données de consommation	196
5.3.2. Les intervenants de la filière française et la convention du 7 février 1989 ..	198
5.3.3. Les options techniques et leur avenir	199
5.4. <i>Solvants</i>	204
5.4.1. Données de consommation	204
5.4.2. L'absence de convention de réduction des CFC-solvants en France	207
5.4.3. Les solutions techniques et leur avenir	208
5.4.3.1. Confinement, récupération et recyclage	208
5.4.3.2. Produits de remplacement, technologies alternatives et substituts	209
5.5. <i>Halons</i>	210
5.5.1. Données de consommation	210
5.5.2. La mise en oeuvre du Protocole de Montréal	212
5.5.3. Les solutions techniques	212
5.6. <i>Conclusions</i>	213
B - UN DISPOSITIF QUI N'EST CEPENDANT PAS ENTIÈREMENT SATISFAISANT	215
1. Une limitation pas assez rigoureuse des émissions de composés chlorés	215
1.1. <i>Le reflet d'un défaut d'ambition concernant la protection de l'ozone</i>	215
1.2. <i>Les lacunes du champ d'application du Protocole</i>	216
1.3. <i>Le caractère insuffisant des restrictions prévues</i>	216
1.3.1. Les conséquences d'un simple gel des émissions de CFC et de halons aux niveaux de 1986	218
1.3.2. Les réductions fixées par le Protocole de Montréal	219
2. Les réticences regrettables des pays en développement	220
2.1. <i>Le caractère crucial de l'adhésion des pays du Sud au Protocole de Montréal</i>	220
2.1.1. Des besoins croissants dans les secteurs d'utilisation actuelle des CFC	220
2.1.1.1. Des perspectives différenciées d'évolution de la demande	220
2.1.1.2. Une production faible mais croissante	225
2.1.2. Un refus qui compromettrait la réalisation des objectifs du protocole	227
2.2. <i>Une prise en compte de leur situation particulière jugée insuffisante par les pays en développement</i>	229
2.2.1. Les mesures prévues par le protocole en faveur du tiers monde	229
2.2.2. Les motifs d'insatisfaction des pays du Sud	231
2.2.2.1. Des dispositions jugées discriminatoires	231
2.2.2.2. Les lacunes du Protocole concernant les transferts de technologie	232
2.2.3. L'absence de participation de pays représentant la majorité de la population mondiale	233
IV - LE PROTOCOLE DOIT ÊTRE DURCI ET RECEVOIR L'ADHÉSION DES PAYS EN DÉVELOPPEMENT	235
A - UN DURCISSEMENT DU PROTOCOLE DE MONTRÉAL EST NÉCESSAIRE	235
1. L'élargissement du champ d'application de l'accord	236
1.1. <i>L'inclusion des CFC et halons non réglementés</i>	236
1.2. <i>Le tétrachlorure de carbone</i>	237
1.3. <i>Le méthylchloroforme</i>	238
2. Des mesures plus restrictives paraissent inévitables	240
2.1. <i>Concernant les CFC</i>	240
2.2. <i>Concernant les halons</i>	242

	Pages
3. Le cas des substituts de première génération (HCFC) mérite réflexion	244
3.1. <i>Les HCFC représentent un progrès important en ce qui concerne l'ozone et l'effet de serre</i>	245
3.2. <i>Les HCFC sont indispensables pour l'efficacité du processus de réduction des émissions chlorées</i>	246
B - LES CONDITIONS D'UNE ADHÉSION DES PAYS EN DÉVELOPEMENT DOIVENT ÊTRE SATISFAITES	249
1. L'évaluation du coût, pour les pays du Sud, d'un renoncement aux CFC	249
1.1. <i>Une approche difficile</i>	249
1.2. <i>Des estimations approximatives</i>	251
2. Les chances de succès de la réunion de Londres	252
2.1. <i>Les progrès enregistrés</i>	253
2.1.1. <i>Les propositions de suppression des clauses du protocole jugées discriminatoires</i>	253
2.1.2. <i>L'affinement de la définition du contenu des transferts de technologie</i>	254
2.1.3. <i>L'esquisse d'un mécanisme de financement des transferts</i>	255
2.2. <i>Les obstacles qui restent à surmonter</i>	257
2.2.1. <i>Le contenu et le mode de financement des transferts de technologie doit être précisé</i>	258
2.2.2. <i>Les groupes multinationaux doivent se prêter aux transferts de technologie prévus par le protocole</i>	260
2.2.3. <i>La parcimonie américaine</i>	263
3. Un durcissement du protocole respecté par les seuls pays développés ne parviendrait pas à ses fins	266
3.1. <i>Un répit peut être accordé aux pays en développement</i>	266
3.2. <i>Un refus d'adhésion définitif, de leur part, aurait des conséquences graves</i>	268
3.3. <i>Eux aussi devront passer ultérieurement des HCFC aux HFC, au terme d'une période de transition suffisamment longue</i>	270
CONCLUSION	274
Recommandations	276
Examen par le Conseil scientifique de l'Office	283
Examen par la délégation parlementaire	284
Remerciements	285
Personnalités rencontrées	286
Références bibliographiques	294
ANNEXE : • <i>Bilan scientifique sur les implications des CFC dans la dégradation de la couche d'ozone et l'effet de serre</i> par MM. Gérard MÉGIE et Jean-Pierre POMMEREAU du Service d'Aéronomie du CNRS.	301

INTRODUCTION

Mesdames, Messieurs,

L'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques a été saisi, au mois de juin 1989, par la Commission des Affaires économiques et du Plan du Sénat, puis par la Commission de la Production et des Échanges de l'Assemblée nationale, des problèmes posés par les effets sur l'environnement des chlorofluorocarbures (CFC) et par le développement des produits qui peuvent leur être substitués.

Il s'agissait à première vue d'un sujet difficile et qui, pourtant, pouvait sembler rebattu.

Difficile, les questions posées à l'Office par les deux commissions l'étaient certainement. Les CFC, en effet, sont accusés non seulement de détruire l'ozone, mais aussi de contribuer à l'effet de serre. Or, l'appauvrissement de l'atmosphère en ozone et le réchauffement des températures à la surface de la terre sont deux problèmes d'environnement planétaire particulièrement complexes, sur lesquels subsistent des incertitudes majeures. La question des produits de substitution n'est pas non plus facile à aborder, étant donné, d'une part, les nombreuses utilisations des CFC (propulseurs dans les aérosols, agents gonflants ou isolants dans les mousses, fluides frigorigènes, solvants...) et, d'autre part, la variété des choix technologiques possibles pour supprimer ou limiter leurs émissions (HCFC ou HFC, solutions alternatives, économies par le confinement, la récupération et le recyclage).

Le dossier comporte à la fois un aspect industriel et un aspect Nord-Sud, tous deux délicats à traiter.

Difficile, le sujet pouvait néanmoins sembler rebattu. Cela ne fait-il pas déjà une quinzaine d'années que les chercheurs américains MOLINA et ROWLAND ont publié leurs travaux sur la destruction de l'ozone par les chlorofluorocarbures ? Les premières mesures interdisant l'utilisation des CFC-11 et 12 dans les aérosols ont été prises il y a plus de dix ans en Suède (dès 1977) et aux États-Unis (en 1978). La ratification du Protocole de Montréal, qui a succédé, en septembre 1987, à la Convention de Vienne de 1985 sur la protection de l'ozone, a donné, d'autre part, l'occasion au Parlement français de se pencher sur ces problèmes. Les résultats des grandes campagnes de mesures menées au pôle Sud et au pôle Nord, à la suite de la découverte du trou d'ozone antarctique, ont été, en outre, très

abondamment commentés dans la presse. Enfin, de nombreux colloques et conférences sont fréquemment organisés sur ces sujets (trois, par exemple au printemps 1989, en l'espace de quelques semaines à La Haye, Paris et Londres). Ces thèmes sont souvent aussi évoqués lors des réunions internationales de Chefs d'État et de Gouvernement ou de Ministres (Sommet de l'Arche, en juillet 1989, Conférence de Noordwijk, en novembre 1989).

Craignant donc d'aborder un sujet sur lequel tout avait déjà été dit, vos rapporteurs ont découvert que de nombreuses données nouvelles conduisaient, en fait, à reconsidérer les décisions prises sur le plan international et au niveau des États.

Les sciences de l'atmosphère, encore incomplètes, progressent sans cesse. Les résultats des derniers travaux scientifiques laissent redouter que le rythme de destruction de l'ozone ait été sous-estimé par les modèles, les mécanismes de diffusion des trous polaires et les réactions de chimie hétérogène qui se produisent à la surface des nuages stratosphériques n'ayant pas été pris en compte.

Dans ces conditions, un durcissement, à la prochaine Conférence de Londres, du Protocole de Montréal paraît inéluctable. Cette évolution a, semble-t-il, été bien anticipée par les producteurs de CFC, de la part desquels elle suppose cependant un effort de reconversion considérable. Il n'est pas certain, en revanche, en France tout du moins, que les industries d'aval s'y soient toujours aussi bien préparées. Une coopération approfondie entre fabricants et utilisateurs de produits de substitution apparaît indispensable et les solutions alternatives, ainsi que les économies de CFC et de substituts, ne doivent pas être négligées. Il importe également que les conditions d'une adhésion des pays du Sud au Protocole (financement des transferts de technologie nécessaires) soient satisfaites.

Ainsi :

- le constat des scientifiques est alarmant (I) ;
- des options technologiques variées sont disponibles (II) ;
- les mesures prévues par le Protocole de Montréal étaient opportunes mais s'avèrent insuffisantes (III) ;
- le Protocole doit être durci et permettre l'adhésion des pays en développement (IV).

I - UN CONSTAT SCIENTIFIQUE ALARMANT

Vos rapporteurs ont demandé à MM. Gérard MÉGIE et Jean-Pierre POMMERAU, spécialistes de renommée mondiale du service d'aéronomie du CNRS, de rédiger à leur intention une étude relative aux effets des chlorofluorocarbones (CFC) sur l'environnement, en ce qui concerne à la fois la destruction de l'ozone et le réchauffement des climats (1). Les résultats de cette expertise se trouvent intégralement publiés dans la suite de ce rapport.

L'objectif poursuivi par cette première partie est d'éclairer les décideurs sur les données scientifiques du dossier des CFC, à la lumière des observations les plus récentes. Experts et rapporteurs se sont efforcés d'être aussi brefs et accessibles que la complexité du problème le permet. Au risque de se voir reprocher un certain pessimisme, l'Office n'a pas voulu édulcorer le message des scientifiques. Il est clair que ceux-ci entendent alerter les pouvoirs publics sur la gravité de la situation présente et les dangers que la continuation des émissions de composés chlorés ferait courir à notre planète. Il est tout aussi évident qu'ils considèrent que les incertitudes qui demeurent sont de nature à aviver les craintes plutôt qu'à les apaiser. Les tout derniers résultats disponibles permettent de comprendre leur attitude, même si la gravité des conséquences de la destruction de l'ozone demeure, en l'état actuel des connaissances, difficile à évaluer.

A - DES SOUPÇONS CONFIRMÉS

Les soupçons que les travaux de laboratoire des américains MOLINA et ROWLAND ont fait peser sur les CFC, accusés d'être responsables de la destruction de l'ozone, n'ont fait qu'être confirmés par les investigations scientifiques ultérieures.

1. PRÉCARITÉ ET IMPORTANCE DE L'OZONE

1.1. UN ÉQUILIBRE FRAGILE

L'équilibre naturel de l'ozone semble a priori fragile :

- parce que ce gaz ne représente tout d'abord qu'un millionième du contenu total de l'atmosphère (ramenée aux conditions de pression et de température qui règnent à la surface du sol, l'épaisseur moyenne d'une colonne d'ozone de surface unité n'est que de 3 mm) ;

- parce que sa création et sa destruction résultent d'une multitude d'interactions physico-chimiques mettant en jeu des constituants de l'atmosphère très minoritaires eux aussi ;

- enfin, parce que ces constituants minoritaires sont eux-mêmes issus de cycles complexes et délicats (couplages avec la biosphère et les océans) que les activités humaines sont susceptibles de perturber.

1.1.1. Les réactions photochimiques avec les composés oxygénés

Le mot "ozone", qui vient d'un verbe grec qui signifie "sentir", a été introduit pour la première fois par SCHOENBEIN à Bâle, en 1840, pour désigner une espèce chimique dont l'odeur, très caractéristique, se dégage lorsqu'on déclenche des étincelles électriques dans l'air sec.

C'est le physicien anglais CHAPMAN qui a exposé, en 1929, la première théorie de l'équilibre de l'ozone dans l'atmosphère.

La dissociation de l'oxygène moléculaire O_2 , qui représente 21 % en volume de la composition chimique de l'atmosphère, sous l'influence du rayonnement solaire de courte longueur d'onde, conduit, entre 30 et 60 km d'altitude, à la production d'atomes d'oxygène O.

Aussitôt formés, ces atomes d'oxygène se recombinent avec des molécules O_2 pour constituer l'ozone O_3 .

Le rayonnement solaire, qui se trouve donc à l'origine de la création de l'ozone, est également responsable de sa destruction, puisqu'il le décompose ensuite en oxygène moléculaire et en oxygène atomique.

Mais les réactions entre O et O_3 qui s'ensuivent ($O_3 + O \rightarrow 2O_2$) n'expliquent au maximum que 20 % de la disparition de ces composés oxygénés dits "impairs". Il n'est donc pas possible d'expliquer l'équilibre de l'ozone à partir des seuls composés oxygénés contenus dans l'atmosphère.

D'autres constituants minoritaires doivent être introduits.

1.1.2. Les réactions avec les constituants minoritaires

Trois familles de constituants minoritaires interviennent dans l'équilibre de l'ozone : les composés hydrogénés (HO_x), azotés (NO_x) et chlorés (ClO_x).

Ils agissent comme catalyseurs, c'est-à-dire qu'ils contrôlent ou provoquent une réaction, ou un cycle de réactions, sans eux-mêmes disparaître dans ce processus. L'oxydation par l'ozone d'un constituant X conduit à la formation d'un oxyde XO qui réagit soit avec l'oxygène atomique O_2 , soit avec l'ozone O_3 , pour aboutir à la destruction d'une ou deux molécules d'ozone.

1.1.3. Un destin lié à celui des autres composants de l'atmosphère

Pour mesurer l'importance de l'influence des composés hydrogénés, azotés ou chlorés sur l'équilibre de l'ozone, il importe de bien comprendre le cycle de ces constituants dans l'atmosphère. Ces cycles correspondent à un schéma classique qui repose sur des relations complexes entre les différents réservoirs de l'environnement terrestre :

- les sources naturelles au niveau du sol (biosphère, océan) ;
- les espèces qui interagissent dans l'atmosphère ;
- les "puits" qui assurent le bouclage du système.

1.1.3.1. Les sources

«L'équilibre naturel de la couche d'ozone - écrivent nos experts - est lié au rôle primordial joué par les constituants-sources des familles de composés hydrogénés, azotés ou chlorés. La quantification de ces sources conduit alors à considérer l'ensemble du système atmosphérique et les couplages avec la biosphère et les océans. Le problème de l'ozone rejoint ainsi celui de la modification globale, sous l'effet des activités humaines, de la composition chimique de l'atmosphère et des changements climatiques qui peuvent en résulter».

Les constituants-sources des composés dont dépend l'équilibre de l'ozone sont produits naturellement à partir de processus physiques

(évaporation, dégazage des roches) ou biologiques (dénitrification, fermentation anaérobique...).

Outre la vapeur d'eau et l'hydrogène, les gaz ainsi émis sont le méthane CH_4 , le protoxyde d'azote N_2O et les composés organo-chlorés.

- Le méthane se forme dans les sols recouverts d'eau (rizières, marécages), et à partir de la digestion des ruminants, par minéralisation de la matière organique, sous l'effet de l'activité microbienne en l'absence d'oxygène (conditions anaérobiques).

- La source naturelle de protoxyde d'azote est principalement liée à l'action des micro-organismes dans les sols et l'eau (dégradation aérobie des déchets organiques et réduction des nitrates par la matière organique dans des conditions anaérobiques).

- Les seuls constituants organo-halogénés (sous-ensemble des composés chlorés), d'origine naturelle, dont la durée de vie dans la troposphère est suffisamment longue pour constituer une source appréciable de chlore stratosphérique sont produits dans les régions photosynthétiquement actives des océans. Il s'agit du bromure, de l'iodure et surtout du chlorure de méthyle, dérivés substitués du méthane.

Il existe aussi cependant - et c'est là où le bât blesse - des émissions de ces gaz liées aux activités humaines qui risquent de perturber non seulement l'équilibre de l'ozone mais aussi les caractéristiques du climat terrestre.

L'exploitation du gaz naturel et des mines de charbon, la combustion de la biomasse et les émissions dans les décharges contribuent ainsi à l'augmentation, d'environ 0,9 % par an, de la concentration du méthane dans l'atmosphère.

De même, l'utilisation extensive des engrais et la combustion de la biomasse ou des combustibles fossiles expliquent sans doute, pour une bonne part, la croissance de 0,2 à 0,3 % par an du protoxyde d'azote.

Enfin, la production par l'industrie de constituants chlorés est certainement à l'origine de la multiplication par cinq, par rapport à l'ère pré-industrielle, du contenu en équivalent chlore de la stratosphère (de 1945 à 1974, la production de chlorofluorocarbures a crû au rythme de 13 % par an).

1.1.3.2. Les interactions dans l'atmosphère

Les constituants sources qui viennent d'être décrits (méthane, protoxyde d'azote, chlorure de méthyle...) se diffusent dans la basse atmosphère avant d'atteindre la stratosphère, dans une quantité qui dépend non seulement de leur flux d'émission mais aussi de leur durée de séjour dans l'atmosphère.

Une fois parvenus dans la stratosphère, ils seront détruits, directement ou indirectement, sous l'action du rayonnement solaire.

Les espèces minoritaires issues de ces réactions, interagissent alors entre elles pour aboutir à un état d'équilibre.

Les constituants ainsi produits se répartissent en deux groupes :

- les espèces radicalaires ou radicaux libres qui comprennent les familles de composés déjà citées (hydrogénés, azotés et chlorés) ;

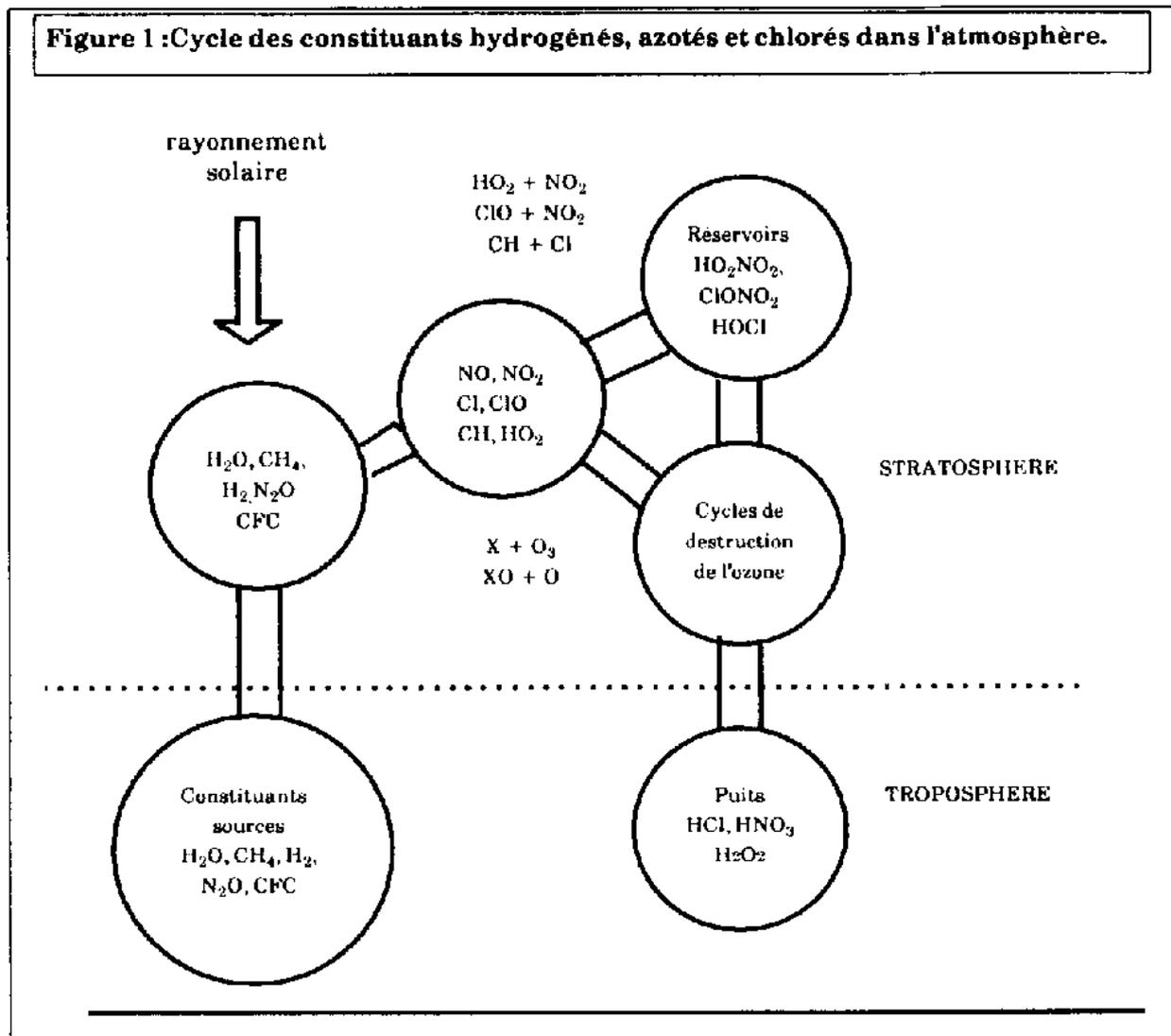
- les espèces dites "réservoirs", issues de réactions entre différents constituants de chaque famille, qui, en stockant une partie des espèces réactives, limitent la capacité destructrice de l'ozone des espèces radicalaires.

1.1.3.3. Les puits

Formées à partir des espèces radicalaires, les espèces puits assurent le bouclage du système.

Constituées par les formes acides (acide chlorhydrique, nitrique, etc.), elles ont la particularité d'être solubles dans l'eau et peuvent donc être éliminées par les pluies en descendant dans la troposphère.

Figure 1 : Cycle des constituants hydrogènes, azotés et chlorés dans l'atmosphère.



1. Espèces radicalaires :

- composés hydrogènes :

- OH radical hydroxyle
- HO_2 radical hydroperoxyde

- composés azotés :

- N_2O protoxyde d'azote ou oxyde azoteux ou hémioxyde d'azote
- NO oxyde azotique
- NO_2 peroxyde ou dioxyde d'azote
- NO_3 trioxyde d'azote
- N_2O_5 pentoxyde d'azote

- composés chlorés :

- Cl chlore atomique
- ClO monoxyde de chlore

2. Espèces puits :

- H_2O_2 peroxyde d'hydrogène
- HNO_3 acide nitrique
- HCl acide chlorhydrique

3. Espèces réservoirs :

- HO_2NO_2 acide pernitrique
- ClONO_2 nitrate de chlore
- HOCl acide hypochloreux

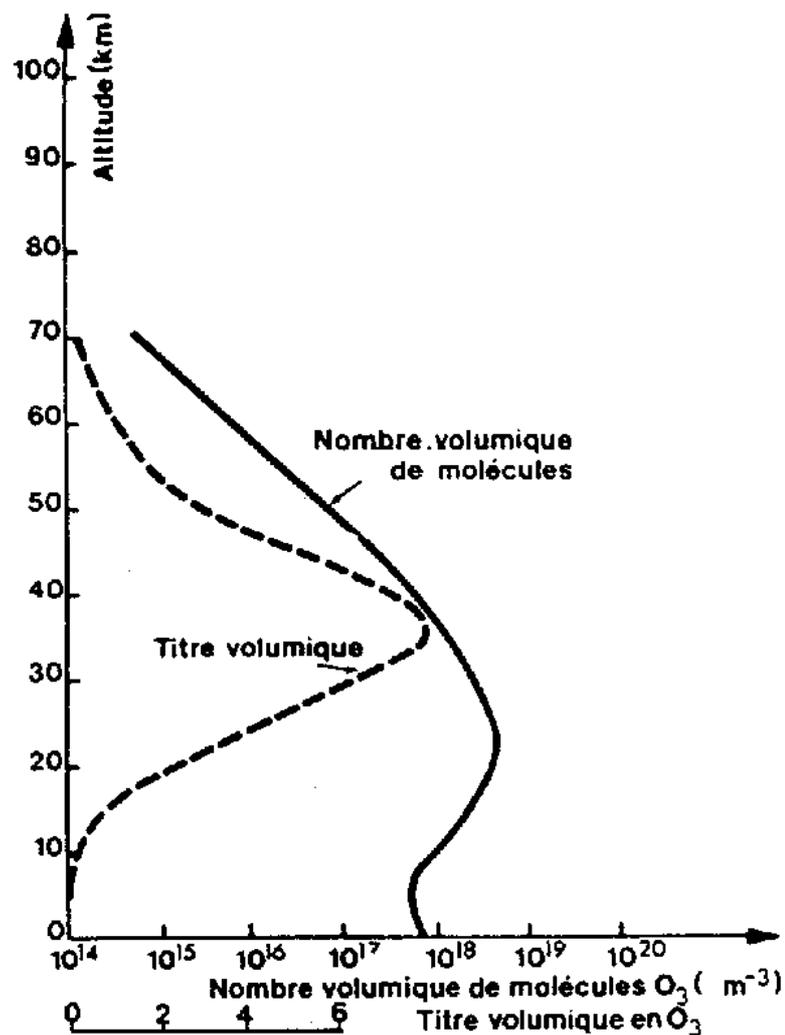
Constituant précaire de l'atmosphère, l'ozone se caractérise également par la grande variabilité de sa distribution verticale et spatio-temporelle.

1.2. UNE GRANDE VARIABILITÉ

1.2.1. Une distribution verticale inégale

L'ozone connaît une concentration absolue maximum entre 25 et 30 km et une concentration relative très variable entre le sol et 60 km d'altitude.

Graphique 1 :
Distribution verticale de l'ozone dans l'atmosphère exprimée en termes de concentration absolue (molécules m^{-3}) et de concentration relative (ppm).



Or, le profil vertical des autres constituants minoritaires de l'atmosphère est très différent puisqu'il se caractérise par une décroissance, depuis le sol, de leur concentration absolue et par une concentration relative dont la constance traduit l'homogénéité du mélange atmosphérique jusqu'à 80 km d'altitude.

Cette différence de distribution provient de l'existence d'une source d'ozone située dans la haute atmosphère, et non au niveau du sol comme pour les autres constituants. En effet, le processus initial de production de l'ozone est lié, comme il a été montré, à la libération, entre 30 et 60 km d'altitude, d'atomes d'oxygène par photodissociation de l'oxygène moléculaire.

On constate ainsi une correspondance entre la présence d'oxygène atomique et celle d'ozone dans tout le domaine d'altitude compris entre 20 et 80 km.

Mais l'équilibre de l'ozone est également influencé - comme on l'a vu aussi - par l'action de constituants minoritaires dont les sources, elles, se situent au niveau du sol.

Or, l'importance du rôle de chacun de ces constituants varie en fonction de l'altitude : les constituants azotés contrôlent l'équilibre de l'ozone dans la basse stratosphère et les constituants hydrogénés dans les régions supérieures (45-50 km) ; les constituants chlorés interviennent principalement dans la zone d'altitude comprise entre 35 et 50 km.

Les espèces minoritaires influent donc aussi sur le profil vertical de l'ozone.

1.2.2. Une distribution spatiale et temporelle fluctuante

La production d'ozone étant liée à l'action du rayonnement solaire, on s'attendrait à ce que ce gaz soit le plus abondant à l'équateur et en été. Or, les relevés effectués montrent que la quantité totale d'ozone augmente en allant de l'équateur vers les pôles avec un maximum à la fin de l'hiver et au printemps.

Ce phénomène s'explique de la façon suivante : en absorbant le rayonnement solaire, l'ozone réchauffe la stratosphère dans les régions équatoriales où il est produit. La différence de température ainsi provoquée avec le reste de la stratosphère crée un déplacement de masse d'air qui transporte l'ozone de l'équateur vers les régions polaires où celui-ci s'accumule, normalement, pendant l'hiver en l'absence d'activité chimique.

De tels processus dynamiques de transport de l'ozone dominant aux altitudes inférieures à 25 km mais la stratosphère est aussi le siège de processus radiatifs et chimiques dans lesquels l'ozone est impliqué.

Les processus chimiques dominant aux altitudes supérieures à 40 km (où les effets des constituants chlorés se font le plus sentir).

Entre 25 et 40 km existe une région où processus dynamiques et chimiques jouent tous les deux un rôle et conduisent à une très grande variabilité spatiale et temporelle des concentrations d'ozone.

Bien que constituant minoritaire et précaire de l'atmosphère, l'ozone joue un rôle essentiel dans la préservation des équilibres de notre environnement.

1.3. UN RÔLE VITAL

On estime actuellement que l'avènement de la vie sur les terres émergées est directement lié à l'apparition de l'ozone dans la haute atmosphère, qui a suivi celle de l'oxygène moléculaire produit en partie par les premiers organismes vivants dans les océans.

L'ozone continue aujourd'hui à jouer un rôle essentiel en raison de sa participation au filtrage du rayonnement solaire et à l'effet de serre "naturel", indispensables à la préservation de la vie sur notre planète.

1.3.1. Le filtrage du rayonnement solaire

L'oxygène moléculaire, constituant majoritaire du gaz atmosphérique, ne peut absorber le rayonnement solaire que dans le domaine des longueurs d'onde inférieures à 240 nm (nanomètres).

Parmi tous les constituants de l'atmosphère, l'ozone est le seul qui présente des propriétés d'absorption suffisamment intenses pour atténuer effectivement le rayonnement solaire dans le domaine des UVB, de longueur d'onde comprise entre 280 nm et 320 nm.

Or, les rayons de ce type, s'ils parvenaient intacts au niveau du sol, seraient susceptibles de détruire les molécules nobles de la matière vivante (acides aminés, protéines) et d'inhiber la photosynthèse.

Une intensification du rayonnement UV-B due à la raréfaction de l'ozone pourrait donc avoir des effets redoutables (voir plus loin).

Des conséquences très graves pourraient notamment en résulter, selon les experts du programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE)⁽²⁾, en ce qui concerne la santé humaine (cancers de la peau et cataracte), la croissance des plantes terrestres et l'équilibre des écosystèmes aquatiques (avec une diminution probable des rendements de l'agriculture et de la pêche)

Les effets des ultraviolets peuvent être d'autant plus néfastes que leur longueur d'onde est courte. Or, l'atténuation du rayonnement solaire par l'ozone est précisément d'autant plus forte que la longueur d'onde des rayons concernés est faible.

1.3.2. La contribution à l'effet de serre naturel

Autant l'effet de serre additionnel, réchauffement de l'air dû aux activités humaines, est un phénomène dangereux (voir plus loin), autant l'effet de serre naturel, qui résulte de l'absorption par l'atmosphère du rayonnement infrarouge émis par la terre, est indispensable à la vie sur terre.

En l'absence d'atmosphère, la température moyenne à la surface de notre planète serait en effet, de - 19 °C au lieu de 15 °C.

L'effet de serre naturel joue, par conséquent, un rôle fondamental dans le maintien, indispensable à la vie, de l'eau sous forme liquide à la surface de la terre.

Avec la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone (CO₂), l'ozone est un des principaux gaz à effet de serre (ses propriétés d'absorption ne se limitent donc pas au seul domaine des longueurs d'onde ultra-violettes et exercent également leurs effets dans le domaine spectral de l'infrarouge thermique autour de 10 micromètres).

Les constituants minoritaires de l'atmosphère, déjà évoqués dans ce rapport en raison de leur influence sur l'équilibre de l'ozone (méthane, oxydes nitreux, composés organo-halogénés), contribuent également à l'effet de serre.

Leur rôle est d'autant plus important que leurs bandes d'absorption caractéristiques, dans le domaine des longueurs d'ondes infrarouges, ne se confondent pas avec celles de la vapeur d'eau et du gaz carbonique.

A masse équivalente dans l'atmosphère, le pouvoir radiatif du méthane et de l'oxyde nitreux mesuré en termes de réchauffement de la surface est, en outre bien supérieur à celui du gaz carbonique. Ce dernier demeure cependant le principal responsable de l'effet de serre naturel comme le montre le tableau 1 :

Tableau 1 : Contributions respectives à l'effet de serre naturel des différents constituants concernés

Constituant	Contribution relative (%) à l'effet de serre naturel
CO ₂	66 %
CH ₄	22 %
N ₂ O	5 %
H ₂ O (stratosphère)	7 %

Les gaz absorbants précités (dioxyde de carbone, méthane, oxyde nitreux) sont produits naturellement mais aussi de façon artificielle. L'accroissement de leur concentration dans l'atmosphère, sous l'effet des activités humaines, provoque un effet de serre additionnel menaçant. En ce qui concerne les composés chlorés, les chlorofluorocarbones sont les seuls gaz à effet de serre d'origine exclusivement industrielle.

Ils sont mis en cause à ce titre mais surtout parce qu'ils sont soupçonnés de détruire l'ozone.

2. LA MISE EN CAUSE DES COMPOSÉS CHLORÉS INDUSTRIELS

2.1. LA CHARGE DE CHLORE DANS L'ATMOSPHERE A CONSIDÉRABLEMENT AUGMENTÉ SOUS L'EFFET DES ACTIVITÉS HUMAINES...

A l'époque pré-industrielle, le seul composé chloré présent en quantité significative dans l'atmosphère était le chlorure de méthyle CH₃Cl, d'origine naturelle. Sa concentration était de 0,6 milliardième. Le contenu en "équivalent chlore" de la stratosphère est aujourd'hui de trois milliardièmes, soit cinq fois supérieur.

Cette évolution est due à la croissance de la production industrielle de composés organo-halogénés (chlorofluorocarbones, tétrachlorure de carbone, méthyl chloroforme...).

Les quantités annuelles rejetées (1,2 à 1,6 MT pour les CFC, 0,8 MT pour le tétrachlorure de carbone et 0,5 MT pour le méthyl chloroforme) paraissent pourtant faibles en comparaison des 210 MT de tonnes d'équivalent chlore émises chaque année au niveau du sol, des océans aux volcans.

Cependant - notent nos experts - la troposphère, jouant le rôle de filtre, réduit pratiquement à zéro la composante naturelle de la source stratosphérique de chlore.

En raison de l'homogénéité du mélange atmosphérique due à l'invariance, quelle que soit l'altitude, de la concentration de ses constituants, toute espèce, même de masse supérieure à la masse moyenne de l'atmosphère, peut à partir du sol diffuser vers des hauteurs supérieures.

Mais, comme le soulignent MM. MÉGIE et POMMEREAU : «Si deux espèces ont des sources d'égale intensité et que l'une ne subit aucune interaction dans la troposphère (c'est le cas des CFC), alors que l'autre est soluble dans l'eau ou détruite chimiquement, seule la première parviendra en quantité appréciable dans la stratosphère».

Ce qui importe, ce n'est donc pas tant l'intensité de la source au sol que sa capacité, liée à sa durée de vie, d'atteindre les régions supérieures de l'atmosphère.

2.1.1. Les sources naturelles de chlore

Chaque année, environ 200 MT de chlore moléculaire Cl_2 et d'acide chlorhydrique HCl sont émises par les océans dans l'atmosphère (à partir de chlorures de différents métaux). Ces deux constituants, $\text{Cl}_2 + \text{HCl}$, étant solubles dans l'eau, leur durée de vie dans l'atmosphère n'excède pas une dizaine de jours. Aussi quelques fractions de millièmes seulement de cette émission atteindront, à terme, la stratosphère.

- Le même raisonnement s'applique à la source volcanique dont la production annuelle d'acide chlorhydrique (10 MT en moyenne globale) ne correspond qu'à 1 % de la contribution totale des injections dans la stratosphère de constituants chlorés d'origine industrielle.

- Comme cela a déjà été souligné, les seuls constituants organo-halogénés d'origine naturelle dont la durée de vie dans la troposphère est suffisamment longue pour constituer une source appréciable de chlore stratosphérique sont produits dans les régions photosynthétiquement actives des océans (réactions à faible

profondeur entre les ions chlore ou brome et les espèces soufrées produites par les algues).

Il en résulte une production de chlorure de méthyle CH_3Cl d'environ 5 MT par an (sa concentration de 0,6 milliardième n'a pas varié depuis dix ans).

2.1.2. Les sources industrielles

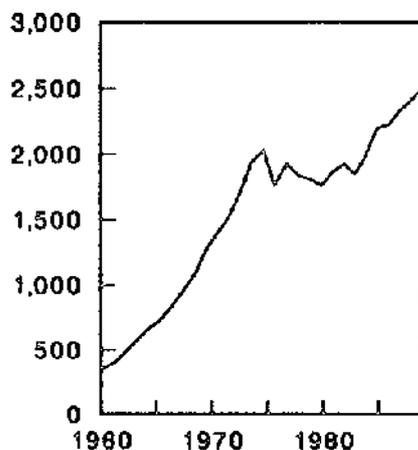
2.1.2.1. Surtout les CFC...

Les chlorofluorocarbones (CFC) dérivent des hydrocarbures, par substitution d'atomes de chlore, Cl, de fluor, F, ou d'hydrogène, H, (hydrocarbures saturés comme le méthane ou l'éthane ou non saturés comme l'éthylène ou le propène). Leur formule chimique est donc généralement de la forme $\text{C}_a \text{H}_b \text{Cl}_c \text{F}_d$. Mais l'habitude a été prise de les désigner, sous l'appellation CFC, par un système universel de numérotation à trois chiffres (le chiffre des centaines indique le nombre d'atomes de carbone moins un, celui des dizaines correspondant au nombre d'atomes d'hydrogène plus un, le chiffre des unités étant égal au nombre d'atomes de fluor. Par exemple : $\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$ = CFC 113).

Développés par General Motors au début des années trente, ces produits, liquides ou gazeux, ont connu une augmentation très rapide de leur consommation de 1945 à 1974, du fait de leurs propriétés physiques qui les rendent faciles d'emploi et aptes à des utilisations très variées (inflammabilité, faible toxicité, stabilité thermique, miscibilité avec l'eau et l'huile, pouvoir solvant et compatibilité avec de nombreux métaux et plastiques...).

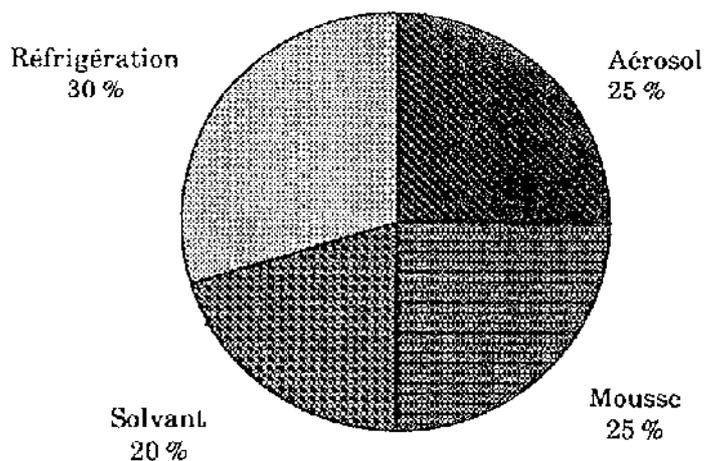
La production des CFC a marqué le pas après 1974 en raison d'une saturation de certains débouchés et des effets des premières inquiétudes relatives à la couche d'ozone (restrictions concernant les CFC 11 et 12, en 1977 en Suède, et en 1978 aux Etats-Unis). Elle a diminué en 1982, sous l'effet de la diminution de la production des aérosols, mais semble avoir recommencé à augmenter depuis (développement de la production de certains pays du tiers monde et de l'utilisation des CFC 113 et 114, nouveaux débouchés trouvés pour les CFC 11 et 12...).

Graphique 2 :
Estimation de la production mondiale de CFC



Les principaux secteurs d'utilisation des CFC sont, par ordre d'importance, le froid (fluides utilisés pour la réfrigération et la climatisation), les aérosols (propulseurs), les mousses (agents gonflants et isolants) et, enfin, les solvants (nettoyage dans l'industrie électronique et la mécanique de précision...).

Graphique : 3
Consommation mondiale de CFC en 1989 :
répartition par grands secteurs d'utilisation



Selon notre expert M. VIVIEN (3), chargé d'études au Centre Économie-Espace-Environnement de l'Université de Paris I, la production des chlorofluorocarbures serait actuellement de :

- 375 000 tonnes pour le CFC 11 (aérosols, froid, mousses),
- 450 000 tonnes pour le CFC 12 (mêmes utilisations),
- 150 000 tonnes pour le CFC 113 (solvants),
- 150 000 tonnes pour le HCFC 22 (froid et mousses),
- 15 000 tonnes pour le CFC 114 (aérosols, froid, mousses),
- 15 000 tonnes pour le CFC 115 (froid).

La très grande stabilité chimique des CFC et leur absence de réactivité leur confère une durée de vie très longue dans la troposphère (de l'ordre de plusieurs dizaines d'années).

Ces constituants sont ainsi à même de diffuser, à terme, vers la stratosphère et de contribuer à l'augmentation du contenu de celle-ci en produits chlorés, lorsque le chlore qu'ils contiennent se trouvent libérés par photodissociation, sous l'action du rayonnement solaire.

«Au total - note notre expert M. MÉGIE - l'ensemble des chlorofluorocarbures conduit aujourd'hui à une concentration relative en constituants chlorés dans l'atmosphère double de celle du chlorure de méthyle»(1).

Il convient de souligner que :

- Les résultats actuels sont surtout la conséquence de l'augmentation des quantités produites et émises ces dernières années (le contenu en "équivalent chlore" de la stratosphère aujourd'hui est calculé en prenant en compte, non seulement le niveau présent des sources troposphériques, mais également tout le chlore déjà libéré au cours des années passées et qui est à l'oeuvre dans les chaînes catalytiques de destruction de l'ozone).

- Les concentrations de chlore dans l'atmosphère continueraient à augmenter avant de se stabiliser ou de décroître, même en cas de blocage ou de réduction des émissions.

Au facteur lié à la durée de vie des CFC s'ajoute le délai qui peut s'écouler entre leur utilisation et leur émission. Les CFC peuvent s'échapper lors de la fabrication (cas des mousses flexibles) ou de la consommation des biens (cas des aérosols) dans lesquels ils sont employés. Mais ils sont aussi parfois incorporés dans des produits plus durables (mousses rigides à cellules fermées servant à l'isolation, fluides réfrigérants des systèmes de réfrigération ou de climatisation). Ils peuvent alors n'être émis dans l'atmosphère que plusieurs années après leur utilisation.

La longévité des CFC est réduite lorsqu'ils sont "hydrogénés" (cas du HCFC₂₂ précité). Les HCFC ont, en effet, la propriété de réagir chimiquement avec le radical hydroxyle OH et d'être ainsi détruits chimiquement dans la troposphère (la durée de vie du HCFC₂₂ n'est ainsi que de 20 ans). Cette propriété d'oxydation rapide par OH est un avantage qui peut être recherché dans la mise au point de substituts aux CFC, peu nocifs pour l'ozone.

En attendant, d'autres composés chlorés industriels contribuent également à l'augmentation de la charge en chlore de la stratosphère.

2.1.2.2. ... Mais aussi d'autres composés organo-halogénés

Comme le signalent nos experts, les CFC ne sont pas les seuls constituants chlorés produits industriellement (1). Deux composés, dont la production et la concentration dans l'atmosphère sont loin d'être négligeables méritent en particulier d'être signalés : le tétrachlorure de carbone CCl₄ et le méthylchloroforme ou trichloroéthane CH₃CCl₃.

- Le tétrachlorure de carbone, dont la production annuelle dépasse 800 000 tonnes a une durée de vie de l'ordre de 50 ans. Sa teneur atmosphérique est de 0,14 milliardième. Il est utilisé surtout pour fabriquer des CFC mais entre également dans la fabrication de pesticides, de solvants, de caoutchoucs ou de teintures synthétiques, etc.

- La durée de vie du méthylchloroforme n'est que de 6 ans environ, mais sa production annuelle dépasse 500 000 tonnes et sa concentration relative dans l'atmosphère est de 0,12 milliardième. C'est un solvant à usages multiples employé dans les produits de nettoyage, les produits adhésifs et les aérosols.

Le tableau 2, extrait d'un rapport du programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), donne la ventilation suivante de la concentration de chlore atmosphérique en 1985 :

**Tableau 2 :
Ventilation de la concentration de
chlore atmosphérique en 1985**

Sources	%
Industrielles :	
CFC-11	22 %
CFC-12	25 %
CFC-113	3 %
CFC-114	<1 %
CFC-115	<1 %
HCFC-22	3 %
Tétrachlorure de carbone	13 %
Méthyle chloroforme	13 %
Naturelles :	
Chlorure de méthyle	20 %

Il doit être aussi tenu compte des effets des halons, composés organo-bromés utilisés depuis le début des années soixante-dix comme agents extincteurs gazeux. Leur production annuelle n'est pas considérable (25 000 tonnes au total pour les halons 1211 et 1301) mais leur pouvoir de destruction de l'ozone serait beaucoup plus puissant que celui des CFC 11 et 12 (voir plus loin).

Le tableau 3 résume les teneurs relatives, les taux annuels d'augmentation et les durées de vie des principaux constituants organo-chlorés.

Tableau 3 : Evolution de la concentration atmosphérique des principaux constituants organo-chlorés

Constituant	Teneur relative (pptv)	Taux d'augmentation		Durée de vie (années)
		pptv	%	
CH ₃ Cl	600			1.5
CH ₃ Br	10-15			1.5
CFCl ₃ (CFC-11)	280	9.5	4	60
CF ₂ Cl ₂ (CFC-12)	484	16.5	4	120
CF ₃ Cl (CFC-13)	5			400
C ₂ F ₃ Cl ₃ (CFC-113)	60	4-5	10	90
C ₂ F ₄ Cl ₂ (CFC-114)	15			200
C ₂ F ₅ Cl (CFC-115)	5			400
CCl ₄	146	2.0	1.5	50
CHF ₂ Cl (HCFC 22)	122	7	7	15.3
CH ₃ CCl ₃	158	6.0	4	6.3
CBrClF ₂ (halon 1211)	1.7	0.2	12	25
CBrF ₃ (halon 1301)	2.0	0.3	15	110

pptv : millièmes de milliardièmes.

Ces chiffres reflètent la tendance à l'augmentation de la teneur en chlore de l'atmosphère, signalée dans la partie qui s'achève de ce rapport.

2.2. ... DES TRAVAUX DE LABORATOIRE MENÉS DANS LES ANNÉES SOIXANTE-DIX ONT CONDUIT À REDOUTER QU'IL N'EN RÉSULTE UNE DIMINUTION DE LA CONCENTRATION D'OZONE

La controverse de la fin des années soixante relative aux effets sur la couche d'ozone des vols supersoniques a eu l'avantage de susciter un important effort de recherche dans le domaine des sciences de l'atmosphère (5). Dans la lignée des travaux publiés, en 1970, dans ce cadre, par P. CRUTZEN, sur la chimie des oxydes d'azote dans la

stratosphère, des chercheurs se demandèrent si d'autres produits ne pouvaient pas être eux aussi à l'origine de cycles catalytiques destructeurs de l'ozone.

2.2.1. Les travaux de STOLARSKI et CICERONE sur les oxydes de chlore

Les américains R. STOLARSKI et R. CICERONE furent ainsi les premiers à s'interroger, en 1974, sur la nocivité des oxydes de chlore. Mais ce sont leurs collègues M. MOLINA et S. ROWLAND qui en tirèrent ensuite des conclusions conduisant à la mise en cause des chlorofluorocarbures.

2.2.2. Les hypothèses de MOLINA et ROWLAND sur les effets ozonocides des CFC

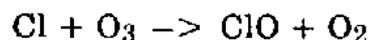
C'est au chimiste anglais James LOVELOCK que doit être attribuée la mise en évidence, à la fin des années soixante, de l'aptitude des CFC à migrer dans la troposphère sans y être décomposés.

Cette propriété leur permet d'atteindre intacts la stratosphère où leur chlore se trouve libéré, par photodissociation, sous l'action du rayonnement solaire.

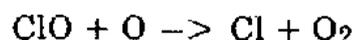
Le mérite de MOLINA et de ROWLAND a été de démontrer avec précision le mécanisme par lequel les CFC peuvent déclencher un cycle catalytique de destruction de l'ozone par oxydation du chlore dans la stratosphère.

Les nuisances éventuelles des CFC avaient cependant déjà fait l'objet auparavant d'une étude de l'Académie des Sciences américaine et les producteurs, dès 1972, avaient créé à ce sujet leur propre organisme de recherche, le Fluoro Program Panel.

Selon MOLINA et ROWLAND, le chlore libéré par la photodissociation des CFC détruit l'ozone au cours d'une réaction dont résulte la formation de monoxyde de chlore (ClO) :



Le monoxyde de chlore réagit alors avec un atome d'oxygène produit par la photodissociation d'une molécule d'ozone



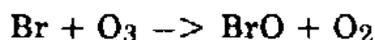
Le chlore initial se trouve ainsi libre à nouveau de poursuivre son action contre l'ozone.

Intervenant comme catalyseur, un seul atome de chlore peut détruire de la sorte jusqu'à 100 000 molécules d'ozone avant d'être consommé par d'autres réactions (formation d'acide chlorhydrique évacué par les précipitations ou stockage du monoxyde de chlore dans des molécules-réservoir).

2.2.3. Les travaux de WOLFSY et Mac ELROY sur les oxydes de brome

Ce furent ensuite au tour des halons et des oxydes de brome d'être soupçonnés d'exercer des effets destructeurs sur l'ozone, à la suite des travaux de WOLFSY et de Mac ELROY (5).

En effet, le brome peut être suspecté de contribuer également à la déplétion de l'ozone à la suite d'un processus d'oxydation analogue à celui qui se produit avec le chlore



En outre, la réaction du monoxyde de brome et du monoxyde de chlore peut libérer des atomes de chlore et de brome dangereux pour l'ozone :



Les recherches suscitées par la découverte du trou d'ozone antarctique ont confirmé les présomptions, fondées sur les travaux scientifiques qui viennent d'être rappelés, concernant la nocivité pour l'ozone des espèces organo-halogénées.

2.3. DES PRÉSOMPTIONS CONFIRMÉES PAR LES INVESTIGATIONS QUI ONT SUIVI LA DÉCOUVERTE DU TROU D'OZONE ANTARCTIQUE

Différentes hypothèses, qui seront passées plus loin en revue, ont été avancées pour expliquer la baisse spectaculaire de la concentration d'ozone au-dessus du pôle Sud (cycles solaires, vents ascendants, refroidissement de la stratosphère, éruptions volcaniques...). La seule qui soit demeurée plausible attribuée au chlore une part de responsabilité essentielle dans ce phénomène.

2.3.1. Seule l'action du chlore d'origine industrielle permet actuellement de comprendre ce phénomène

Nos experts sont formels : seul le rôle des chlores résiste à l'analyse lorsqu'il s'agit d'interpréter les causes de la baisse, depuis 1979, du minimum printanier d'ozone au pôle Sud.

2.3.1.1. La découverte du "trou" et les campagnes d'observation qui l'ont suivie

L'avertissement lancé par MOLINA et ROWLAND, en 1974, fut d'emblée pris au sérieux par les milieux scientifiques et politiques. Aussi, un vaste programme de surveillance fut-il mis en place au début des années quatre-vingt à partir des données recueillies par des ballons ou par avion, et des mesures fournies par le système TOMS (Total Ozone Mapping System) du satellite Nimbus lancé en 1979.

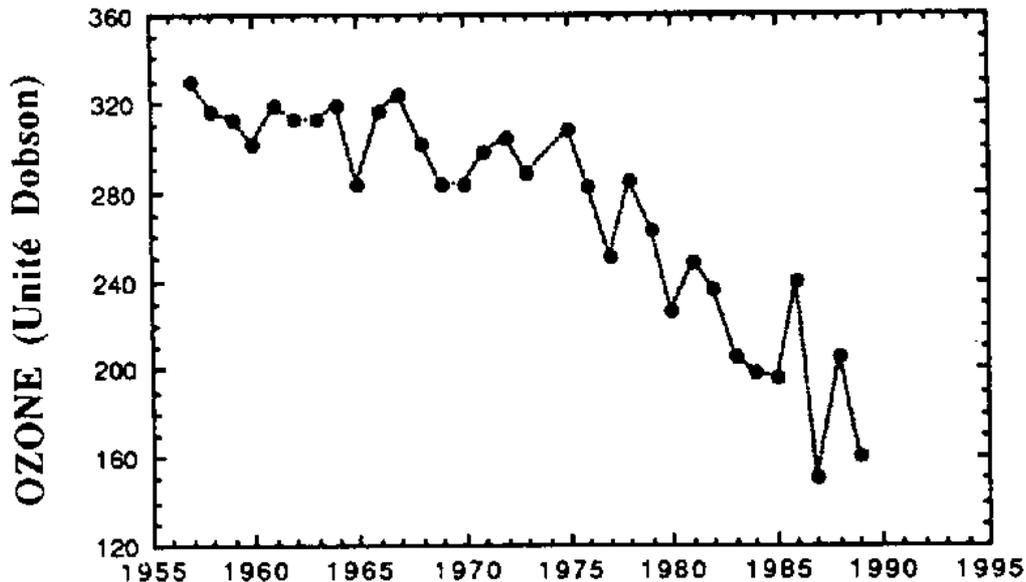
C'est dans ce contexte qu'éclata, en 1985, la nouvelle de la découverte par trois chercheurs du British Antarctic Survey de ce que l'on a pris coutume d'appeler le "trou d'ozone antarctique".

Alors que des relevés continus étaient poursuivis depuis 1957, année géophysique internationale, une baisse systématique de la concentration d'ozone au-dessus du pôle Sud avait été constatée durant le printemps austral, à partir de 1979.

L'article de Joseph FARMAN (6) publié dans "Nature" faisait état d'une baisse de 40 % de ce minimum, mesurée entre 1979 et 1985, à partir des stations de Halley Bay (Grande-Bretagne) et de Syowa (Japon).

Le graphique ci-après, extrait du rapport d'expertise de MM. MÉGIE et POMMERAU, montre que ce phénomène, depuis, a eu tendance à s'accroître, malgré certaines fluctuations, comme la remontée de 1988 (ces modulations seraient dues aux oscillations quasi-biennales de la circulation des vents stratosphériques équatoriaux ou à des modifications de climat de la troposphère, qui influeraient sur les températures et donc sur l'abondance des nuages polaires stratosphériques).

Graphique 4 :
Colonne totale moyenne d'ozone
observée au mois d'octobre au-dessus de la
station britannique de Halley Bay (76 °S) en Antarctique
depuis 1957 à l'aide d'un spectrophotomètre Dobson



De nombreuses observations sont venues confirmer et compléter les premières découvertes.

- Délaissées dans un premier temps, parce que difficiles à interpréter dans les régions polaires en raison de la faible élévation du soleil, les données TOMS du satellite Nimbus ont été retraitées. Elles ont ainsi permis de dresser des cartes d'ozone montrant la superficie du trou (ou des "minitrous" de 1988).

- Par une programmation détaillée des vols simultanés d'avions DC 8 et ER 2 (avion espion américain U2 modifié), la campagne aéroportée AAOE (Airborne Antarctic Ozone Experiment) a permis, en 1987, de recueillir de nombreux et précieux résultats concernant la destruction de l'ozone polaire.

- Des sondages hebdomadaires par ballons, pratiqués depuis cette même année 1987, à partir des bases américaines Mac Murdo et Amundsen Scott, ont démontré que l'ozone polaire était essentiellement détruit à une altitude comprise entre 12 et 22 km (la valeur résiduelle de la concentration d'ozone dans cette branche d'altitude, la plus froide de la stratosphère, était voisine de zéro en 1987, aux alentours de 16 km).

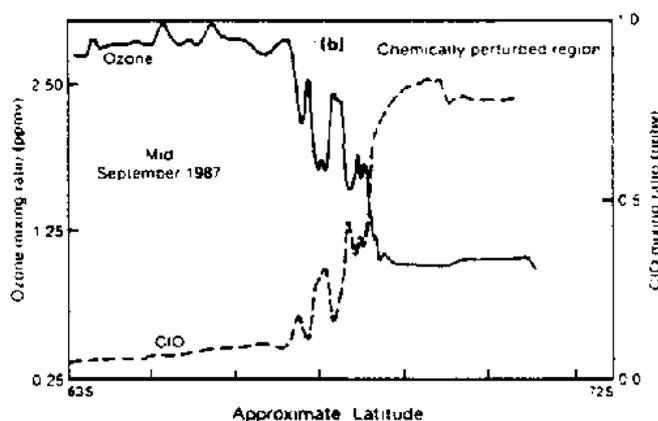
2.3.1.2. *La plausibilité des interprétations basées sur des réactions de chimie hétérogène avec du chlore de provenance industrielle*

La campagne d'observation AAOE, précitée, a porté non seulement sur l'ozone mais sur de nombreuses autres espèces chimiques et sur les nuages stratosphériques.

Elle a, notamment, fait apparaître une concentration, dans la nuit polaire, des chlores actifs susceptibles de détruire l'ozone (Cl, ClO et OCIO) 500 fois plus élevées qu'aux latitudes moyennes.

La corrélation, montrée par le graphique ci-dessous, entre la baisse de la concentration d'ozone, au retour du soleil en septembre, et l'augmentation de la concentration d'oxyde de chlore est tout à fait frappante.

Graphique 5 :
Corrélation entre la concentration de monoxyde de chlore et la destruction de l'ozone au pôle Sud



Le chlore, au total, n'est cependant pas plus abondant au-dessus du pôle Sud que dans le reste de la stratosphère, mais il y est présent sous une forme plus virulente.

Une réduction relative de la quantité des oxydes d'azote a également été mise en évidence, dans l'obscurité hivernale, à l'intérieur du vortex polaire.

Enfin, des nuages stratosphériques de deux types différents (nappes de brume fines ou nuages plus denses de particules de glace d'eau) ont été observés.

La présence en milieu polaire de chlores actifs dans la stratosphère s'accompagnant d'une raréfaction des composés azotés, est attribuée à des réactions de chimie hétérogène (entre gaz et cristaux solides) qui se produisent à la surface des nuages stratosphériques.

Ces réactions, actuellement étudiées en laboratoire, ont pour effet la transformation en espèces gazeuses actives des chlores contenus dans l'espèce stable qu'est l'acide chlorhydrique HCl et la séquestration des composés azotés dans les particules de glace des nuages stratosphériques (après formation d'acide nitrique HNO₃).

La désactivation préalable des oxydes d'azote supprime ensuite toute possibilité de déchlorination, une fois les chlores libérés sous la forme Cl, ClO ou OCIO.

Ceux-ci peuvent alors détruire l'ozone selon des mécanismes qui font appel à des réactions différentes de celles du cycle catalytique mis en évidence par MOLINA et ROWLAND.

Trois cycles de réactions, dont on trouvera le détail dans le rapport de MM. MÉGIE et POMMEREAU (1), ont été proposés par SOLOMON, Mac ELROY et MOLINA. Le cycle de MOLINA, appelé cycle du dimère de ClO (dans lequel ClO réagit avec lui-même pour former Cl₂O₂) expliquerait, à lui seul, plus de 50 % de la destruction de l'ozone au pôle Sud.

Les trois mécanismes proposés nécessitent la présence de soleil. Aucun processus de dépletion de l'ozone qui serait actif durant la nuit polaire n'a pu être identifié.

Pour MM. MÉGIE et POMMEREAU, il ne fait guère de doute que les CFC sont la principale cause de présence dans la stratosphère de chlore détruisant l'ozone.

En effet, la concentration de chlorure de méthyle dans l'atmosphère n'est - on l'a vu - que de 0,6 milliardième pour une teneur totale en chlore dépassant 3 milliardièmes.

Concernant l'hypothèse volcanique, nos experts soulignent que le trou d'ozone s'est formé à partir de 1979, soit trois ans avant l'éruption du volcan El Chichon au Mexique, en 1982, et n'a, depuis, jamais été aussi prononcé.

Les seules espèces halogénées sources en augmentation permanente sont - selon MM. MÉGIE et POMMEREAU - les CFC.

La responsabilité des chlores, et donc des CFC, dans le mécanisme photochimique rapide qui détruit l'ozone polaire au

printemps est, pour eux, un fait d'autant plus acquis que les autres hypothèses ont toutes dû être abandonnées.

Leur point de vue est d'ailleurs partagé par les meilleurs spécialistes mondiaux que vos rapporteurs ont rencontrés aux Etats-Unis : Richard STOLARSKI et Robert WATSON, de la NASA, Susan SOLOMON, de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), Guy BRASSEUR, du NCAR (National Center on Atmospheric Research), Mario MOLINA, de l'Université de Californie...).

2.3.1.3. Les autres hypothèses ont dû être abandonnées

Les raisons conduisant à rejeter la responsabilité du chlore d'origine naturelle dans la destruction de l'ozone ont déjà été exposées dans ce rapport, qu'il s'agisse des éruptions volcaniques ou du transport vers la stratosphère d'espèces-sources stables (chlorures, bromures et iodures de méthyle) produites dans les régions photosynthétiquement actives des océans et diffusant à la surface des eaux.

Les autres hypothèses avancées ne résistent pas davantage à l'analyse.

- L'explication fondée sur les variations de l'activité solaire est totalement délaissée aujourd'hui. Il avait été proposé un temps que les éruptions solaires puissent fournir des oxydes d'azote destructeurs d'ozone par ionisation de l'air.

Les mesures effectuées en Nouvelle-Zélande et au pôle Sud ont montré l'inexactitude de l'interprétation des données des satellites SAGE I et SAGE II, sur lesquelles était fondée cette hypothèse.

- De même, les mesures de la concentration verticale de l'ozone et des espèces-sources des constituants qui régulent son équilibre, ôtent toute crédibilité aux suppositions émises au sujet du rôle d'un transport ascendant local (selon cette hypothèse, aujourd'hui abandonnée, l'air riche en ozone serait repoussé vers la stratosphère inférieure et formerait un anneau un peu éloigné du pôle. Il serait remplacé par un air pauvre en ozone provenant des plus faibles altitudes).

- Enfin, les relevés de température effectués et les observations satellitaires ne révèlent ni refroidissement de la stratosphère, ni augmentation de la fréquence des nuages polaires stratosphériques. Les hypothèses émises dans ce sens se trouvent donc démenties. Il est vraisemblable, en revanche, que l'augmentation de la teneur en chlore

de la stratosphère accroît la virulence des réactions de chimie hétérogène qui se produisent, par grand froid (- 95 °C) à la surface des nuages stratosphériques.

2.3.2. Une chimie identique explique les mini-trous de l'Arctique

Du fait de différences dans la configuration des deux continents, les conditions climatiques régnant au pôle Nord et au pôle Sud ne sont pas les mêmes. L'alternance océan-continents dans l'Arctique explique que le vortex y dure moins longtemps, que les températures y soient moins froides (de 8 à 10 °C environ) et l'isolement de l'air polaire moins prononcé, en hiver, que dans l'Antarctique.

Au sud, la dépression hivernale est généralement centrée sur le pôle, de façon stable, jusqu'au réchauffement final printanier qui n'intervient pas avant le milieu de novembre (deux mois après l'équinoxe de printemps).

Au nord, le vortex polaire se déplace rapidement pour parfois se scinder en deux. De brusques réchauffements se produisent régulièrement de novembre à février. L'échauffement final peut avoir lieu dès janvier et intervient rarement au-delà de la mi-février c'est-à-dire un mois avant l'équinoxe de printemps.

De ce fait, la présence de nuages polaires stratosphériques est plus brève dans l'Arctique que dans l'Antarctique. Pourtant la photochimie à l'oeuvre dans les deux pôles paraît être identique, d'après les différentes données recueillies :

- par ballons, dans le cadre des expériences franco-allemandes CHEOPS (Chemistry of the Polar Stratosphere) ;
- par fusée sonde ;
- depuis le sol, en Scandinavie et au Groenland ;
- ou par avion, durant la campagne américaine AASE de 1989 (Airborne Arctic Stratospheric Expedition) .

Des constatations analogues ont, en effet, été effectuées dans les deux continents (réduction des oxydes d'azote, activation des composés chlorés et bromés, diminution de la concentration d'acide nitrique en présence de nuages stratosphériques...).

Aucun trou stable et de large étendue n'a cependant jamais été observé en Arctique. Des "mini-trous", de brève durée de vie (quelques jours), au sein desquels la colonne d'ozone peut être très faible, y ont toutefois été découverts.

2.3.3. La diminution globale de l'ozone

Les investigations scientifiques qui ont suivi la découverte du trou antarctique ont confirmé les hypothèses de MOLINA et ROWLAND sur le rôle du chlore, et partant des CFC, dans la destruction de l'ozone.

Les réactions en phase gazeuse mises en évidence par deux chercheurs américains étaient toutefois insuffisantes pour expliquer une baisse de concentration aussi importante que celle relevée au pôle Sud (150 à 160 unités Dobson en 1987 au lieu de 300 en moyenne de 1957 à 1972, soit une baisse de 50 %). Il a donc dû être fait appel - comme on l'a vu - à des explications complémentaires basées sur la chimie hétérogène.

Des analyses, encore très incomplètes, s'efforçant de discerner les tendances à long terme de l'évolution globale de la couche d'ozone ont par ailleurs été effectuées (rapport PNUE-OMM de 1989)⁽⁷⁾. Elles doivent permettre de mesurer les effets sur l'ensemble de la couche d'ozone de l'augmentation de la charge en chlore de l'atmosphère.

Mais elles peuvent aussi, de façon plus précise, révéler les indices d'une éventuelle dilution des trous d'ozone polaires dans toute la stratosphère (voir plus loin), par comparaison entre les résultats des observations expérimentales et les prévisions des modèles qui n'intègrent pas encore la chimie hétérogène des nuages stratosphériques.

2.3.3.1. L'évolution de la colonne totale d'ozone

Volontairement limitées à la période postérieure à 1969, en raison des perturbations exceptionnelles dues aux explosions nucléaires atmosphériques des années soixante, les données du réseau des stations sol équipées de spectrophotomètres Dobson mettent en évidence des diminutions significatives de la colonne d'ozone (de - 2 % à - 6 % pendant les mois d'hiver, entre 1969 et 1986, de 30 à 64° de latitude nord)

2.3.3.2. L'évolution de la distribution verticale de l'ozone

Les données obtenues par la méthode UMKEHR dans dix stations au sol de l'hémisphère nord, au moyen du spectrophotomètre Dobson, révèlent, de leur côté, une diminution moyenne de la concentration d'ozone de $- 0,4 \pm 0,3$ % par an à 40 km (valeurs

corrigées des effets du cycle solaire. C'est à cette altitude que le chlore, d'après les modèles photochimiques, est censé exercer ses ravages).

Il convient cependant de souligner que ces résultats sont d'une part entachés d'incertitudes qui seront évoquées dans la suite de ce rapport et ne sont, d'autre part, que très partiels (aucune extrapolation ne peut notamment être faite à partir de ces données en ce qui concerne les régions tropicales, équatoriales, polaires et l'hémisphère sud dans son ensemble).

Une baisse de la concentration d'ozone vers 25 km a, par ailleurs, été constatée, à partir des données fournies par satellite comme de celles recueillies par les stations au sol. Elle traduit la prépondérance du rôle de la basse stratosphère dans les tendances évolutives de la couche d'ozone.

Accusés d'être à l'origine de la destruction d'ozone provoquée par le chlore dans la stratosphère, les CFC sont également présumés coupables de participer à l'effet de serre.

2.4. LES CFC CONTRIBUENT, EN OUTRE, À L'EFFET DE SERRE ADDITIONNEL DONT LES CONSÉQUENCES PEUVENT ÊTRE TRÈS GRAVES

L'effet de serre justifierait par sa gravité et sa complexité, qu'une étude de l'Office lui soit entièrement consacrée.

On rappellera seulement ici que les constituants organohalogénés, qui influent sur l'équilibre de la couche d'ozone, sont également des gaz à effet de serre, à l'image du méthane ou de l'oxyde nitreux, du fait de leurs caractéristiques spectrales dans le domaine des longueurs d'onde infra-rouge. Leur rôle dans l'effet de serre additionnel est d'autant plus important que leur pouvoir de réchauffement de la surface est, à concentration égale dans l'atmosphère, supérieur de plusieurs ordres de grandeur à celui du gaz carbonique (de 4 000 à 5 000 fois par unité de masse pour les CFC, selon un tableau figurant dans le rapport de nos experts).

Les CFC absorbent, en outre, les infrarouges dans une partie différente du spectre (longueurs d'ondes comprises entre 7 et 13 micromètres) dénommée "fenêtre atmosphérique" parce que les rayons, avant l'ère industrielle, pouvaient s'y échapper vers l'espace.

Le tableau ci-après révèle que les chlorofluorocarbures sont déjà responsables de plus de 20 % de l'effet de serre additionnel calculé pour 1990.

Tableau 4 : Contributions respectives à l'effet de serre des différents constituants concernés

Constituant	Contribution relative (1990)
CO ₂	55 %
CH ₄	15 %
N ₂ O	4 %
O ₃ (troposphère)	2 %
CFC-11	7 %
CFC-12	12 %
Autres CFC	2 %
Autres	3 %

Le potentiel de réchauffement global (GWP = Global Warming Potential) des différents CFC par rapport au CFC-11 est exprimé dans le tableau suivant (réchauffement global calculé à l'équilibre pour une émission annuelle permanente d'une masse unité. Le GWP d'un constituant est proportionnel à sa durée de vie et à son poids moléculaire par rapport à ceux du CFC-11).

Tableau 5 : Potentiel de réchauffement global des différents CFC

Constituant	Durée de vie (années)	GWP
CFC-11	60.0	1.0
CFC-12	120.0	3.0
CFC-113	90.0	1.4
CFC-114	200.0	4.0
CFC-115	400.0	7.5
HCFC-22	15.3	0.35
CCl ₄	50.0	0.35
CH ₃ CCl ₃	6.3	0.025

La majorité des modèles prévoient qu'une poursuite de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre pourrait avoir de graves conséquences (réchauffement des températures de 1,5 à 4 °C en 2030, entraînant, d'une part, par simple dilatation des océans, une montée des eaux de 0,2 à 1,5 mètre, et d'autre part une désertification des régions situées entre la zone tempérée et les régions tropicales...).

Cependant, les modèles (voir plus loin) peuvent difficilement prendre en compte l'ensemble des phénomènes susceptibles d'influer sur l'évolution des climats (inertie océanique, changements de nébulosité, etc.). Aussi leurs prévisions peuvent-elles se révéler inexactes.

S'agissant du passé, il paraît impossible à nos experts d'imputer sans ambiguïté aux activités humaines le réchauffement de 0,8 à 1 °C de l'atmosphère terrestre constaté depuis l'ère pré-industrielle, malgré l'augmentation concomitante de la concentration des gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O et les CFC).

De telles incertitudes ne sauraient cependant justifier une quelconque inaction dans ce domaine, étant donné la gravité des dangers virtuels encourus.

Le fait pour les CFC d'être accusés ainsi de contribuer à l'effet de serre en même temps que de détruire l'ozone les rend donc doublement justiciables d'une réglementation.

Les incertitudes qui subsistent dans nos connaissances sur les mécanismes de l'effet de serre et de la destruction de l'ozone sont, aux yeux de nos experts, plus inquiétantes qu'apaisantes. En effet, elles ne permettent pas, malheureusement, d'exclure que l'avenir nous réserve de mauvaises surprises si nous ne réagissons pas assez rapidement et assez vigoureusement.

B. DES INCERTITUDES QUI N'INCITENT GUÈRE A L'OPTIMISME

Malgré la fermeté de leurs convictions sur la responsabilité des espèces organo-halogénées (CFC, tétrachlorure de carbone, méthyl chloroforme) dans la destruction de l'ozone et l'effet de serre, nos experts ne sous-estiment pas la marge des incertitudes scientifiques qui continuent d'exister.

Dans la mesure où la situation présente est encore imparfaitement comprise, les prévisions ne peuvent être qu'aléatoires (il existe, de toute façon dans toute prédiction concernant l'atmosphère ou le climat, une part irréductible de hasard liée au caractère non linéaire des processus chimiques et à la soudaineté de certains phénomènes météorologiques).

Aussi, le pire ne peut-il être exclu pour l'avenir, en cas de réaction tardive ou insuffisante de la collectivité.

1. LA COMPRÉHENSION IMPARFAITE DE LA SITUATION PRÉSENTE...

L'interprétation des évolutions passées et présentes de la couche d'ozone et de l'effet de serre est rendue difficile par les limites des performances de nos instruments de mesure et de notre connaissance des phénomènes atmosphériques.

1.1. LES LIMITES DES INSTRUMENTS DE MESURE

Il existe une très grande variété d'instruments, recensés de façon très complète par nos experts, qui permettent de mesurer la concentration dans l'atmosphère des différents constituants qui la composent. Tous ces moyens sont cependant imparfaits, qu'il s'agisse des instruments traditionnels ou des nouveaux instruments plus performants. Les réseaux au sol paraissent insuffisants tandis que la fiabilité des données recueillies par satellites laisse parfois à désirer. Il est nécessaire, dans ces conditions, de recourir à des moyens d'observation complémentaires (avions, ballons).

1.1.1. Instruments traditionnels

Nos experts distinguent, parmi les instruments traditionnels, les instruments de mesure d'ozone au sol et les sondages de température et d'ozone par ballon qui en sont le complément indispensable.

1.1.1.1. Les instruments de mesures d'ozone au sol

- Le plus ancien de ces appareils de surveillance est le spectrophotomètre Dobson, inventé durant les années trente et construit en 110 exemplaires, qui permet de mesurer la colonne totale d'ozone au-dessus de l'observateur (le procédé utilisé consiste à évaluer l'absorption par l'ozone des rayons ultraviolets, en observant simultanément la lumière solaire à deux longueurs d'onde différentes, entre 312 et 324 nanomètres).

L'instrument Dobson rend possible de longues séries d'observation mais il n'est pas facile d'emploi : la qualité des mesures dépend d'un étalonnage effectué par référence à un instrument situé au laboratoire central de Boulder dans le Colorado. De nombreuses corrections sont nécessaires (en fonction de la température, des nuages et des aérosols, d'absorbants parasites...).

Pour ces raisons, le nombre d'observations continues et fiables recueillies par les différents appareils est limité. Ces données ainsi que celles fournies par le spectrophotomètre Brewer (variante du Dobson modernisée par le remplacement du prisme par un réseau optique et l'adjonction d'un ordinateur) sont rassemblées par le Centre Mondial de l'Ozone à Ottawa.

- Les pays de l'Est utilisent le photomètre M-104 (variante améliorée du M-83), fondé aussi sur le principe d'observation de l'absorption des ultraviolets par l'ozone. Aisés d'emploi et bien répartis au-dessus du territoire de l'URSS, ces appareils sont sujets cependant à une dérive de transmission avec la température du fait qu'il s'agit d'instruments à filtre. Leur précision globale est donc moins bonne que celle des Dobson.

1.1.1.2. Les sondages de température et d'ozone

- Concernant les sondages de température, nos experts estiment que leur amélioration dans la stratosphère polaire est une priorité, après avoir rappelé les contraintes, dues au froid, auxquelles est soumise actuellement l'utilisation des ballons dans ce milieu (altitude limitée à 20 km en hiver, utilisation de mélanges d'huile de

moteur et d'antigel pour la préparation des ballons avant le lâcher). Il est intéressant, en effet, de pouvoir vérifier si les variations de la température stratosphérique sont compatibles avec celles de la concentration d'ozone, auxquelles elles sont directement liées entre 35 et 60 km d'altitude.

S'agissant des sondes d'ozone, notre expert, M. POMMEREAU, vante les mérites des sondes électrochimiques, fondées sur une réaction entre l'ozone et une solution aqueuses d'iodure de potassium⁽¹⁾. Il rappelle cependant que les mesures des sondes d'ozone doivent généralement être corrigées et que leur précision est imparfaite.

1.1.2. Nouveaux instruments

L'avantage des nouveaux instruments décrits par nos experts est de permettre non seulement de mieux mesurer l'ozone et sa distribution verticale mais aussi de surveiller d'autres espèces qui interviennent dans l'équilibre photochimique de la stratosphère.

1.1.2.1. Les lidars

Les lidars utilisent la technique du radar laser qui est la seule permettant de mesurer à distance et avec précision la distribution verticale de différents paramètres (ozone, aérosols, température). Ils sont capables de détecter les nuages polaires stratosphériques.

L'altitude de diffusion recherchée est déterminée par la durée qui sépare l'émission de l'impulsion laser du retour du signal rétrodiffusé par l'atmosphère.

Les lidars, peu sensibles à la pollution troposphérique, sont cependant rendus aveugles par la présence de nuages, ce qui constitue leur principale limite.

1.1.2.2. Les sondeurs à micro-ondes

Cette technique américaine consiste à mesurer l'émission de certaines espèces atmosphériques, dont l'ozone et le monoxyde de chlore ClO, dans le domaine micro-ondes. L'intérêt des sondeurs à micro-ondes est qu'ils autorisent des mesures de nuit comme de jour et ne sont pas directement sensibles aux nuages. Leur sensibilité à la vapeur d'eau exige cependant de les employer dans des sites à haute

altitude. Cela limite les possibilités de les utiliser pour mesurer les concentrations de ClO au-dessus des deux pôles.

1.1.2.3. Les spectromètres ultraviolets et visibles

Bien qu'incapables de mesurer la distribution verticale des espèces, les spectromètres ultraviolets et visibles n'en présentent pas moins de nombreux avantages. Ils donnent accès à plusieurs constituants dont l'ozone, le dioxyde d'azote, le dioxyde de chlore et l'oxyde de brome, et pourraient permettre de mesurer l'altitude des nuages stratosphériques. Ces instruments mesurent l'absorption par l'atmosphère de la lumière directe du soleil ou de la lune ou de celle qui est diffusée au zénith. La quantité d'absorbant suivant la ligne de visée est obtenue par comparaison avec des spectres caractéristiques de chaque espèce mesurés en laboratoire. En mode zénithal cette méthode est insensible à la présence de nuages et permet des observations par tous les temps.

1.1.2.4. Les spectromètres infrarouges à transformée de Fourier

L'intérêt de ce procédé est de permettre de mesurer depuis le sol la colonne verticale de très nombreux constituants atmosphériques.

La technique de la spectroscopie infrarouge à haute résolution consiste à observer l'absorption par l'atmosphère de la lumière solaire à grande distance zénithale.

L'interprétation des observations effectuées nécessite cependant de disposer de mesures simultanées de la distribution verticale de température et d'une estimation de celle de l'espèce mesurée.

La précision des résultats varie, en outre, largement avec le constituant observé et se dégrade sensiblement pour les espèces faiblement absorbantes comme le nitrate de chlore ClONO₂.

Le site doit être, enfin, en altitude car l'instrument est sensible à la pollution troposphérique et à la présence de vapeur d'eau et nécessite l'observation par grand beau temps du soleil proche de l'horizon.

Cette méthode n'est donc bien adaptée qu'à l'obtention d'un nombre limité de mesures chaque année. Elle peut, cependant, être utilisée sur une très longue durée.

La technique idéale d'observation n'existe donc pas. En outre, les réseaux au sol présentent de nombreuses insuffisances, du fait du

manque d'homogénéité des instruments de mesure qui viennent d'être décrits et de l'inégale répartition des stations.

1.1.3. L'insuffisance des réseaux au sol

Le réseau des stations au sol équipées de spectrophotomètres Dobson constitue, en ce qui concerne le contenu total en ozone, la seule base de données permettant de prendre en compte la variabilité naturelle de l'atmosphère sur une période suffisamment longue, c'est-à-dire à des échelles de temps décennales (de longues séries continues d'observations ont été rassemblées, depuis 1930, à Arosa, en Suisse, ou depuis 1957, année géophysique internationale, dans l'Antarctique).

Ces instruments sont toutefois localisés pour la plupart dans les régions de moyenne latitude de l'hémisphère nord (entre 30 et 65°).

Pour obtenir, en tenant compte des contraintes financières et opérationnelles, une homogénéisation des instruments de mesures et une répartition plus harmonieuse des stations d'observation, deux orientations ont été définies :

- la première tend à répartir, avec une maille géographique parfois serrée, de petits instruments proches ou identiques et peu coûteux, pour l'étude de mécanismes à moyenne échelle (un réseau européen d'une dizaine de spectromètres UV-visible est en cours d'implantation en ce qui concerne l'Arctique) ;

- la deuxième orientation vise à la constitution d'un réseau mondial de surveillance de la stratosphère à long terme (NDSC : Network for Detection of Stratospheric Change). L'objectif poursuivi est, à partir de six ou sept sites soigneusement sélectionnés (dont l'observatoire de Haute-Provence), de suivre l'évolution de chacune des espèces mesurables depuis le sol, de contrôler l'étalonnage des satellites et d'obtenir les données nécessaires à la validation des modèles multidimensionnels.

Le fonctionnement d'un tel réseau suppose le maintien de la qualité des données, des traitements et des étalonnages sur une très longue période. Pour y parvenir, il a été proposé que chaque instrument et les données qui en sont issues, soient directement contrôlés par une équipe de recherche associée à la discussion et à la publication des résultats (1).

L'ensemble des expérimentateurs, des modélistes et des organisations internationales participant au projet (PNUE, Organisation Météorologique Mondiale) pourraient être regroupés, par ailleurs, dans une organisation internationale.

Le projet NDSC montre qu'une des missions des stations au sol est de contrôler la fiabilité, souvent insuffisante, des mesures par satellite.

1.1.4. Le manque de fiabilité des données recueillies par satellite

L'ozone est mesuré, à bord des satellites, par des techniques de sondage à distance analogues pour l'essentiel à celles des instruments au sol, en absorption dans l'ultraviolet, dans le visible et dans l'infrarouge.

1.1.4.1. Le satellite Nimbus 7

Deux instruments sont embarqués à bord du satellite Nimbus 7 qui a été lancé en 1979 : le TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) et le SBUV (Solar Backscattered UV). Il s'agit d'appareils de visée dans l'ultraviolet "au nadir" (c'est-à-dire à la verticale vers le bas), fonctionnant selon le même principe que les spectrophotomètres Dobson. TOMS est le seul instrument qui permette une vue globale quotidienne de la distribution d'ozone dans l'atmosphère. L'appareil a connu, cependant, une dérive instrumentale, provoquée par une dégradation d'un de ses dispositifs, et a dû, de ce fait, être réétalonné à partir des données Dobson fournies par les stations terrestres. Il commet, d'autre part, des erreurs de mesures lorsque le soleil est bas sur l'horizon, conduisant, selon notre expert, M. POMMEREAU, à une surestimation du trou d'ozone antarctique (1). Quant au SBUV, qui devait permettre de mesurer la distribution verticale de l'ozone (par inversion de la variation des radiances en fonction de la longueur d'onde), il a connu un problème de dérive d'étalonnage encore plus sérieux que celui de TOMS et a tendance à sous-évaluer l'altitude du maximum d'ozone.

1.1.4.2. Les satellites SAGE

L'un des objectifs des satellites SAGE I et SAGE II (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment), lancés en 1979 et 1984, est également de mesurer la distribution verticale de l'ozone. Mais il s'agit, en même temps, d'évaluer la concentration de dioxyde d'azote NO₂ et d'étudier les aérosols. La technique utilisée est différente de celle du SBUV (les instruments SAGE procèdent par occultation solaire directe : le profil vertical de l'ozone est obtenu, sans recours à

des modèles mathématiques, par l'inversion des observations du soleil, dans le visible, au lever et au coucher).

«L'inconvénient de cette technique - nous signale M. POMMERAU - est que le nombre d'occultations solaires est limité, en particulier à haute latitude durant la nuit ou le jour polaire (1)».

M. MÉGIE évoque, pour sa part, «le faible échantillonnage temporel et spatial disponible, qui rend impossible une détermination précise de tendances à l'échelle globale (2)».

SAGE I a cessé, en effet, de fonctionner, en 1981, et ses données ne recouvrent pas celles recueillies par SAGE II, en orbite seulement depuis 1984 (c'est d'ailleurs une comparaison illégitime entre les mesures de NO₂ des deux satellites, au demeurant assez imprécises en-dessous de 22 km, qui a conduit, selon M. POMMERAU, à l'hypothèse erronée expliquant le trou d'ozone antarctique par les variations de l'activité solaire).

Les régions sur lesquelles SAGE transmet le maximum de données sont celles comprises entre 20 et 50° de latitude dans les deux hémisphères.

1.1.4.3. Les autres instruments en orbite

- SAM II utilise également l'occultation solaire pour transmettre des profils verticaux d'aérosols et de nuages stratosphériques.

- Le radiomètre infrarouge TOVS (Tiros Operational Vertical Sounder) embarqué sur un satellite de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) permet de dresser des cartes détaillées d'ozone à petite échelle. Ces cartes de radiance infrarouge peuvent être précieuses pour l'étude des mini-trous d'ozone et de l'évolution de ce composant dans la nuit polaire, ainsi que pour l'identification des nuages stratosphériques polaires. Mais il a fallu, pour les élaborer, surmonter des difficultés liées à des différences de résultats entre les observations du TOVS et celles d'autres satellites ou des stations au sol.

- MM. MÉGIE et POMMERAU évoquent enfin, dans leur rapport (1), d'autres instruments qui, bien qu'embarqués pour des durées souvent plus limitées, ont fortement contribué au développement des connaissances sur la stratosphère (spectromètre à transformée de Fourier ATMOS, utilisé à bord de Spacelab, etc.).

1.1.4.4. Les projets spatiaux d'avenir

En ce qui concerne la stratosphère, le satellite UARS (Upper Atmosphere Research Satellite), qui devrait être lancé à la fin de 1991, embarquera de nombreux instruments destinés à la mesure des espèces azotées, chlorées et hydrogénées, de l'ozone, de la température, et des vents.

Ses observations seront traitées, en temps réel, par un réseau de distribution et d'analyses dont le CNRS et le CNRM (Centre National de Recherche Météorologique) seront parties prenantes.

Des instruments TOMS devraient être mis en orbite à bord de satellites soviétiques (METEOR III, lancé en août 1991) et japonais (ADEOS, lancé en 1995).

Enfin, des successeurs de SAGE II et du satellite TIROS de la NOAA sont envisagés.

Notre expert, M. POMMÉREAU (1), regrette l'absence, parmi tous ces projets, de satellites en orbite polaire permettant d'étudier les phénomènes qui se produisent dans les régions concernées (rien n'est prévu, sur ce plan, avant la fin du siècle. Ceci paraît d'autant plus déplorable que l'expérience UARS a été conçue à une époque où les phénomènes d'ozone polaire n'avaient pas encore été découverts).

M. MÉGIE (1) constate pour sa part, que «la France et l'Europe ont été jusqu'à présent totalement absentes de l'effort d'observation de la stratosphère dans le domaine spatial».

Le seul projet français important dans le domaine de l'environnement est le programme TOPEX POSEIDON qui prévoit le lancement, en 1992, d'un satellite, permettant d'étudier, en coopération avec la NASA, la circulation océanique à moyenne et grande échelle.

Un projet de satellite français GLOB-SAT, lancé éventuellement dans les années 1995-1996, pourrait se consacrer à l'étude des interactions chimiques dans la troposphère et du couplage entre l'atmosphère et la biosphère continentale et marine. Il en résulterait une amélioration de la prise en compte des phénomènes d'ozone polaire et de l'évaluation des bilans globaux des principaux constituants responsables des modifications du climat et de l'environnement global.

1.1.5. La nécessité de moyens d'observation complémentaires

Les imperfections des instruments de mesure basés au sol ou embarqués à bord de satellites nécessitent d'avoir recours à des moyens d'observation complémentaires : avions ou ballons.

1.1.5.1. Les avions

L'intérêt d'employer des avions est de pouvoir effectuer des coupes en latitude.

Notre expert, M. POMMEREAU (1), distingue :

- les avions troposphériques (DC8, Convair...) à bord desquels ne peuvent être effectuées que des mesures à distance dans la stratosphère avec des lidars ou des spectromètres (infrarouge et UV-visibles) ;

- les avions planeurs stratosphériques (type ER2, avion espion américain U2 transformé) dans lesquels on pourra effectuer des mesures automatiques in situ.

Les deux campagnes aéroportées les plus remarquables, l'AAOE en 1987 (Airborne Antarctic Ozone Experiment), et l'AASE (Airborne Arctic Stratospheric Expedition) en 1989, combinaient ces différents moyens. Elles ont déjà été évoquées dans ce rapport.

1.1.5.2. Les ballons

L'avantage des ballons est de pouvoir se rendre dans le milieu stratosphérique.

On distingue :

- Les ballons stratosphériques ouverts (pour évacuer le trop-plein de gaz sans exploser). Ils permettent d'embarquer, pour quelques heures, à 40 km, jusqu'à 2 tonnes de matériel (des instruments de mesure à distance tels que des spectromètres, des sondeurs micro-ondes et des lidars ou des instruments de mesures in situ).

- Les ballons de longue durée, étanches, gonflés à l'hélium ou sans gaz (dans ce dernier cas leur force ascensionnelle est due à la captation du rayonnement infrarouge qui monte du sol ou des nuages). Ils peuvent emporter 50 kg de charge à 30 km pendant deux mois.

M. POMMEREAU (1) rappelle que de grandes campagnes internationales, avec une forte participation d'instruments au sol, ont été organisées dans le passé (BIC : Balloon Intercomparison Campaign, réalisée, en 1983, par les Etats-Unis et expéditions françaises GLOBUS, en 1981, 1983 et 1985).

Elles ont permis, notamment, de valider les observations de satellites tels que SAGE et Nimbus (instrument SBUV).

Le contrôle des étalonnages des instruments en orbite peut également donner lieu à des tirs de fusées-sondes.

Limité par les imperfections des instruments de mesure spécifiques utilisés, notre effort de compréhension des mécanismes de destruction de l'ozone et d'effet de serre se heurte également à la difficulté d'appréhender de façon globale les phénomènes atmosphériques.

1.2. L'EXPLICATION INCOMPLÈTE DES PHÉNOMÈNES ATMOSPHÉRIQUES

En attendant que les erreurs de mesures commises puissent être évaluées, et donc corrigées en confrontant les observations de différentes sources, il demeure impossible, en l'état actuel de la science, d'expliquer la totalité des phénomènes qui influent sur l'équilibre de la composition de l'atmosphère et sur les climats.

1.2.1. La difficulté d'établir une théorie générale de l'atmosphère

De nombreuses incertitudes subsistent en ce qui concerne la chimie, le bilan radiatif et la dynamique de l'atmosphère.

1.2.1.1. Les processus chimiques

- S'agissant des processus chimiques, les inconnues ont trait aux vitesses des réactions (les incertitudes peuvent aller jusqu'à 50 %), à l'importance des mécanismes de chimie hétérogène qui pourraient coexister dans la haute atmosphère, en dehors des régions polaires, ainsi qu'à l'évolution des différents constituants.

La quantification des constituants-sources des familles de composés hydrogénés, azotés ou chlorés qui influent sur l'équilibre de l'ozone est malaisée pour plusieurs raisons.

- Elle conduit, tout d'abord, à considérer l'ensemble du système atmosphérique et de ses couplages avec la biosphère et les océans. Or, certains des mécanismes considérés ne sont pas encore parfaitement compris, tels que, par exemple, le recyclage par les océans et les végétaux, du gaz carbonique échappé dans l'atmosphère.

- La détermination des flux d'émission de ces constituants est très délicate. Elle repose, en effet, sur des mesures difficiles, s'agissant d'espèces, pour certaines, très minoritaires. Les prévisions sont incertaines, en raison soit d'un manque de recul (les concentrations de méthane ne sont mesurées que depuis la fin des années soixante), soit de lacunes dans nos connaissances (les facteurs biologiques qui influent sur les émissions de protoxyde d'azote ne sont pas encore bien expliqués), soit, enfin, de l'impossibilité d'anticiper les mesures qui pourraient venir limiter la production des CFC.

- En outre, le temps de résidence de ces constituants dans la troposphère, dont dépend leur flux d'entrée dans la stratosphère, est lié en partie à des interactions physico-chimiques encore imparfaitement connues (on sait, cependant, qu'en participant à la formation du radical hydroxyde OH, l'ozone contribue au nettoyage de l'atmosphère par la précipitation de substances polluantes transformées en molécules solubles dans l'eau).

- Enfin, la détermination absolue de l'intensité du rayonnement ultraviolet, principale cause des interactions chimiques dans la stratosphère, est d'autant plus délicate qu'elle doit prendre en compte la variabilité naturelle liée aux différents cycles solaires (27 jours, 11 ans, 22 ans).

Il faut, d'autre part, considérer les couplages entre différentes familles de constituants dont certains aboutissent au stockage, sous forme de réservoirs, tels que le nitrate de chlore (ClONO_2) ou l'acide pernitrique (HO_2NO_2), d'espèces chimiquement actives et donc susceptibles de détruire l'ozone.

S'agissant plus particulièrement des constituants bromés, dont l'efficacité de destruction de l'ozone serait 30 fois supérieure à celle des constituants chlorés, de nombreuses incertitudes subsistent quant à leur rôle dans les équilibres atmosphériques, notamment dans les régions polaires.

1.2.1.2. Les effets thermiques et dynamiques

En détruisant l'ozone et en contribuant à l'effet de serre, les CFC risquent de perturber, d'une façon d'autant plus difficile à appréhender que les phénomènes en cause sont complexes, l'équilibre radiatif et thermique de l'atmosphère terrestre, les processus dynamiques qui s'y produisent et, partant, les grands équilibres climatiques.

Le bilan thermique de la terre, susceptible d'être modifié par des variations de concentration des gaz atmosphériques, est la résultante de mécanismes compliqués : la terre absorbe puis réémet, dans le domaine des infrarouges, non seulement une partie du rayonnement solaire initial reçu mais aussi une partie du rayonnement infrarouge qui lui est renvoyé par l'atmosphère ; une fraction de l'énergie absorbée provoque, en outre, une montée de masses d'air réchauffées à la surface du sol (8).

L'ozone est responsable, avec le gaz carbonique et la vapeur d'eau, de l'équilibre radiatif et thermique de l'atmosphère terrestre. En absorbant le rayonnement solaire, il est notamment le principal facteur de l'équilibre thermique de la stratosphère. Il y assure, en effet, une série de couplages entre des processus chimiques, radiatifs et dynamiques.

- Les processus chimiques, déjà évoqués, dominent aux altitudes supérieures à 40 km.

Ils sont déclenchés, du point de vue radiatif, par le rayonnement ultraviolet.

- Les processus dynamiques sont prépondérants aux altitudes inférieures à 25 km. Toute disparité dans la distribution spatiale de l'ozone s'y traduit, en effet, par la création de différences de températures provoquant des mouvements de masses d'air. Notre compréhension de ces phénomènes est encore imparfaite lorsqu'ils sont de faible amplitude (entre 1 et 1000 km). Il est très difficile, en outre, de déterminer les origines des variations importantes de concentration d'ozone qui peuvent se produire entre 25 et 40 km d'altitude, du fait de la combinaison de processus chimiques et dynamiques.

La stratosphère se caractérise toutefois par une grande stabilité en ce qui concerne les échanges verticaux, par rapport à la troposphère où dominent convections et échanges d'énergie liés au cycle évaporation-condensation de la vapeur d'eau. Les conséquences dynamiques et thermiques, et donc climatiques, de l'effet de serre dans la troposphère ne sont pas faciles à déterminer pour de multiples

raisons. Les transports de chaleur par les courants atmosphériques, et surtout océaniques, sont encore mal connus. De nombreuses rétroactions chimiques, dont les conséquences sont difficiles à apprécier, peuvent se produire. Un accroissement de la concentration en vapeur d'eau de l'atmosphère, par exemple, aurait des effets contradictoires en ce qui concerne le bilan radiatif de la terre (d'un côté le rayonnement solaire serait atténué mais, de l'autre, les rayons infrarouges seraient davantage absorbés). Les résultats, eux aussi contradictoires, d'une augmentation de la nébulosité pourraient varier, en outre, en fonction de la latitude et de l'altitude des nuages. L'inertie thermique des océans devrait ralentir les changements climatiques (réchauffement des températures de surface, etc.) provoqués par l'accumulation des gaz qui absorbent l'infrarouge.

Les interactions possibles entre la destruction de l'ozone et l'effet de serre viennent compliquer encore davantage l'étude de l'équilibre général de l'atmosphère : la diminution de la concentration de l'ozone **stratosphérique** pourrait favoriser une augmentation de celle de l'ozone **troposphérique**, un filtrage moins efficace des ultraviolets dans la haute atmosphère (entre 35 et 50 km) activant, à plus basse altitude (entre 30 et 35 km) la photodissociation de l'oxygène moléculaire. Ce phénomène serait toutefois fortement dépendant de l'inclinaison du rayonnement solaire, qui détermine la profondeur de pénétration de la lumière ultraviolette, et varierait donc en fonction de la latitude. L'effet de serre aurait tendance, cependant, à s'en trouver au total accentué. D'autres facteurs pourraient toutefois jouer en sens inverse. Ainsi, l'accumulation d'ozone troposphérique, en atténuant le rayonnement solaire à la surface de la terre, empêcherait les ultraviolets de contrarier, par inhibition de la croissance des végétaux terrestres et du phytoplancton, la fixation photosynthétique du gaz carbonique. D'autre part, le refroidissement de quelques degrés de la stratosphère, lié à l'effet de serre (moins d'infrarouges en altitude) et à la raréfaction de l'ozone (moins d'ultraviolets absorbés), ralentirait les cycles catalytiques de destruction de ce dernier.

Après avoir pris conscience de la complexité des phénomènes en jeu et des lacunes de nos connaissances, on ne peut que souscrire aux conclusions de nos experts selon lesquelles « la compréhension des équilibres de la haute atmosphère reste et restera très probablement au cours des prochaines années, du ressort de la recherche. »

Parmi les incertitudes qui demeurent, MM. MÉGIE et POMMERAU s'attachent surtout à décrire celles concernant les mécanismes de destruction de l'ozone.

1.2.2. Les inconnues qui subsistent concernant la destruction de l'ozone

M. POMMEREAU distingue trois principaux domaines dans lesquels les inconnues qui subsistent, en ce qui concerne les mécanismes de destruction de l'ozone, sont particulièrement importantes. Il s'agit :

- de la chimie hétérogène (aux pôles et aux moyennes latitudes) ;
- de la dilution des trous d'ozone polaires à l'échelle hémisphérique ;
- enfin, des échanges entre la troposphère et la stratosphère.

1.2.2.1. La chimie hétérogène

- Les réactions de chimie hétérogène étudiées en laboratoire et les cycles photochimiques qui s'ensuivent, en milieu polaire, comme celui du dimère du monoxyde de chlore (voir plus haut) correspondent à un taux moyen de destruction de l'ozone de l'ordre de 1 % par jour. Or, des taux de destruction pouvant varier de 0 à 6 ou 8 % par jour sont observés, aux pôles, sur de plus courtes périodes, dans des conditions d'éclairement et de température qui, pourtant, ne diffèrent pas fondamentalement. On observe une variabilité analogue en ce qui concerne la réduction de la concentration des oxydes d'azote. Leur désactivation et le mécanisme de dénitrification qui l'accompagne ne sont pas parfaitement appréciés, pas plus que le rôle des radicaux hydrogénés (OH et HO₂), voire celui des hydrocarbures.

Les caractéristiques des particules des nuages stratosphériques (dimensions, densité et composition...) et, par là même, les constantes de temps des réactions chimiques qui leur sont associées sont également très diverses (ces constantes peuvent varier entre 28 heures, pour l'activation des chlores, ou 12 jours, pour la dénitrification, et seulement une demi-heure, dans les nuages qui se forment dans les ondes orographiques).

Cette variabilité des réactions hétérogènes et des taux de destruction de l'ozone, en aval, pourrait s'expliquer par la variété de la composition chimique et de la teneur en eau des différentes couches de la stratosphère.

- Aux moyennes latitudes, notre compréhension des équilibres photochimiques pourrait être sensiblement modifiée par la découverte de réactions chimiques hétérogènes dans lesquelles sont impliquées des espèces et des particules d'aérosols (sulfates et eau liquide en

surfusion), présentes entre 15 et 30 km d'altitude, à des températures comprises entre - 40 et - 60 °C.

Peut-être ces réactions permettraient-elles, en effet, de comprendre les raisons pour lesquelles des erreurs sont aujourd'hui commises systématiquement dans l'évaluation de la concentration de l'acide nitrique et de l'ozone.

L'abondance du premier se trouve surestimée au-dessus de 25 km ou sous-estimée au-dessous, suivant la quantité d'oxydes d'azote introduite dans le calcul. Une éventuelle influence sur ces oxydes des particules d'aérosols évoquées ci-dessus est actuellement étudiée en laboratoire.

Quant à l'ozone, sa concentration se trouve sous-estimée au-dessus de 35 km. Comme il s'agit précisément de l'altitude à laquelle sa production photochimique a lieu, on peut penser que les mécanismes de celle-ci ne sont pas encore parfaitement appréciés.

1.2.2.2. La dilution des trous polaires

Le "trou" antarctique correspond à une diminution de moitié de la colonne totale d'ozone, durant le printemps austral, au-dessus d'une superficie qui représente 5 à 6 % de la surface totale de l'hémisphère sud. Il en résulte, pour cet hémisphère, une perte globale d'ozone non négligeable, de l'ordre de 2 à 3 %.

Mais la complexité du mécanisme de diffusion en latitude des trous et mini-trous d'ozone polaires rend les conséquences de ce phénomène difficile à évaluer et à prévoir.

- Si la stratosphère, considérée dans son ensemble, paraît se caractériser, en moyenne, par sa stabilité, il s'y produit néanmoins, à des échelles spatiales pouvant varier entre quelques dizaines de mètres et plusieurs milliers de kilomètres, des mélanges de masses d'air susceptibles de contribuer à la dilution des déficits d'ozone d'origines diverses. En fait, les fines couches de quelques centaines de mètres dont la stratosphère est constituée, peuvent être soit stables, soit turbulentes. Lorsqu'elles sont turbulentes, on assiste à des échanges rapides entre filets d'air qu'il n'est pas facile de prendre en compte.

- Les effets d'un éventuel refroidissement de la stratosphère polaire, lié à la diminution de l'absorption, par l'ozone raréfié, du rayonnement ultraviolet, sont également difficiles à apprécier. Il pourrait en résulter un phénomène de prolongation du vortex et d'accélération de la destruction de l'ozone (l'abaissement des

températures influant dans ce sens sur le champ de pression et les vents et provoquant une multiplication des nuages stratosphériques).

1.2.2.3. Les échanges entre la troposphère et la stratosphère

Selon M. POMMERAU, le mécanisme de "fontaine stratosphérique", dont dépend le transport des CFC dans la stratosphère, n'est à l'heure actuelle ni parfaitement compris, ni quantifié.

Le mécanisme est celui par lequel les énormes nuages convectifs de la Zone de Convergence Equatoriale, appelés Cumulo-Nimbus, injectent violemment dans la stratosphère, à leur sommet, l'air troposphérique qu'ils ont aspirés au niveau du sol (la vitesse des courants verticaux correspondants peut atteindre 120 km/heure).

L'air ainsi injecté se trouve desséché en raison du refroidissement intense qui se produit aux sommets de ces nuages, du fait du déficit radiatif résultant de leur réflectivité et de leur émissivité infrarouge.

M. POMMERAU (1) estime que «le volume d'air qui transite chaque année de cette façon du niveau du sol vers les couches supérieures est encore bien difficile à évaluer».

Il souligne, par ailleurs, que l'appréciation de la durée du transfert d'un constituant donné du niveau de la mer jusqu'à la stratosphère, comporte actuellement une incertitude assez large. Les 5 à 7 ans qui séparent approximativement l'émission des CFC au niveau du sol de leur présence dans la basse stratosphère, ne sont ainsi qu'une moyenne calculée sans prendre en compte le mécanisme détaillé, encore imparfaitement incompris, du transport vertical des différents constituants.

M. POMMERAU note, enfin, que l'effet de serre, en réchauffant la basse atmosphère, pourrait conduire à une augmentation de l'instabilité verticale et par conséquent à un transfert plus rapide des espèces chimiques émises au niveau du sol vers la stratosphère.

Les imperfections de nos mesures et les lacunes de nos connaissances sur l'atmosphère rendent aléatoire toute prévision concernant la destruction de l'ozone par les CFC et la contribution de ces derniers à l'effet de serre.

2. LE CARACTÈRE ALÉATOIRE DES PRÉVISIONS

Les prévisions concernant l'évolution de la composition de l'atmosphère et, partant, les conséquences de la raréfaction de l'ozone et de l'effet de serre, sont effectuées au moyen de modèles numériques de simulation ; ce sont des outils indispensables mais cependant imparfaits.

2.1. GRANDEURS ET SERVITUDES DES MODÈLES

La complexité de l'atmosphère est la principale raison d'être des modèles en même temps que la cause essentielle de leurs limites.

2.1.1. Des instruments de réflexion irremplaçables

Les modèles ne sont pas seulement des instruments de prévision, ce sont aussi des outils d'analyse. Ils sont donc doublement indispensables à la réflexion.

Leur validation donne lieu, tout d'abord, à des confrontations, stimulantes pour la recherche, entre leurs propres estimations et les résultats des observations effectuées à distance, depuis les stations au sol et les satellites, ou in situ. Les lacunes de nos connaissances peuvent s'en trouver mieux cernées (par exemple, les erreurs commises par les modèles dans l'appréciation de la concentration de l'ozone et de l'acide nitrique à certaines altitudes révèlent, selon nos experts, notre méconnaissance de certains phénomènes de la basse stratosphère et des équilibres photochimiques de la haute stratosphère). La capacité de calcul des modèles peut être utilisée pour le traitement des données transmises par satellite (s'agissant, par exemple, de dresser le profil vertical de la concentration de diverses espèces), ou pour mesurer certains indices comme le pouvoir de destruction de l'ozone (Ozone Depletion Power, en anglais, ou ODP, voir plus loin).

Comme le souligne M. MÉGIE (1), l'objectif de la modélisation est de **comprendre** les évolutions de l'atmosphère avant de prétendre **les prévoir**. «Il faut, écrit-il, modéliser pour comprendre, comprendre pour prévoir, prévoir pour mieux gérer».

Les mérites des différents modèles utilisés dans cette perspective varient en fonction de leurs dimensions.

- Le plus simple d'entre eux est celui à zéro dimension qui calcule en un point donné de l'espace l'évolution de la photochimie en fonction du temps, à des intervalles aussi rapprochés que l'on veut.

La répétition de cet exercice à plusieurs niveaux d'altitude conduit à l'élaboration de modèles à une dimension.

- Les modèles à une dimension (l'altitude), appelée "modèle 1D" doivent être destinés en priorité, selon M. POMMEREAU (1), à l'étude de phénomènes photochimiques complexes mais rapides (la constante de temps des réactions doit être inférieure à celle du transport vertical moyen des espèces concernées). On peut citer parmi les modèles de ce type celui mis au point de longue date par Guy BRASSEUR pour le compte de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique. Relativement facile d'emploi, il fournit des simulations assez réalistes.

- Les modèles à deux dimensions (l'altitude et la latitude) ou "2D", représentent actuellement, selon M. POMMEREAU, «le meilleur compromis possible entre une photochimie pas trop simplifiée et un transport réaliste». Ils permettent d'étudier les cycles photochimiques longs (de un mois à une année) et les tendances à long terme. Les conséquences des phénomènes photochimiques rapides y sont introduites après avoir été paramétrisées au préalable à l'aide des modèles 1D. Les transports moyens, qui ne sont plus ici seulement verticaux mais aussi méridionaux, sont également traités sous forme de paramètres, à partir - comme dans les modèles 1D - de la distribution des espèces-sources.

Il existe un assez grand nombre de modèles de ce type dans le monde : en Amérique, au NCAR (National Center of Atmospheric Research) et à la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), ainsi que chez Dupont de Nemours et, bientôt, à la NASA.

En Europe, dans les universités d'Oslo (modèle d'Isaksen et Stordal) et de Cambridge, ainsi qu'en France, à la Météorologie nationale (modèle de M. Carriole).

- Issus des modèles de prévision météorologique, les modèles à trois dimensions, "3D", comportent une photochimie très simplifiée mais une résolution spatiale beaucoup plus complète que celle des autres modèles puisque la longitude est prise en considération, en plus de la latitude et de l'altitude. Cette caractéristique, indispensable, par exemple, à l'étude de la diffusion des trous d'ozone à l'échelle hémisphérique, permet de rendre compte de l'influence des continents et du relief sur les climats. Parmi la poignée d'instruments de ce type qui existent dans le monde (dont un au NCAR, mis au point par M. Warren WASHINGTON que nous avons rencontré dans le

Colorado, et un autre au Centre national de recherche météorologique à Toulouse), deux modèles britanniques se signalent à nos experts par leur originalité : il s'agit tout d'abord du modèle de l'Université de Cambridge. La coordonnée verticale de celui-ci n'est pas la pression mais la température potentielle (température d'une masse d'air ramenée à une pression de 1000 mb), qui a la propriété, dans la stratosphère, de demeurer constante, au moins sur une période de 10 à 20 jours. Les modélisateurs anglais ont constaté que sur une surface de température potentielle constante le long de la trajectoire d'une masse d'air individualisée, la vorticité potentielle (tendance à tourbillonner) du champ de vent, identifiée par une quantité mathématique, reste identique à elle-même. Ils utilisent donc la vorticité potentielle, en raison de son caractère conservatif, comme un traceur atmosphérique (dans les modèles 2D ce sont les espèces-sources qui servent de traceur passif). Cela permet, notamment, de simuler la diffusion et l'érosion du trou d'ozone antarctique au printemps à l'échelle de l'hémisphère sud.

L'autre modèle britannique, celui du Meteorological Office   Bracknell, simule à l'aide d'un modèle à zéro dimension les phénomènes photochimiques susceptibles de se produire sur une trajectoire à température potentielle constante, afin d'étudier non seulement les réactions chimiques hétérogènes conduisant à la destruction de l'ozone mais également la microphysique de la condensation ou de la vaporisation des nuages stratosphériques polaires.

Les modèles à trois dimensions, appelés encore modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCGA) sont les plus capables, a priori, de rendre compte des conséquences, particulièrement difficiles à évaluer et géographiquement variées de l'effet de serre. D'autres modèles en cours d'élaboration, les modèles de circulation générale de l'océan ou MCGO permettront prochainement d'intégrer l'influence du milieu océanique sur les climats (rôle de l'inertie thermique des océans et des transports de chaleur effectués par les courants marins).

Malgré leur sophistication de plus en plus poussée, et leurs mérites variés qui permettent de les utiliser de façon complémentaire, les modèles actuellement disponibles connaissent tous des limites plus ou moins étroites.

2.1.2. Les possibilités des modèles sont inévitablement restreintes

La capacité des modèles à rendre compte des évolutions de l'atmosphère est nécessairement limitée, pour des raisons qui tiennent :

- à l'incertitude de nos mesures et de nos connaissances ;
- à la très grande complexité des phénomènes en cause.

2.1.2.1. L'incertitude des données

La qualité d'un modèle est nécessairement liée à celle des données qui y sont introduites. Or, celles-ci reflètent, dans le domaine des sciences de l'atmosphère, les imperfections de nos mesures et les lacunes de nos connaissances.

Ces incertitudes ont déjà été largement évoquées dans ce rapport. Elles traduisent notre difficulté à saisir les phénomènes atmosphériques, à la fois dans leur détail et dans leur globalité.

Au niveau "micro-atmosphérique", de nombreuses inconnues subsistent en ce qui concerne les réactions de chimie hétérogène qui semblent se produire non seulement à la surface des nuages polaires stratosphériques mais également sous d'autres latitudes, avec des particules d'aérosols, ou au sommet des Cumulo-Nimbus équatoriaux.

Ces réactions ne sont actuellement pas prises en compte par les modèles.

Leur variabilité en milieu polaire (qui serait due à la juxtaposition dans la stratosphère de couches de différents teneurs en vapeur d'eau et de composition chimique diversifiée) n'est notamment pas facile à expliquer.

Il est, de même, malaisé de déterminer avec précision les origines des variations importantes de concentration d'ozone qui peuvent se produire entre 25 et 40 km d'altitude du fait de la coexistence de processus chimiques et dynamiques.

Notre compréhension des processus dynamiques à rayon d'action limitée (de 1 à 1 000 km) est également imprécise, particulièrement en ce qui concerne les mécanismes de diffusion turbulente par lesquels s'effectuent les mélanges de masses d'air dans la stratosphère. Or, c'est par de tels processus que les trous d'ozone polaires sont susceptibles de se diffuser.

Il est, de toute façon, difficile à un modèle de prendre en compte des mécanismes très variables ou de petite dimension.

Au niveau des grands équilibres de l'atmosphère, les incertitudes, déjà évoquées dans ce rapport, concernent tout d'abord les composés hydrogénés, azotés et chlorés qui influent sur l'ozone (quantification des émissions d'espèces-sources et notamment des CFC, durée de séjour et interactions de celles-ci dans la troposphère, rythme de photodissociation dans la stratosphère, constitution d'espèces-réservoirs, etc.).

La répartition des principaux constituants dans les trois dimensions (altitude, latitude et longitude) n'est pas encore bien mesurée et il demeure difficile de prévoir la production d'espèces-sources liée aux activités humaines (différents scénarios peuvent cependant être envisagés, voir plus loin).

Or, il importe de bien apprécier ces phénomènes car les modèles actuels ne prédisent pas directement le destin de l'ozone mais le déduisent du sort que seront censés connaître les autres composants de l'atmosphère. L'ozone n'est donc considéré que comme une espèce chimique parmi d'autres, nécessaire à l'équilibre global de la modélisation.

Comme il a été montré, l'évaluation des conséquences de la destruction de l'ozone et de l'effet de serre oblige à considérer l'ensemble du système atmosphérique et ses couplages avec la biosphère et les océans. Mais la modélisation se limite actuellement à la simulation, plus ou moins exacte, des différents réservoirs pris séparément : troposphère, stratosphère, océan. M. MÉGIE estime qu'«un modèle couplé de l'environnement terrestre incluant également la biosphère ne sera probablement pas réalisé avant la fin de ce siècle.»

De tels modèles seraient pourtant indispensables à l'amélioration des prévisions concernant l'effet de serre. La variété, selon la géographie, des conséquences de cet effet et la multitude des rétroactions qui peuvent l'influencer sont très difficiles à prendre en compte (notamment les changements d'hygrométrie et de nébulosité, dont l'impact est diversement apprécié, et le rôle de l'inertie thermique des océans et des courants marins).

L'appréciation des interactions qui peuvent exister entre la destruction de l'ozone et l'effet de serre est, on l'a vu, particulièrement délicate.

Les résultats d'une moindre absorption des ultraviolets dans la stratosphère peuvent être, en effet, contradictoires :

- le refroidissement de la stratosphère qui en résulterait est susceptible d'accélérer la destruction de l'ozone au-dessus des pôles et de la ralentir, par ailleurs ;

- L'augmentation induite de l'ozone troposphérique peut d'un côté accentuer l'effet de serre mais, d'un autre côté, protéger la végétation et le phytoplancton qui risqueraient, sinon, de fixer moins efficacement, par photosynthèse, le gaz carbonique.

2.1.2.2. Les limites techniques des modèles

Quand bien même l'ensemble des incertitudes qui viennent d'être rappelées seraient levées, il resterait très difficile aux modèles de prendre en compte une réalité aussi complexe.

Comme le souligne, en effet, M. POMMEREAU, «il n'existe pas de modèle capable de simuler simultanément tous les mécanismes chimiques, radiatifs et dynamiques à toutes les échelles de temps et d'espace, mais une variété d'approches, plus ou moins simplifiées, qui permettent de rendre compte d'une partie des problèmes.»

Dans ces conditions, chaque type de modèle représente un compromis plus ou moins fidèle aux différents aspects de la réalité.

Chacun d'entre eux a ses propres contingences :

- Une chimie très complexe peut être introduite dans les modèles 1D à condition que la vitesse des réactions soit inférieure à celle du transport moyen des constituants. Ce transport est évalué seulement dans la dimension verticale et d'une façon physiquement peu réaliste.

- Les modèles 2D prennent en compte la latitude mais n'intègrent pas les variations de la distribution en longitude des températures des vents et des constituants. Les mécanismes de transport à courte échelle de temps y sont négligés et les processus photochimiques rapides ne peuvent être traités que de façon paramétrique.

- L'atmosphère est représentée dans les modèles 3D par un réseau dont les noeuds sont espacés horizontalement de quelques centaines de kilomètres et verticalement de quelques kilomètres. La répartition en longitude des phénomènes y est donc prise en considération mais la finesse de leur résolution spatiale est limitée

par la puissance des calculateurs, aussi, des mécanismes dont la dimension est inférieure à leur maille ne peuvent-ils pas y être intégrés. Par ailleurs, seule une photochimie très simplifiée peut y être introduite.

Tableau 6 : Récapitulation des forces et des faiblesses des différents modèles

Type de modèle	Avantages	Limites
1D (altitude)	<ul style="list-style-type: none"> - études des phénomènes photochimiques rapides ; - chimie complexe prise en compte. 	<ul style="list-style-type: none"> - rapidité des phénomènes étudiés limitée par celle du transport des constituants ; - évaluation peu réaliste de ce transport.
2D (altitude et latitude)	<ul style="list-style-type: none"> - étude des cycles photochimiques longs ; - compromis entre une photochimie pas trop simplifiée et un transport réaliste. 	<ul style="list-style-type: none"> - pas de prise en compte des variations en longitude des températures, des vents et de la concentration des constituants ; - paramétrisation des processus photochimiques rapides et des transports.
3D (altitude, latitude et longitude)	<ul style="list-style-type: none"> - introduction de la troisième dimension (prise en compte de l'influence du relief et de la distribution géographique des continents) ; - étude possible de la diffusion des trous d'ozone polaires. 	<ul style="list-style-type: none"> photochimie très simplifiée ; résolution spatiale limitée par la puissance des calculateurs ; paramétrisation des processus à durée courte et de faible dimension.

Il est possible de tenter d'atténuer les inconvénients des limites des modèles, en y introduisant, sous forme de paramètres, les données qui ne peuvent pas y être directement intégrées.

Ainsi, l'influence des transports sur la concentration des constituants est traitée, de façon simplifiée, dans les modèles à une ou deux dimensions, en recourant à des paramètres (ou coefficients de diffusion) fixés en fonction de la distribution des espèces-sources (la puissance des ordinateurs associés aux modèles 1D et 2D ne permet pas, en effet, d'intégrer simultanément tous les processus physiques, thermodynamiques et photochimiques de l'atmosphère).

La "paramétrisation" représente, par ailleurs, la seule façon d'introduire dans les modèles 2D et 3D les phénomènes de courte durée ou à dimension réduite.

Il ne s'agit, cependant, que d'une approximation réalisée à partir d'une moyenne des résultats des observations effectuées. Il est, en effet, très difficile de traduire mathématiquement des processus de nature physique dont la variabilité est importante.

Aussi le réalisme des modèles peut-il laisser à désirer.

Une paramétrisation accentuée permet de prendre en compte davantage de données mais multiplie les risques d'erreurs de prévision, particulièrement sur de longues périodes.

Pour effectuer des simulations valables, les modélisateurs doivent connaître les limites de leurs instruments et ne pas les pousser au-delà.

Les faiblesses des modèles qui viennent d'être décrites sont illustrées par les erreurs de prévision qu'ils ont commises dans un passé récent.

2.2. LES ILLUSTRATIONS RÉCENTES DES DÉFAILLANCES DES MODÈLES

Les changements apportés aux prévisions et les divergences de résultats, d'une part, l'absence d'anticipation et la mauvaise évaluation de certains phénomènes, d'autre part, montrent les défaillances des modèles.

2.2.1. Des prévisions souvent modifiées et divergentes

Ainsi que le souligne M. MÉGIE (1), l'histoire récente de la modélisation prévisionnelle incite à la modestie comme en témoignent les fluctuations des prédictions relatives à l'évolution de la couche d'ozone pour les cinquante années à venir.

En supposant les émissions de CFC maintenues constantes à leur niveau de 1974, la diminution globale de la concentration en ozone à l'issue du prochain demi-siècle a, en effet, été successivement évaluée à :

- 15 % en 1975
- 7 % en 1976
- 20 % en 1978
- 5 à - 7 % en 1981

Une étude comparative des résultats de différents modèles (modèles 1D du Max Planck Institute et de l'Institut d'Aéronomie spatiale de Bruxelles et modèle 2D de l'Université d'Oslo), concernant

différentes hypothèses d'application du protocole de Montréal (9), révèle des différences, pouvant aller du simple au double, dans la concentration d'ozone escomptée, particulièrement au niveau de la basse stratosphère.

Les auteurs de cette étude rappellent que ces divergences peuvent s'expliquer, pour une part importante, par la façon dont les processus de transport des constituants sont envisagés.

2.2.2. L'absence d'anticipation et les erreurs d'évaluation de certains phénomènes

M. POMMEREAU (1) souligne le caractère totalement imprévu de l'apparition du trou d'ozone antarctique. Prenant à contre-pied toutes les prédictions, c'est en région polaire et au printemps que la destruction d'ozone la plus significative s'est manifestée (avec une réduction moyenne de 50 % de la colonne totale pendant cette saison et un taux de destruction maximum entre 12 et 22 km d'altitude).

Or, les modèles de simulation photochimique laissaient entrevoir une réduction de la concentration d'ozone vers 40 km d'altitude (sous l'effet de réactions en phase gazeuse avec les composés chlorés), entraînant sous nos latitudes une diminution de la colonne totale d'ozone de 0,5 à 1,2 % par décennie pour les mois d'hiver et de 0,3 à 0,6 % pour les mois d'été).

Non seulement le phénomène du trou d'ozone antarctique n'a donc pas été anticipé par les modèles, mais leur appréciation des tendances à long terme de l'évolution de la couche d'ozone s'est révélée inexacte.

La baisse globale d'ozone observée pendant les mois d'hiver est, en effet, largement supérieure aux prédictions (entre - 1,8 et - 2,6 % par décennie au lieu de - 0,5 à - 1,2 %).

C'est, d'autre part, à 25 km, là où l'ozone est le plus abondant, et non pas à 40 km d'altitude que le rythme de destruction est le plus élevé. La concentration totale d'ozone entre 35 et 45 km ne représente de toute façon que 10 % de la colonne totale d'ozone. La diminution moyenne de 0,4 % par an à 40 km, légèrement surestimée par les modèles (qui ont tablé sur une réduction de - 6 % aux moyennes latitudes, entre 1979 et 1983) ne suffit donc pas à expliquer la baisse de - 1,1 % par décennie de la colonne totale d'ozone mise en évidence par les observations récentes.

Ces différences entre prévisions et résultats tiennent probablement à notre méconnaissance des processus caractéristiques

de la basse stratosphère, et notamment au fait que les modèles n'intègrent pas encore, actuellement, les réactions de chimie hétérogène. Les mieux identifiées de ces réactions se produisent - on l'a vu - en milieu polaire, à la surface de nuages stratosphériques présents, dès le mois de mai, dans l'Antarctique, à une altitude d'abord comprise entre 15 et 22 km, puis décroissante au cours de l'hiver.

L'existence de réactions analogues aux moyennes latitudes pourrait expliquer, selon M. POMMEREAU (1), les raisons pour lesquelles les modèles sous-estiment la concentration d'ozone dans la haute stratosphère (au-dessus de 35 km, c'est-à-dire au niveau de sa production photochimique) et n'apprécient pas correctement la distribution verticale de l'acide nitrique (suivant la quantité d'oxydes d'azote introduits dans le calcul, la concentration de ce constituant est surestimée au-dessus de 25 km et sous-estimée en-dessous).

L'identification de processus de chimie hétérogène aux moyennes latitudes pourrait ainsi améliorer notre compréhension des équilibres photochimiques de l'atmosphère et permettre de corriger les erreurs des modèles.

En attendant, l'absence d'anticipation et la sous-estimation de certains phénomènes par les modèles ne permettent pas d'exclure que l'avenir nous réserve de mauvaises surprises.

3. IL N'EST PAS EXCLU QUE L'AVENIR NOUS RÉSERVE DE MAUVAISES SURPRISES

Nos experts insistent plusieurs fois dans leur rapport sur le caractère non linéaire et, par conséquent, imprévisible des évolutions atmosphériques. Il leur semble, en outre, que la destruction d'ozone prévue par les modèles est peut-être sous-estimée. Il n'est pas impossible, bien que cela soit encore plus difficile à apprécier, qu'il en aille de même pour l'effet de serre. Au total, les incertitudes qui subsistent dans nos connaissances scientifiques paraissent plus inquiétantes que rassurantes.

3.1. LA NON LINÉARITÉ DES ÉVOLUTIONS ATMOSPHÉRIQUES

Concernant les espèces-sources des composés hydrogénés, azotés et chlorés qui influent sur l'équilibre de l'ozone et sur l'effet de serre, (méthane, protoxyde d'azote, CFC), M. MÉGIE (1) fait valoir que leurs effets ne sont pas simplement proportionnels aux valeurs des concentrations observées. « Des effets d'amplification très rapides

peuvent se produire, souligne-t-il, si les concentrations de ces espèces prises en valeur relative les unes par rapport aux autres dépassent certains seuils.» Il ne suffit pas d'ajouter les effets individuels des perturbations pour obtenir une évaluation précise de la perturbation finale.

Si d'un côté, observe-t-il plus loin, l'oxydation des constituants issus des espèces-sources (chlorées notamment) provoque des cycles catalytiques destructeurs d'ozone, d'autres réactions conduisent, en revanche, à la formation d'espèces-réservoirs dans lesquelles sont stockés, et donc neutralisés, les radicaux libres susceptibles d'attaquer l'ozone (monoxyde de chlore, ClO, chlore atomique, Cl). Effets négatifs et positifs interfèrent, qui rendent la réponse du système atmosphérique à une augmentation de la concentration des espèces-sources fortement non linéaire. En outre, la capacité de stockage sous forme d'espèces-réservoirs dépend de la concentration du constituant le moins abondant. Les réservoirs peuvent donc dans certains cas déborder et cesser de jouer leur rôle tampon. «Ces phénomènes à seuil, note M. MÉGIE, se traduisent par une non linéarité du système chimique qui rend d'autant plus difficile les tentatives de prédiction de l'évolution à long terme de la stratosphère.»

Pour montrer l'existence d'une non linéarité analogue en ce qui concerne la destruction de l'ozone polaire, M. POMMEREAU met, de son côté, en parallèle l'accroissement de la charge en chlore de l'atmosphère et l'aggravation, beaucoup plus rapide, des phénomènes polaires qui en résulte.

Tableau 7 : Effets aux pôles de l'augmentation de la concentration en chlore de l'atmosphère

Date	Concentration en chlore	Effets polaires
Ère pré-industrielle	0,6 ppbv	
1979	2 ppbv	- premiers signes de destruction de l'ozone en Antarctique
1985	3 ppbv	- aggravation du trou d'ozone antarctique (en surface et en profondeur)
1989	3,7 ppbv	- destruction totale de l'ozone entre 12 et 22 km au printemps dans le vortex antarctique ; - apparition d'épisodes de destruction irréversible de l'ozone en Arctique.

ppbv : milliardième de volume

Se fondant sur les résultats des dernières observations fournies par satellite et recueillies sur le terrain (voir plus loin) M. POMMEREAU (1) souligne que «le phénomène de destruction de l'ozone polaire n'est pas linéaire» et que «chaque année est une nouvelle expérience». Il estime qu'«un risque de dégradation rapide de la couche d'ozone dans l'hémisphère nord à brève échéance ne peut notamment pas être exclu».

La non linéarité des phénomènes chimiques conduit donc à ne pas écarter l'hypothèse d'une accélération inattendue des processus en action ni celle de la survenance d'événements totalement imprévus.

Sans même envisager une telle extrémité, de fortes présomptions laissent à penser que la tendance à une diminution globale de la couche d'ozone, mise en évidence depuis le milieu des années soixante-dix, est actuellement sous-estimée.

3.2. LA SOUS-ESTIMATION POSSIBLE DE LA DESTRUCTION DE L'OZONE

Les derniers résultats disponibles révèlent un rythme de diminution de la couche d'ozone de - 1,1 % par décennie.

Ce chiffre peut ne pas sembler très inquiétant . Cependant, il s'agit, d'une part, d'une évolution globale qui recouvre des tendances à la baisse beaucoup plus marquées sous certaines latitudes (voir plus loin) ; d'autre part, cette estimation se trouve aujourd'hui probablement dépassée puisqu'elle repose sur l'exploitation de données qui ne sont pas de la dernière actualité. L'apparition des tendances évolutives de l'ensemble de la couche d'ozone nécessite, en effet, une longue et patiente analyse de données nombreuses, de sources variées. Aussi, le dernier rapport publié à ce sujet par le PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) ne présente-t-il pas de chiffres postérieurs à 1987, bien qu'il date de 1989 (7).

Les réactions de chimie en phase gazeuse avec le chlore, à 40 km d'altitude, ne suffisent pas, on l'a vu, à expliquer la tendance à la baisse constatée.

Aussi doit-il être fait appel à d'autres explications (diffusion des trous polaires, chimie hétérogène).

C'est précisément la recherche de ces autres mécanismes qui conduit à penser que les tendances évolutives de la destruction d'ozone sont peut-être aujourd'hui sous-estimées.

3.2.1. L'impact de la diffusion des trous polaires

Les conditions d'une diffusion dans chaque hémisphère des déficits d'ozone de l'Antarctique et de l'Arctique sont évoquées successivement par M. POMMEREAU (1) dans son expertise.

3.2.1.1. A partir du pôle Sud

On constate au-dessus de l'Antarctique, à partir de la fin du mois d'août jusqu'au réchauffement stratosphérique final en novembre ou décembre, soit un trou couvrant l'ensemble du continent soit, comme en 1988, des mini-trous transitant lentement autour de ce territoire.

Le fait que la concentration en ozone ait été voisine de zéro en 1987 et 1989, entre 12 et 22 km d'altitude, signifie qu'une éventuelle aggravation du trou au cours des prochaines années proviendra non pas d'une accélération du mécanisme photochimique en oeuvre, mais d'une extension en altitude ou en superficie du phénomène. De nombreuses inconnues subsistent en ce qui concerne les mécanismes de destruction de l'ozone polaire. Les réactions hétérogènes sont très variables (la durée d'activation des chlores peut aller d'une demi-heure à 28 heures). Les taux de destruction de l'ozone le sont, par conséquent, aussi (entre 0 et - 8 % par jour). Cette variabilité pourrait s'expliquer - on l'a vu - par des différences de teneur en eau et de composition chimique des couches de la stratosphère. La concentration et la variation diurne des oxydes d'azote fluctue également largement et le mécanisme de dénitrification, évoqué plus haut, n'est pas parfaitement apprécié.

Par ailleurs, un refroidissement de la stratosphère polaire dû à une moindre absorption des rayons ultraviolets par l'ozone pourrait accélérer la destruction de celui-ci, en multipliant les nuages polaires stratosphériques. L'influence de la baisse des températures sur le champ de pression et sur les vents serait susceptible d'autre part, de prolonger la durée du vortex.

Ces incertitudes sur le taux réel de destruction de l'ozone polaire hypothèquent grandement - selon M. POMMEREAU (1) - les prévisions qui peuvent être faites, s'agissant du mécanisme le plus efficace, aujourd'hui identifié, de destruction d'ozone à l'échelle globale.

Il est d'autant plus difficile d'établir des prédictions fiables sur plusieurs décennies que la complexité du mécanisme de diffusion en

latitude du trou d'ozone polaire empêche d'en évaluer les conséquences de façon précise.

Cette diffusion pourrait s'effectuer, d'après notre expert, par des mélanges de masses d'air aux altitudes stratosphériques, selon des mécanismes de diffusion turbulente à des échelles variées (de quelques dizaines de mètres à plusieurs milliers de kilomètres).

Une réduction de 50 % de la concentration d'ozone sur une superficie ne représentant pas moins de 5 à 6 % de celle de l'hémisphère sud, ne peut pas manquer d'avoir des conséquences globales (il s'agit, pour cet hémisphère, d'une diminution totale d'ozone de l'ordre de 2 à 3 %).

Le tableau 8 montre que les phénomènes polaires ont eu effectivement une influence sur l'évolution de la couche d'ozone au-dessus de l'hémisphère sud.

Tableau 8 : Variations selon la latitude de la baisse d'ozone entre 1978 et 1987

Latitude	Différence relative du contenu intégré d'ozone (1987)-(1978)
Résultat global (53°N-53°S)	- 2,5 ± 0,6 %
Hémisphère nord (0°-53°N)	- 1,8 ± 1,4 %
Hémisphère sud (0°-53°S)	- 2,9 ± 0,9 %
53°S - 65°S	- 10,6 ± 1,6 %
39°S - 53°S	- 4,9 ± 1,8 %
29°S - 39°S	- 2,7 ± 2,1 %
19°S - 29°S	- 2,6 ± 1,5 %
0° - 19°S	2,1 ± 0,8 %
0° - 19°N	- 1,6 ± 1,3 %
19°N - 29°N	3,1 ± 1,9 %
29°N - 39°N	- 2,5 ± 1,7 %
39°N - 53°N	- 1,2 ± 1,5 %
53°N - 65°N	- 1,4 ± 1,4 %

En huit ans (entre 1978 et 1987), la baisse de l'ozone a été, en effet, plus marquée dans cet hémisphère que dans l'hémisphère nord (- 2,9 % au lieu de - 1,8 %). Elle a été, au sud, d'autant plus prononcée que les latitudes étaient élevées avec un taux de destruction dépassant 10 % au voisinage du cercle polaire (- 10,6 % entre 53°S et 65°S) et approchant 5 % dans des régions correspondant au sud de l'Australie ou de l'Argentine (- 4,9 % entre 39°S et 53°S).

3.2.1.2. A partir du pôle Nord

Aucun trou stable et de large étendue n'a jamais été constaté en Arctique.

Des mini-trous, semblables à ceux signalés en Antarctique en 1988 et au sein desquels la concentration en ozone est parfois très réduite, peuvent, en revanche, y être observés. Malgré une présence plus brève et moins fréquente des nuages polaires stratosphériques dans l'Arctique, des processus de chimie hétérogène analogues à ceux mis en évidence dans l'Antarctique paraissent y être à l'oeuvre. Se fondant sur les résultats, qui seront exposés plus loin, des observations de l'hiver 1990, notre expert, M. POMMEREAU (1) estime que les mini-trous qui apparaissent souvent pendant quelques jours au voisinage du cercle polaire dans le nord (aussi bien d'ailleurs que dans le sud) pourraient contribuer davantage à la diminution globale de la concentration d'ozone qu'un trou large et stable de plusieurs mois comme celui du pôle Sud.

«La destruction moyenne d'ozone pourrait être ainsi plus importante dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud, selon notre expert, du moins au cours des années froides» (en raison, notamment, des effets des nuages orographiques).

3.2.2. L'influence de la chimie hétérogène aux autres latitudes

M. MÉGIE (1) souligne, dans le chapitre qu'il consacre à la formation et à l'équilibre de l'ozone, l'importance des processus de chimie dite hétérogène, mettant en jeu les interactions entre les phases gazeuses, solides et liquides, qui peuvent coexister dans la haute atmosphère. Mais il observe en même temps que «l'importance de ces processus à l'échelle globale, en particulier en-dehors des régions polaires reste pour une large part inconnue.» (cf. : ci-dessus 1.2.2.).

M. POMMERAU (1) partage ce point de vue puisqu'il note, de son côté, que sont loin d'être encore totalement appréciées les conséquences de cette chimie hétérogène sur l'atmosphère à toutes latitudes, y compris en région équatoriale où la température en altitude peut être aussi basse qu'aux pôles et dans les nuages liquides ou solides de la troposphère.

L'identification, aux moyennes latitudes, de réactions chimiques hétérogènes, dans lesquelles seraient impliquées des particules d'aérosols formées principalement d'eau liquide en surfusion et de sulfates, est susceptible - on l'a vu - d'améliorer notre compréhension des équilibres photochimiques de l'atmosphère.

Il a été montré, également, que la présence dans les Cumulo-Nimbus équatoriaux à la fois de particules de glace et de températures voisines de celles de la stratosphère polaire permettait d'y suspecter aussi l'existence de réactions hétérogènes.

La sous-estimation possible de la destruction d'ozone, du fait de la non prise en compte de la diffusion des trous polaires et de la chimie hétérogène conduit à préférer le concept de potentiel de charge totale en chlore ("Chlorine Loading Potential" en anglais, ou CLP) à celui de pouvoir de destruction de l'ozone ("Ozone Depletion Power" ou ODP).

3.2.3. Du concept d'ODP à celui de CLP

Le potentiel de destruction de l'ozone ou ODP (Ozone Depletion Potential) est une grandeur relative. Elle exprime la réduction à l'équilibre de la couche d'ozone, calculée pour une émission annuelle permanente dans l'atmosphère d'une masse-unité du constituant considéré, rapportée à la réduction obtenue pour une émission annuelle permanente d'une masse-unité de CFC-11.

L'absence de prise en considération, dans le calcul des ODP, des effets de la chimie hétérogène et de la diffusion des trous polaires, a conduit à préférer à ce concept celui de potentiel de charge en chlore ou CLP (Chlorine Loading Potential). Comme l'ODP, le CLP est une grandeur relative, définie comme la quantité totale de chlore transportée dans la stratosphère par l'émission d'une masse-unité de CFC-11. En ce sens, le CLP est directement proportionnel au nombre d'atomes de chlore contenus dans chaque molécule du constituant considéré, à sa durée de vie dans l'atmosphère et à son poids moléculaire. Les valeurs des CLP sont en général supérieures aux valeurs des ODP et ce pour deux raisons principales. D'une part, certains des CFC et HCFC considérés, comme le HCFC-22, sont photodissociés de façon incomplète dans la stratosphère et ne libèrent

donc pas la totalité de leurs atomes de chlore. D'autre part, l'effet de ces constituants sur la couche d'ozone est évidemment sensible à la distribution verticale du chlore libéré, paramètre pris en compte dans le calcul des ODP mais non dans celui des CLP, puisque dans ce dernier cas tous les atomes libérés sont censés jouer le même rôle sur la couche d'ozone.

Le CLP est donc conçu pour permettre d'évaluer l'impact maximum d'un constituant organo-halogéné sur la couche d'ozone.

Le tableau 9 résume pour les constituants organo-halogénés actuellement en usage, les valeurs les plus récentes des ODP et des CLP.

Tableau 9 : Potentiel de destruction de l'ozone et de charge en chlore des CFC et halons

Constituant	Durée de vie (années)	ODP	CLP
CFC-11	60,0	1,0	1,0
CFC-12	120,0	0,9 - 1,0	1,5
CFC-113	90,0	0,8 - 0,9	1,11
CFC-114	200,0	0,6 - 0,8	1,8
CFC-115	400,0	0,4 - 0,5	2,0
HCFC-22	15,3	0,04 - 0,05	0,14
CCl ₄	50,0	1,0 - 1,2	1,0
CH ₃ CCl ₃	6,3	0,10 - 0,12	0,11
Halon-1301		8 - 13	
Halon-1211		2 - 3	
Halon-1202		0,3	
Halon-2402		6,2	

Source : Document PNUE/OMM (7)

Aux inquiétudes liées à une sous-estimation éventuelle de la destruction de l'ozone s'ajoutent celles relatives à l'effet de serre.

3.3. L'AGGRAVATION ÉVENTUELLE DE L'EFFET DE SERRE

Sans entrer dans le détail d'un phénomène très complexe, auquel les CFC ne contribuent que dans la proportion de 20 %, il paraît important à vos rapporteurs de souligner que l'ensemble des rétroactions susceptibles d'affecter l'effet de serre, ainsi que ses interactions avec la destruction de l'ozone, peuvent avoir au total un caractère aggravant.

La majorité des modèles concluent ainsi que les changements d'hygrométrie et de nébulosité provoqués, accentueraient au total le réchauffement de température escompté.

La raréfaction de l'ozone dans la stratosphère risquerait, on l'a vu, de provoquer une augmentation de l'ozone dans la troposphère (l'oxygène moléculaire s'y trouvant davantage dissocié par les ultraviolets moins bien filtrés à plus haute altitude).

L'effet de serre pourrait s'en trouver au total accentué. D'autant plus que l'augmentation de l'ozone troposphérique, qui ne représente actuellement que 10 % de l'ozone total, ne suffirait pas à empêcher, par ailleurs, les rayons UV-B d'entraver la croissance des végétaux terrestres et du phytoplancton et par là même d'inhiber la fixation photosynthétique du gaz carbonique.

Les modèles actuels prédisent, en outre, qu'une augmentation à terme de 50 % de l'ozone troposphérique conduirait à une diminution de 25 % de la concentration du radical hydroxyde OH. Or, celui-ci est un véritable nettoyeur de l'atmosphère. Capable de réagir avec presque tous les gaz en faible concentration et même avec des composés généralement inertes, il favorise l'élimination par les précipitations des substances polluantes transformées en molécules solubles dans l'eau. Une diminution des réactions d'oxydation par OH dans la troposphère aurait notamment, pour conséquence d'augmenter la durée de vie dans l'atmosphère des substituts des CFC.

3.4. DES INCERTITUDES AU TOTAL PLUS INQUIÉTANTES QUE RASSURANTES

Un bilan des incertitudes évoquées dans ce rapport conduit à considérer qu'elles sont dans l'ensemble plus alarmantes qu'apaisantes.

C'est ce que tentent de faire apparaître les trois tableaux suivants qui récapitulent les éventualités rassurantes et inquiétantes envisagées par nos experts en ce qui concerne respectivement :

- la destruction de l'ozone ;
- les interactions entre cette destruction et l'effet de serre ;
- l'effet de serre lui-même.

3.4.1. Concernant la destruction de l'ozone

Le tableau 10, ci-après, montre qu'en ce qui concerne la destruction de l'ozone les hypothèses pessimistes sont nettement plus nombreuses que les hypothèses optimistes.

Tableau 10 : Incertitudes concernant la destruction de l'ozone

DESTRUCTION DE L'OZONE	
Éventualités rassurantes	Éventualités inquiétantes
1. Refroidissement de la stratosphère entraînant un ralentissement des cycles catalytiques de destruction de l'ozone.	1. Accélération des effets d'une augmentation de la concentration des espèces-sources (méthane, protoxyde d'azote, CFC).
2. Stockage dans les espèces-réservoirs des radicaux libres susceptibles de détruire l'ozone.	2. Débordement des espèces-réservoirs dans lesquelles sont stockés les radicaux libres susceptibles de détruire l'ozone (ClO, Cl, etc.).
	3. Phénomènes totalement imprévisibles (cf. trou d'ozone antarctique).
	4. Extension en altitude et en surface du trou d'ozone antarctique.
	5. Accélération de la destruction de l'ozone polaire et prolongation du vortex sous l'effet d'un refroidissement de la stratosphère.
	6. augmentation de la fréquence des minitrous au voisinage du pôle nord.
	7. Destruction plus rapide de l'ozone dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud sous l'effet de la dilution de ces minitrous et en raison des ondes orographiques formées sur les montagnes de Scandinavie (voir plus loin).
	8. Réactions hétérogènes de destruction de l'ozone par le chlore, pouvant être très rapides, aux moyennes latitudes et dans les cumulo-nimbus équatoriaux.

Le bilan des incertitudes concernant les interactions entre la destruction de l'ozone et l'effet de serre est défavorable également.

3.4.2. Concernant les interactions entre destruction de l'ozone et effet de serre

Le tableau suivant 11 distingue les conséquences d'une augmentation de l'ozone troposphérique, du fait de la raréfaction de l'ozone stratosphérique, et les autres interactions possibles.

Tableau 11 : Incertitudes concernant les interactions entre la destruction de l'ozone et l'effet de serre

INTÉRACTIONS ENTRE DESTRUCTION DE L'OZONE ET EFFET DE SERRE	
Éventualités rassurantes	Éventualités inquiétantes
A - Augmentation de l'ozone troposphérique	
1. Compensation très partielle des pertes d'ozone stratosphérique ;	1. Augmentation du réchauffement des températures (l'ozone est un gaz à effet de serre) ;
2. Filtrage des ultraviolets et protection contre leurs effets nocifs (cf. ci-dessous 4., colonne de droite).	2. Diminution de la concentration du radical hydroxyle OH et donc de la précipitation des espèces polluantes ;
	3. Augmentation, en conséquence, de la durée de vie des substituts des CFC ;
B - Autres interactions	
	4. Inhibition par les UV de la croissance des végétaux et du phytoplancton, donc de la fixation photosynthétique du CO ₂ (cet effet peut être compensé par l'augmentation de l'ozone troposphérique cf. ci-dessus 2., colonne de gauche) ;
	5. Transfert plus rapide des CFC vers la stratosphère.

Il importe de souligner que la compensation par un accroissement de l'ozone troposphérique, de la raréfaction de l'ozone stratosphérique, ne peut être que très partielle.

En effet, la faible durée de vie de l'ozone troposphérique (trois mois) ne lui permet pas d'atteindre en grande quantité la haute atmosphère (10). En outre, ce gaz demeure beaucoup moins abondant dans la troposphère (même si sa concentration y augmente) que dans la stratosphère.

3.4.3. Concernant l'effet de serre

Le bilan comparatif des facteurs d'apaisement et d'inquiétude paraît plus équilibré en ce qui concerne l'effet de serre, mais il faut tenir compte des conséquences défavorables de la destruction de l'ozone qui viennent d'être décrites.

Tableau 12 : Incertitudes relatives à l'effet de serre

EFFET DE SERRE	
Éventualités rassurantes	Éventualités inquiétantes
1. Inertie thermique des océans	1. Effet au total aggravant des rétroactions attendues (augmentation de l'hygrométrie et de la nébulosité) ;
2. Recyclage du gaz carbonique par les végétaux et les océans	2. Effets de seuil imprévisibles et conséquences inattendues de la non linéarité des processus chimiques
	3. Emissions de CO ₂ plus difficiles à réduire (du fait des problèmes d'énergie) que celles des CFC.

Ainsi, il apparaît bien, au total, que les nombreuses incertitudes recensées par nos experts (qui ne remettent à aucun moment en doute la responsabilité des CFC et du chlore dans la destruction de l'ozone) sont plutôt inquiétantes que rassurantes.

Les résultats des toutes dernières observations disponibles ne permettent pas de leur donner tort.

C - LES RÉSULTATS DES DERNIÈRES OBSERVATIONS SONT PRÉOCCUPANTS

1. LA SATURATION, ENTRE 12 ET 22 KM, DU TROU D'OZONE ANTARCTIQUE

Concernant le minimum printanier d'ozone dans l'Antarctique, les résultats de 1989 ont été aussi mauvais que ceux de 1987, après une rémission pendant l'année 1988, durant laquelle se sont formés seulement des mini-trous transitant lentement autour du continent (de telles variations, qui ne remettent nullement en cause la tendance à une aggravation du phénomène dans le long terme, seraient dues aux oscillations quasi-biennales de la circulation des vents stratosphériques équatoriaux ainsi qu'à une modification des conditions climatiques régnant dans la troposphère).

Le trou a couvert, en 1989, l'ensemble du continent antarctique, soit environ 7,5 % de la surface de l'hémisphère sud.

En 1989, comme en 1987, la valeur de la colonne totale moyenne d'ozone, observée au mois d'octobre au-dessus de la station britannique de Haley Bay, a atteint son niveau le plus bas (de 150 à 160 unités Dobson au lieu de 300 unités en moyenne entre 1957 et 1972).

En outre, la concentration d'ozone, au cours de ces deux années, a été voisine de zéro entre 12 et 22 km d'altitude.

Une telle saturation du trou d'ozone à ces hauteurs, les plus froides de la stratosphère, montrent qu'une réduction ultérieure de la colonne totale d'ozone au-dessus de l'Antarctique proviendra, non pas d'une accélération du mécanisme photochimique mais d'une extension verticale ou horizontale du domaine de destruction.

2. LA DIFFUSION EN EUROPE, EN 1990, D'UN TROU FORMÉ EN SCANDINAVIE

M. POMMERAU (1) révèle, dans son rapport d'expertise, la formation très rapide en Scandinavie, au début du mois de février 1990, d'un trou d'ozone d'une extension supérieure à 1 200 km, dont une partie a migré vers l'Europe occidentale pour atteindre la France, le 8 février 1990.

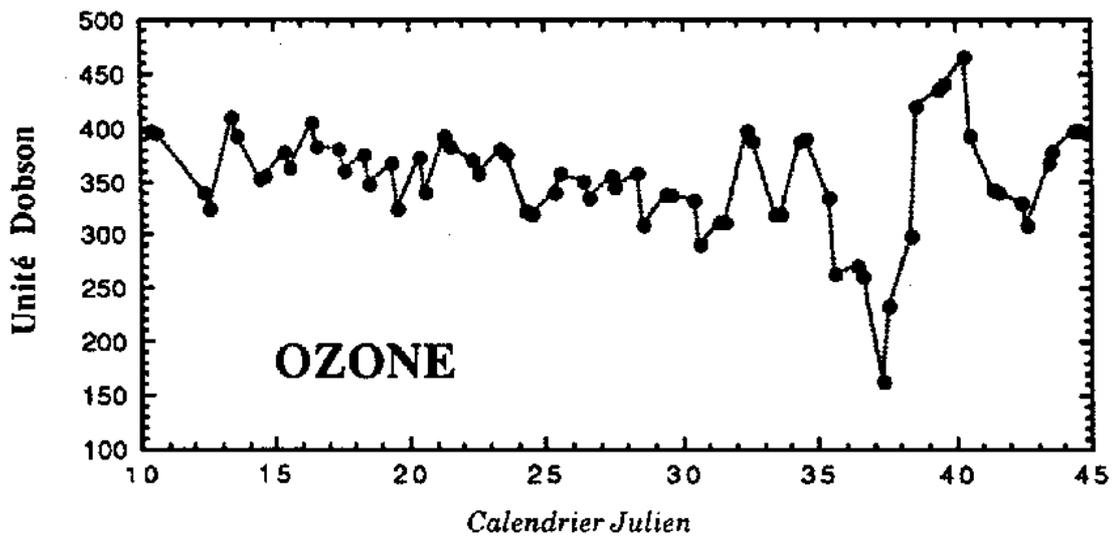
Ce phénomène a été détecté à Kiruna durant la campagne franco-allemande CHEOPS III, puis confirmé par les observations satellitaires TOMS disponibles au mois de mai.

Le minimum d'ozone constaté était du même ordre que celui du printemps antarctique (jusqu'à 165 unités Dobson).

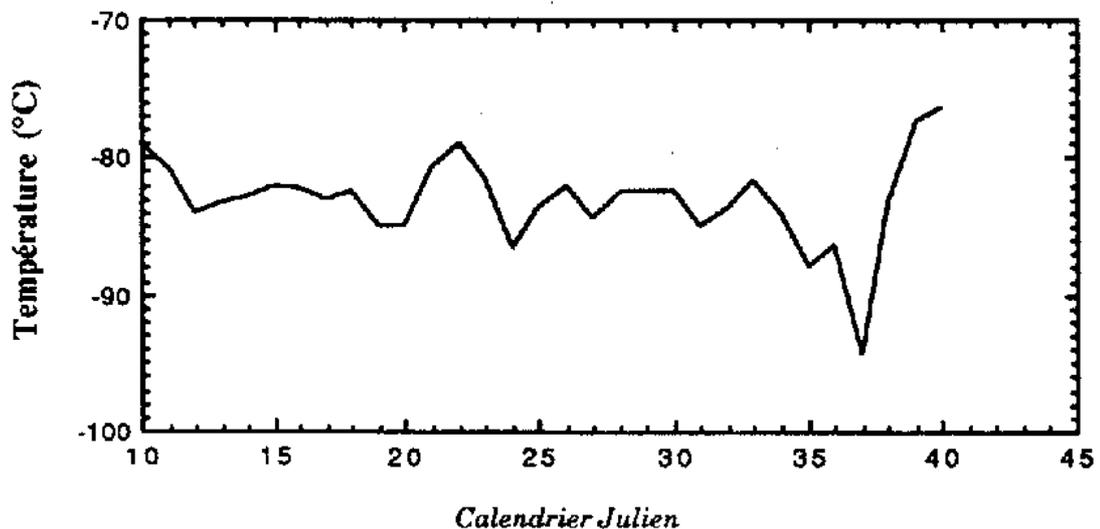
Son apparition s'est accompagnée d'un refroidissement, parfaitement synchronisé, de 10 °C (de - 85° à - 95 °C) de la température stratosphérique.

Les graphiques 6 et 7, ci-après, mettent en évidence cette corrélation entre la baisse des températures et celle de la concentration d'ozone.

Graphique 6 : Evolution de la concentration d'ozone à Kiruna début 1980



Graphique 7 : Evolution de la température stratosphérique à Kiruna début 1990



Un tel phénomène, non prévu par les modèles, pourrait s'expliquer, selon notre expert, de la façon suivante :

- le refroidissement de 10 °C de la stratosphère serait dû à la formation d'une onde orographique (onde de relief se propageant vers le haut) sur les montagnes de Norvège ;

- ce refroidissement aurait conduit à la formation de nuages stratosphériques de type III (ces nuages se forment dans des ondes orographiques vers 15 km d'altitude lorsque le vent est violent dans les basses couches. Ils comprennent des particules de glace d'eau de plus petit diamètre que les nuages stratosphériques de type I et II et les constantes de temps des réactions hétérogènes qui se produisent à leur surface sont réduites à une demi-heure).

Pour M. POMMEREAU (1), la rapidité de la destruction de l'ozone dans les nuages stratosphériques orographiques (le trou signalé en Scandinavie était absent la veille), pourrait conduire à ce que la destruction moyenne d'ozone soit plus importante dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud durant les années froides.

Il est assurément préoccupant de constater qu'un trou d'ozone, de gravité comparable à celui de l'Antarctique, a pu se former aussi rapidement et se diffuser au-dessus de l'Europe occidentale.

Cet épisode illustre bien ainsi la brutalité et le caractère imprévisible de certaines évolutions atmosphériques.

Il importe de souligner cependant qu'il s'agissait d'un phénomène exceptionnel et passager et que le minimum d'ozone constaté le 8 février 1990, au-dessus du sud de la France était de 220 unités Dobson et non pas de 160 UD (ce minimum est toutefois du même ordre que celui observé à Dumont d'Urville en Antarctique au printemps).

Ce qui serait grave, en revanche, c'est que de tels événements se reproduisent fréquemment.

En tout état de cause, les effets au niveau du sol d'une destruction de l'ozone demeurent difficiles à évaluer.

D - L'ÉVALUATION DE LA GRAVITÉ DES CONSÉQUENCES DE LA DESTRUCTION D'OZONE DEMEURE DIFFICILE

1. LES DANGERS D'UNE AUGMENTATION DU RAYONNEMENT UV-B

L'importance, pour la préservation de la vie sur terre, du filtrage par l'ozone du rayonnement ultraviolet a déjà été montrée dans ce rapport.

Les conséquences très graves qui pourraient résulter de l'action au sol des UV-B, du fait de la raréfaction de l'ozone, ont également été évoquées (2), qu'il s'agisse de la santé humaine, de la croissance des plantes terrestres ou de l'équilibre des éco-systèmes aquatiques.

Les matériaux pourraient, par ailleurs, subir dans ce cas une dégradation accélérée.

A partir d'un certain seuil, la reproduction des espèces végétales et des micro-organismes et même celle des êtres humains pourrait être menacée : les molécules d'ADN (acide désoxyribonucléique, support du patrimoine génétique) seraient endommagées par les rayons ultraviolets, selon certains calculs théoriques, si la réduction de la couche d'ozone dépassait 50 % (11).

Aucune corrélation n'a cependant été mise en évidence, pour l'instant, entre la raréfaction de l'ozone dans la stratosphère et l'augmentation du rayonnement ultraviolet à la surface de la terre.

2. DES EFFETS DIFFICILES À METTRE EN ÉVIDENCE

- Comme le souligne M. Gérard MÉGIE (1), il est particulièrement important de vérifier si la diminution de la colonne totale d'ozone apparue au cours de la dernière décennie se traduit ou non par une augmentation du rayonnement solaire ultraviolet au sol. «Malheureusement, fait-il observer, les données actuellement disponibles ne permettent, en aucun cas, de conclure sur ce point».

La seule base de données disponibles est celle du réseau américain "Robertson-Berger", créé en 1974, dont les instruments se révèlent peu sensibles à de très faibles variations du contenu de l'atmosphère en ozone et très influencés par la nébulosité et la pollution locale.

Dans ces conditions, conclut notre expert, «la mise en oeuvre d'un réseau opérationnel, correctement étalonné, de surveillance du flux solaire ultraviolet reste aujourd'hui une priorité».

- Le flux d'ultraviolets au sol étant difficile à mesurer, ses effets sur la santé humaine ne sont pas faciles à apprécier. D'après certaines études, une diminution de 1 % de la colonne d'ozone provoquerait une augmentation de 3 % de la fréquence des cancers de la peau sans mélanome. Mais selon les experts américains que nous avons rencontrés, il est actuellement impossible de déterminer dans quelle mesure l'augmentation indéniablement spectaculaire du nombre de cancers de la peau est imputable à un éventuel accroissement du rayonnement UV-B au sol. Il semblerait que la modification des comportements joue un rôle plus important (longues expositions occasionnelles au soleil de la population blanche depuis l'enfance et l'adolescence).

De toute façon, l'augmentation de l'ozone troposphérique pourrait - comme on l'a vu - compenser les effets d'une raréfaction de l'ozone stratosphérique en ce qui concerne le filtrage des ultraviolets (mais peut-être insuffisamment).

3. LES COMPENSATIONS POSSIBLES

Les chercheurs allemands BRUHL et CRUTZEN (12), de l'Institut Max Planck, ont ainsi relevé une diminution de 0,5 % en moyenne dans la journée du rayonnement UV-B entre 1968 et 1982 à la station de Hohenpeissenberg en Bavière malgré une réduction de 1,5 % de la couche d'ozone à la verticale de ce lieu.

Ce phénomène résulte vraisemblablement d'une augmentation compensatrice de l'ozone troposphérique.

Selon les mesures mentionnées par BRUHL et CRUTZEN dans le numéro de juillet 1989 du "Geophysical Research Letter", la concentration en ozone a, en effet, presque doublé dans la basse troposphère durant la période considérée au-dessus de Hohenpeissenberg.

BRUHL et CRUTZEN font, par ailleurs, observer que :

- le filtrage des ultraviolets par l'ozone est d'autant plus efficace dans la troposphère que les rayons du soleil y sont diffractés par les nuages et les aérosols ;

- ce phénomène de compensation risque d'être beaucoup plus accentué dans l'hémisphère nord où les pollutions industrielles et urbaines sont plus prononcées.

*

* *

Ces observations sur la difficulté de mettre en évidence les conséquences de la raréfaction de l'ozone tendent à nuancer le constat de nos experts, afin d'éviter une dramatisation excessive de leurs propos.

Vos rapporteurs n'en souscrivent pas moins sans réserve à leurs conclusions quant à la gravité des atteintes que les CFC sont susceptibles de porter à notre environnement terrestre en détruisant l'ozone et en contribuant à l'effet de serre.

Il importe donc d'autant plus de limiter puis de supprimer les émissions de ces substances que cela est technologiquement possible.

II - DES OPTIONS TECHNOLOGIQUES VARIÉES

Avant d'être, à partir du milieu des années soixante-dix, suspectés de jouer un rôle majeur dans la destruction de l'ozone (1), les CFC ont longtemps été considérés comme des molécules parfaites pour de multiples applications.

Leur utilisation s'est ainsi développée, depuis la fin de la deuxième guerre mondiale dans plusieurs directions : comme gaz propulseur pour les aérosols, comme fluide frigorigène dans la réfrigération, comme agent moussant pour les mousses plastiques, comme solvant pour l'industrie et comme agent d'extinction.

Les CFC représentaient toutefois pour l'ensemble du monde en 1988 des quantités produites (entre 1,2 et 1,6 millions de tonnes) et un chiffre d'affaires global (entre 12 et 15 milliards de F) faibles par rapport à l'ensemble de l'activité des industries chimiques (2).

A titre d'exemple, les CFC ne représentaient pour ATOCIEM, premier producteur français et européen de CFC, que 5 % de son chiffre d'affaires global (3).

Mais l'importance économique des CFC ne se juge pas seulement au travers des données de production de ces composés.

Les enjeux techniques et économiques de la substitution doivent être, en effet, appréciés non seulement au niveau de la production des CFC et de leurs substituts mais aussi à celui des industries d'aval.

Les industries des pays signataires du Protocole de Montréal ont toutes engagé des efforts importants de réduction de leur utilisation, de remplacement de ces composés par d'autres ou bien encore de mise en oeuvre de technologies se passant de ce type de produits.

L'expérience acquise montre qu'il existe aujourd'hui, des options technologiques variées pour le remplacement ou la suppression des CFC.

A - LES CFC CONVIENNENT PARFAITEMENT A DE NOMBREUSES UTILISATIONS

Les propriétés de stabilité chimique dans la troposphère et la présence d'atomes de chlore dans les molécules de CFC qui sont à la base de leur potentiel de destruction de l'ozone dans la stratosphère, constituent à l'inverse, la clé de leur succès dans l'industrie.

1. DES NOMENCLATURES DIVERSES

L'utilisation de nomenclatures diverses pour caractériser les CFC dans les documents techniques, industriels mais aussi diplomatiques, nécessite que celles-ci soient explicitées. En outre, l'étude des enjeux de la substitution et la discussion sur les substituts des CFC requièrent la présentation des formules chimiques de ces composés.

Les chlorofluorocarbones (CFC) sont des dérivés halogénés des alcanes - principalement du méthane CH_4 et de l'éthane C_2H_6 . Dans ces molécules, des atomes de fluor et de chlore viennent remplacer, en nombre variable selon les CFC, des atomes d'hydrogène. Les halons sont des dérivés du même type dans lesquels des atomes de brome sont également présents en remplacement d'atomes d'hydrogène.

1.1. NOMENCLATURE TECHNIQUE "R" DES CFC

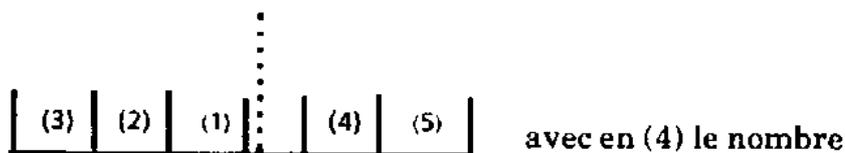
Une nomenclature technique permettant de décrire simplement ces composés a été développée et repose sur les principes suivants :

- chaque CFC reçoit un numéro à 3 chiffres précédé de la lettre R (pour réfrigérant).

(3)	(2)	(1)
-----	-----	-----

- le premier chiffre à partir de la droite représente le nombre d'atomes de fluor ;
- le deuxième chiffre à partir de la droite représente le nombre d'atomes d'hydrogène augmenté d'une unité ; ainsi le chiffre 1 en deuxième position signifie que la molécule ne comprend pas d'atome d'hydrogène, le chiffre 2 qu'elle en possède un.;

- le troisième chiffre représente le nombre d'atomes de carbone, diminué d'une unité ; il est omis lorsqu'il est égal à 0 (un seul atome de carbone) ;
- le nombre d'atomes de chlore est implicite, (un atome de carbone dans un alkane ne peut avoir que 4 liaisons) ;
- une lettre minuscule suit le numéro pour différencier les éventuels isomères - (même nombre d'atomes mais positions différentes sur la chaîne carbonée) ;
- les mélanges de CFC reçoivent par convention des numéros supérieurs ou égaux à 500 dans ce type de nomenclature ;
- les halons se voient donner un numéro du même type augmenté d'un suffixe Bn où n représente le nombre d'atomes de brome ; une autre nomenclature plus courante utilise deux positions supplémentaires vers la droite selon le schéma suivant :



d'atomes de chlore et en (5) le nombre d'atomes de brome ; le numéro est alors précédé de la lettre H.

Le tableau 13 ci-après présente, pour permettre la compréhension de certains développements ultérieurs, le numéro des CFC les plus importants par leurs propriétés spécifiques et leur formule chimique.

Tableau 13 : Nomenclature des CFC les plus importants (4)

Numéro	Formule chimique
R 11	$C Cl_3 F$
R 12	$C Cl_2 F_2$
R 13	$C Cl F_3$
R 22	$C H Cl F_2$
R 23	$C H F_3$
R 112	$C Cl_2 F - C Cl_2 F$
R 113	$C Cl_2 F - C Cl F_2$
R 114	$C Cl F_2 - C Cl F_2$
R 115	$C Cl F_2 - CF_3$
R 123	$C H Cl_2 - CF_3$
R 124	$C H Cl F - CF_3$
R 125	$C H F_2 - CF_3$
R 134 a	$C H_2 F - CF_3$
R 141 b	$C H_3 - C Cl_2 F$
R 142 b	$C H_3 - C Cl F_2$
R 152 a	$C H F_2 - C H_3$

NOTA : Les CFC les plus importants par leur utilisation actuelle ou future sont en gras.

Le tableau 14 ci-après indique la composition de certains mélanges de CFC couramment utilisés.

Tableau 14 : Nomenclature des mélanges de CFC (5)

Numéro	Composition du mélange
R 500	R 12 + R 152 a
R 502	R 22 + R 115
R 503	R 23 + R 13

Les mélanges R 500, 502 et 503 sont des azéotropes - c'est-à-dire qu'ils se comportent comme des corps purs. Cette propriété, qui constitue l'une de leurs qualités, est précieuse dès lors qu'il y a évaporation du produit au cours de l'utilisation : en effet, les deux constituants du mélange s'évaporent à la même température, de sorte que la composition du mélange liquide ne se modifie pas au cours du processus - la composition de la vapeur étant identique de même que celle du liquide obtenu après condensation.

Le tableau 15 présente les halons les plus courants .

Tableau 15 : Présentation des halons (4) et (5)

Nomenclature R	Nomenclature H	Formule chimique
R 12 B1	H 1211	C Cl F ₂ Br
R 13 B1	H 1301	C F ₃ Br
R 24 B2	H 2402	C ₂ F ₄ Br ₂

On utilisera dans la suite, l'appellation CFC pour les seuls dérivés totalement halogénés des alcanes (sans hydrogène), soit les composés suivants : R11, R12, R13, R112, R113, R114, R115.

1.2. DES MARQUES COMMERCIALES MULTIPLES

Les CFC sont produits et commercialisés par un nombre important de sociétés, sous des noms de marque divers, suivis du numéro de la nomenclature technique. Le tableau 16 ci-après présente les noms des marques les plus connues.

Tableau 16 : Exemples de marques utilisées pour les CFC (3)

Marque-préfixe	Entreprise	Nationalité de l'entreprise
Forane	Atochem	France
Freon Geneton	Dupont Allied Chemicals	Etats-Unis Etats-Unis
Frigen Kaltron	Hoechst Kali-chimie	RFA RFA
Algofrene	Montedison	Italie
FCC	AKZO	Pays-Bas
Arcton	ICI	Royaume-Uni
Flon	Mitsui Fluorochemical	Japon
Daiflon	Daikin Kogyo	Japon
Asahiflon	Asahi Glas	Japon

Certains producteurs de halons utilisent aussi des noms de marque, comme ATOCHEM qui désigne sous le nom de Pyroforane ce type de produit. Ces marques ne sont toutefois pas passées dans le vocabulaire technique courant, contrairement aux marques Fréon, Forane ou Frigen.

2. LES PROPRIÉTÉS REMARQUABLES DES CFC

2.1. DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES EXCEPTIONNELLES

Les chlorofluorocarbones se caractérisent par un ensemble de propriétés physiques et chimiques intéressantes pour les applications concrètes qui sont bien sûr à la base de la multiplication de leurs usages dans l'industrie. Fait remarquable, ils constituent une famille de composés aux propriétés voisines dont le niveau dépend d'assez près du nombre d'atomes de fluor présents sur la chaîne carbonée, par exemple en ce qui concerne leur stabilité thermique et chimique⁽⁶⁾.

Les propriétés physiques les plus remarquables de la famille des CFC sont les suivantes :

- gamme presque complète de températures d'ébullition et de niveaux de tension de vapeur en fonction de la température ;
- ininflammabilité et non-explosivité pour la plupart des CFC ;
- conductibilité thermique faible - capacité d'isolation thermique forte.

L'ensemble de ces propriétés sont favorables aux applications de la réfrigération, de l'isolation thermique et de la fabrication des mousses.

Les propriétés chimiques marquantes de cette famille de composés sont quant à elles les suivantes :

- miscibilité à l'eau réduite pour un nombre important de CFC ;
- pouvoir solvant important vis-à-vis de molécules organiques complexes.;
- stabilité chimique, ce qui veut dire non-réactivité avec la plupart des autres molécules dans des conditions physiques correspondant à de multiples situations "industrielles".;
- non toxicité pour l'homme.

Ces propriétés viennent renforcer les atouts des CFC dans les domaines évoqués ci-dessus et leur ouvrent celui des solvants.

Les CFC présentent, en outre, l'avantage d'être peu coûteux et relativement simples à fabriquer.

2.2. DES COÛTS RÉDUITS ET DES SAVOIR-FAIRE RELATIVEMENT SIMPLES POUR LEUR FABRICATION

L'identification des chlorofluorocarbones comme molécules d'intérêt industriel date des années trente. Les premiers travaux de développement des CFC ont été réalisés par General Motors, à la recherche de fluides frigorigènes alternatifs par rapport aux fluides traditionnels utilisés dans ce domaine.

L'essor des CFC est venu, non seulement de l'adéquation de leurs propriétés aux besoins de l'industrie, mais aussi de leur coût de fabrication relativement réduit.

Si différentes méthodes de fabrication des CFC existent, elles ont toutes en commun d'être relativement peu complexes.

La plus courante des méthodes de fabrication du CFC-12 par exemple, revient à opérer une fluoration du tétrachlorure de carbone (CCl_4) en phase liquide (4). Un catalyseur doit être utilisé (fluorochlorure d'antimoine SbCl_4F), mais celui-ci est peu coûteux et facilement régénéré. L'un des réactifs, le tétrachlorure de carbone, est lui-même peu coûteux, car produit, par exemple, par action du chlore sur le méthane ou sur le sulfure de carbone. Quant à l'acide fluorhydrique, il est produit à partir d'un minéral dénommé spathfluor assez abondant, et selon un procédé maîtrisé depuis longtemps par les industries chimiques.

Des procédés plus récents ont été mis au point et se déroulent en phase gazeuse, avec comme catalyseurs, le chrome, l'aluminium ou le fer. Dans ce cas, les réactifs de départ sont le tétrachlorure de carbone (CCl_4), le chloroforme (CHCl_3) le trichloroéthylène (C_2HCl_3) et le tétrachloroéthylène (C_2Cl_4), produits en grande quantité dans l'industrie chimique.

Un procédé légèrement différent a été mis au point par Montedison mettant en jeu un lit fluidisé.

Un procédé électrochimique a été également développé par Phillips Petroleum.

La fabrication des halons s'effectue en aval de celle des CFC, par exemple par bromination d'un courant de fluorométhane ou du chlorofluorométhane gazeux à des températures comprises entre 300 et 600 °C. Les procédés correspondants ne nécessitent pas de technologies d'une nature différente.

Plusieurs faits sont essentiels, s'agissant des techniques de production des CFC stricto sensu. En premier lieu, les coûts de production sont peu élevés et la concurrence sur les marchés étant

importante, les prix de vente sont faibles, de l'ordre de quelques dizaines de francs par kg pour les CFC.

En second lieu, certaines installations industrielles fonctionnent par campagne et peuvent produire des CFC-11, 12, ou 22, alternativement, sans difficulté majeure.

En troisième lieu, la plupart des technologies de production des CFC ne sont plus protégées par des brevets. Un savoir-faire est bien sûr nécessaire pour la mise en oeuvre de ces procédés. Mais le nombre d'entreprises chimiques ou de bureaux d'études les maîtrisant ou capables de les transférer est important, alors que, comme on le verra plus loin, ceci n'est pas le cas pour les procédés de fabrication de ce que l'on appelle les substituts des CFC.

Ceci signifie que les Pays en Voie de Développement sont en situation d'augmenter rapidement leur production encore faible en valeur relative.

2.3. UN LARGE ÉVENTAIL D'UTILISATIONS

En raison de leurs propriétés applicatives nombreuses et de leur faible coût de production, le champ d'intervention des CFC dans l'industrie s'est considérablement élargi depuis la fin de la deuxième guerre mondiale.

Les CFC interviennent, en effet, dans les processus de fabrication relatifs aux aérosols, à la réfrigération, aux plastiques, et servent de solvants et de produits d'extinction.

Il est important de noter, d'une part, que l'ensemble de ces applications ont pu débiter bien avant la mise au point des CFC mais, d'autre part, que la disponibilité de ces derniers, compte tenu de leurs qualités et de leurs faibles coûts, a sans aucun doute favorisé la croissance des marchés correspondants.

Le tableau 17 présente à la fois les domaines d'application, industrielles où l'on trouve les différents CFC et les produits utilisés auparavant avec mention de leurs inconvénients.

Tableau 17: Domaines d'utilisation des CFC et produits antérieurement employés (7)

Domaine d'application	CFC utilisables	Produits utilisés avant l'emploi des CFC	
		Nature des produits	Inconvénients
aérosols	CFC-11, CFC-12 CFC-114	Bulane, Propane Diméthyléther	inflammables et explosifs
Fluides frigorigènes	CFC-11, CFC-12 CFC-22, CFC-502	Ammoniac Dioxyde de soufre Chlorure de méthyle	toxique et explosif toxique toxique
Mousses plastiques	CFC-11, CFC-12 CFC-114	Eau + gaz carbonique	capacité d'isolation thermique faible
Solvants	CFC-113	alcools solvants chlorés	inadaptés pour hymerminiaturisation
Extinction	Halons 1211, 1301 2402	Eau, mousses Gaz carbonique, bromure de méthyle, bromochlorométhane	endommagent les matériels toxiques et inadaptés aux atmosphères confinées

Les CFC se sont ainsi imposés comme produits intermédiaires dans un ensemble de fabrications qui représentent au niveau mondial entre 250 et 400 milliards de F de chiffre d'affaires, selon les estimations.

En 1989, au niveau mondial, la répartition des consommations de CFC stricto sensu par grands secteurs d'utilisation donne la première place avec 30 % à la réfrigération ; aux second et troisième rangs, l'on trouve les aérosols et les mousses avec chacun 25 % ; en quatrième place, les solvants avec 20 %.

Cette répartition (cf. tableau 18) est le produit d'évolutions multiples, au nombre desquelles il faut citer les efforts de réduction des utilisations correspondant au Protocole de Montréal, (voir plus loin) la croissance des besoins en solvants pour les secteurs de l'électronique et de la mécanique de précision, les efforts d'équipement des Pays en Voie de Développement dans le domaine du froid. Ces évolutions sont au centre des débats actuels (voir plus loin).

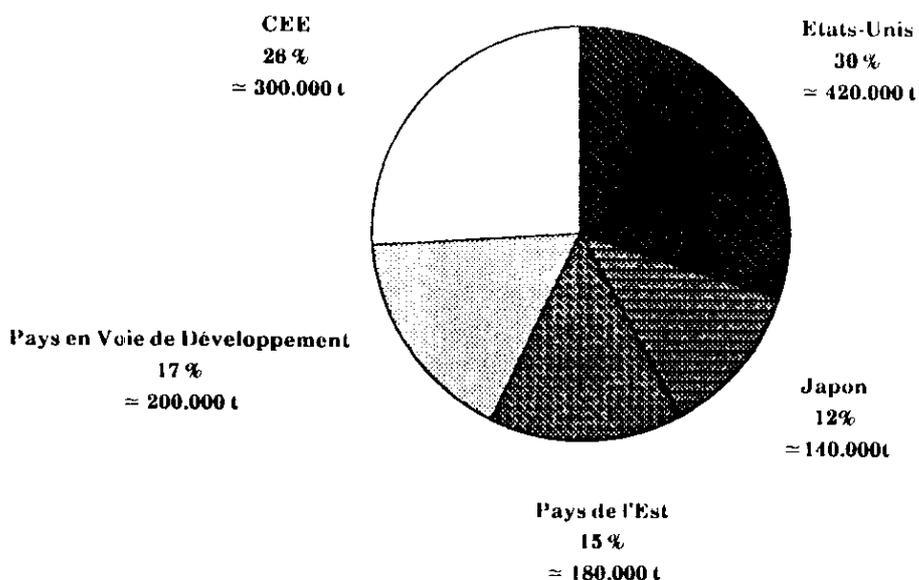
Tableau 18 : Evolution mondiale en % de la consommation mondiale de CFC par secteurs d'utilisation (1)

	Aérosols %	Fluides de réfrigération %	Mousses plastiques %	Solvants %	Total %
1976	59	21	15	5	100
1987	30	30	30	10	100
1989	25	30	25	20	100

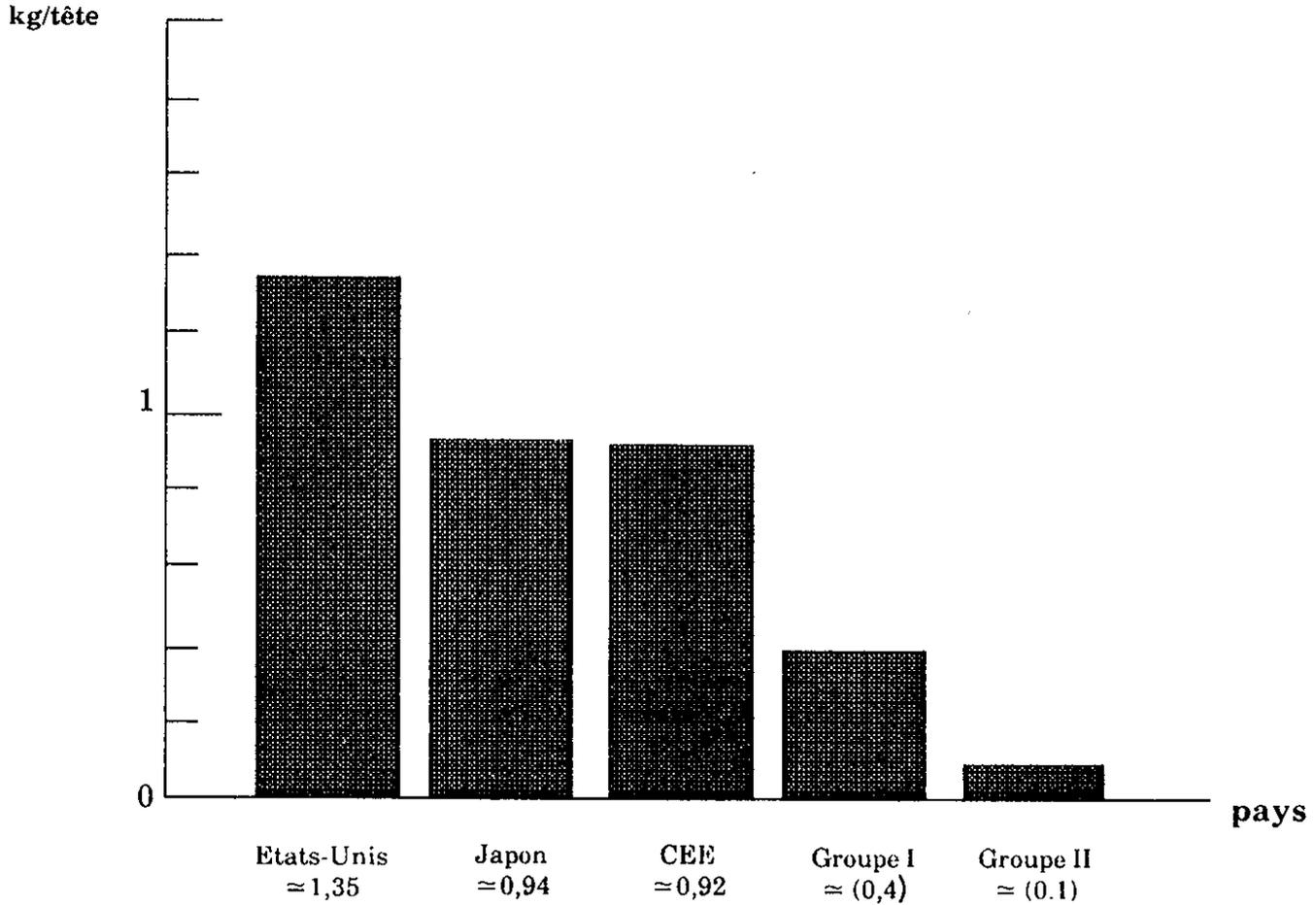
Globalement, la consommation mondiale de CFC peut-être estimée à 1,2 million de tonnes, soit un chiffre voisin de celui de la production (1).

Les consommations de CFC sont liées à la taille des marchés et au niveau de développement (voir graphiques 8 et 9).

Graphique 8 : Répartition par grandes régions de la consommation mondiale de CFC - Estimations 1988 sur la base d'une consommation mondiale de 1,2 mt (2)



Graphique 9 : Consommations par tête d'habitant
Estimations 1988(2)



Les Etats-Unis se caractérisent ainsi par la consommation par habitant la plus élevée (entre 1,30 et 1,40 kg par habitant).

Le Japon (0,94 kg/habitant) et la CEE (0,92 kg/habitant, sauf Portugal) se trouvent pratiquement au même niveau.

On trouve ensuite un groupe de pays dont la consommation par habitant est comprise entre 0,3 et 0,5 Kg par habitant (Norvège, Liechtenstein, Portugal, Arabie saoudite, Bahrein, Barbades et Trinidad).

La très grande majorité des Etats, pour l'essentiel les Pays en Voie de Développement et les pays de l'Est (y compris l'Union Soviétique), ont une consommation inférieure à 0,3 kg/habitant.

En dépit de la modicité des prix de vente, les CFC font l'objet d'échanges internationaux (cf tableau 19).

Tableau 19 : Production, consommation et commerce international des CFC par grandes zones -1986 - (19)

Milliers de tonnes	Production	Consommation	Balance Commerciale
Amérique du Nord	329	342	- 13
Europe de l'Ouest	446	342	+ 104
Europe de l'Est	140	171	- 31
Asie et Amérique latine	225	285	- 60

3. DES CONSOMMATIONS FONCTION DES SPÉCIALISATIONS INDUSTRIELLES ET DES COMPORTEMENTS

Les consommations de CFC par type d'utilisations varient fortement selon les pays en fonction des spécialisations industrielles, des comportements de consommation ainsi qu'en fonction des efforts réalisés en application du Protocole de Montréal (voir plus loin).

Tableau 20 : Consommation par pays et par utilisation de CFC (2)

	Aérosols	Réfrigération et conditionnement d'air %	Mousses plastiques %	Solvants %	Total
Etats-Unis 1988	4	40	33	23	100
Japon - 1988	10	31	22	37	100
CEE - 1988	46	9	28	17	100
Pays en Développement - 1989	17	43	17	23	100

Les États-Unis n'utilisent plus les CFC pour les aérosols depuis 1978 mais utilisent largement ceux-ci dans la réfrigération et le conditionnement d'air dont on sait qu'il est généralisé dans les locaux professionnels domestiques et les véhicules motorisés. Les niveaux de

consommation par produit étaient les suivants, en 1988, pour les Etats-Unis :

consommation totale	: ≈ 420.000 tonnes
CFC-11	: ≈ 100.000 tonnes
CFC-12	: ≈ 200.000 tonnes
CFC-113	: ≈ 100.000 tonnes
Halons	: ≈ 9.000 tonnes

Le Japon, (consommation totale 1988 : ≈ 140.000 tonnes), quant à lui, se caractérise à la fois par un développement moins fort du secteur de la réfrigération et du conditionnement d'air et par une utilisation très importante des CFC en tant que solvants dans les industries électroniques et la mécanique de précision (progression de 50 % entre 1984 et 1987).

Les données relatives à la CEE recouvrent des disparités très importantes dans les structures de consommation selon les utilisations. Ainsi pour les aérosols, la Grande-Bretagne est un important utilisateur de CFC alors que d'autres pays de la Communauté ne le sont plus (voir plus loin). Les niveaux de consommation estimés pour 1988 étaient les suivants pour la CEE :

consommation totale	: ≈ 307.000 tonnes
CFC-11 et CFC-12	: ≈ 259.000 tonnes
CFC-113 et CFC-114	: ≈ 48.000 tonnes

4. UNE PRODUCTION MONDIALE CONCENTRÉE.

La production mondiale des CFC et halons est évaluée pour 1988 comme étant comprise entre 1.200.000 et 1.600.000 tonnes, ce qui correspond à un chiffre d'affaires total compris entre 12 et 15 milliards de F. (2).

La marge d'incertitude sur la production mondiale résulte, d'une part, du secret commercial invoqué par certains producteurs et certains Etats et, d'autre part, de l'absence de données précises concernant les pays de l'Est et les Pays en Voie de Développement

4.1. UNE PRODUCTION MONDIALE ENCORE DOMINÉE PAR LES PAYS INDUSTRIALISÉS

Le tableau 21 ci-après donne une estimation de la répartition géographique de la production dont il ressort que les Etats-Unis et la CEE assuraient en 1988 la plus grande part (70 % environ).

Tableau 21 : Ventilation géographique de la production totale de CFC (Estimations pour 1988) (2) et (3).

États-unis	CEE	Japon	Pays de l'Est	Pays en Voie de développement
35-36 %	35-36 %	12,5-15 %	10-10,5 %	4-5 %

Plusieurs remarques doivent être faites sur ces données.

D'abord, les chiffres de production sont bien sûr différents des chiffres concernant les capacités de production ; ainsi pour 1984, les Etats-Unis déclaraient une production de 550.000 tonnes pour une capacité de production de 630.000 tonnes.

D'autre part, les situations des différentes zones sont différentes au regard de l'utilisation de ces productions.

La CEE est globalement exportatrice de CFC, grâce aux positions acquises par la France, la Grande-Bretagne, l'Italie et les Pays-Bas, la RFA consommant toutefois entièrement sa production.

Le Japon n'apparaît pas spécialisé sur ce type de produit chimique et consomme sa production.

Les Etats-Unis ont choisi la présence directe sur les marchés étrangers, notamment grâce aux multiples filiales à l'étranger de DUPONT.

Par ailleurs, les pays du Tiers Monde dits à revenus intermédiaires ont sans doute une production en croissance rapide.

En 1984, l'Inde déclarait au PNUE une production de 15.000 tonnes, la Chine 18.000 tonnes et le Brésil 18.000 tonnes également.

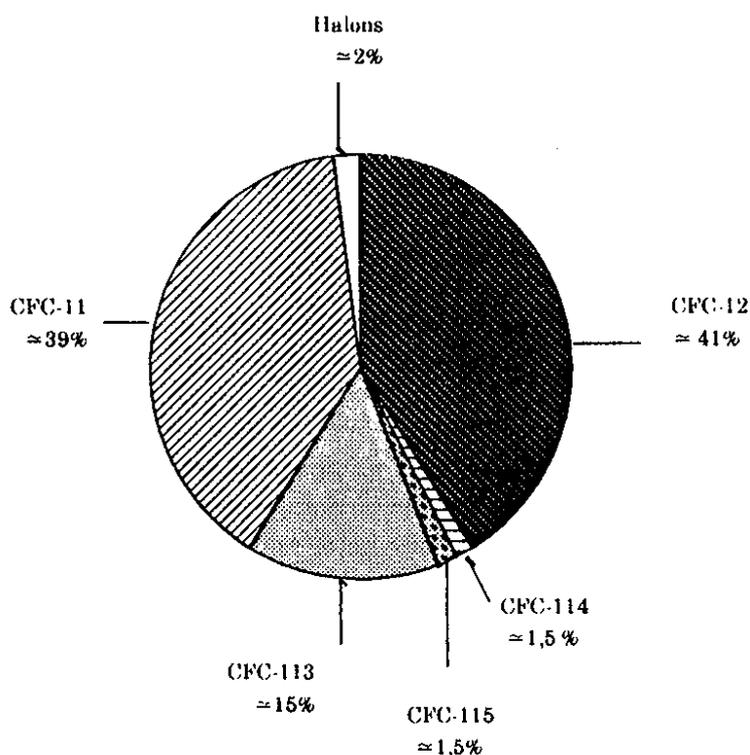
Compte tenu des enjeux de la renégociation en cours du Protocole de Montréal, il est difficile d'obtenir des données récentes et assurées sur ces productions. Mais il ne fait pas de doute qu'étant donné la multiplicité des usages de CFC dans l'industrie, ces pays soit ont augmenté leur production depuis 1984, soit sont en situation de le faire dans des délais courts, dès lors que les perspectives des marchés nationaux d'aval ou les perspectives à l'exportation seront attractives.

4.2. LA PRÉDOMINANCE DES CFC-11,12, ET 113.

Parmi les différents CFC et halons ⁽⁷⁾ produits dans le monde, les quantités les plus importantes sont celles relatives au CFC-11 (375.000 tonnes environ) et au CFC-12 (450.000 tonnes environ). Viennent ensuite le CFC-113 (150.000 tonnes, en une augmentation rapide selon certaines sources), le CFC-22 (150.000 tonnes), les CFC-114 (15.000 tonnes), le CFC-115 (15.000 tonnes), les halons 1211 et 1301 (production mondiale confondue de 25.000 tonnes).

Le graphique 10 illustre les importances respectives en termes de production des différents CFC.

Graphique 10 :
Répartition en % de la production mondiale de CFC et halons
(sur la base d'une production totale de 1,2 million de tonnes)⁽⁷⁾



Deux autres produits connexes aux CFC doivent être recensés en raison de la similitude des usages qui en sont faits et en raison également de leur aptitude, sous certaines conditions, à libérer des atomes de chlore.

Il s'agit du tétrachlorure de carbone (CCl_4) et du méthylchloroforme ou trichloro 1-1-1 éthane ($\text{CH}_3 - \text{CCl}_3$). Les

données disponibles sont fragmentaires. Les ordres de grandeur de production étaient de 300.000 tonnes pour le tétrachlorure de carbone en 1980 pour les Etats-Unis et de 125.000 tonnes pour le méthylchloroforme en 1988 pour la CEE.

Il est à noter que les Pays en Voie de Développement dits à revenus intermédiaires sont, selon toute vraisemblance, des producteurs de ces deux composés, indispensables dans différents processus industriels, touchant aussi bien la chimie que d'autres domaines.

4.3. L'AVANCE COMMERCIALE DE CINQ PRODUCTEURS DONT LE FRANÇAIS ATOCHEM

Cinq producteurs qui possèdent environ 75% des capacités de production ont acquis une avance technique et commerciale importante dans l'industrie mondiale des CFC.

Le tableau 22 présente les principales données disponibles concernant les entreprises produisant des CFC.

Tableau 22 : Les principaux producteurs de CFC dans le monde en 1988-1989

Classement en termes de capacités de production estimées (1989)	Nom de l'entreprise et pays d'origine	Filiales de production de CFC	Capacité totale de production estimée (1989)	Estimation de la part de la production mondiale de CFC
1	DUPONT (Etats-Unis)	Argentine Brésil Mexique Canada Japon Pays-Bas	≈ 300.000 t	≈ 25 %
2	ATOCHEM (France)	Espagne Etats-Unis Venezuela Australie	≈ 200.000 t dont 85.000 t à Pierre-Bénite	≈ 17 %
3	Allied-Signal (Etats-Unis)	Canada Mexique	≈ 150.000 t	≈ 12 %
4	ICI (Grande-Bretagne)	Canada Mexique	≈ 130.000 t	≈ 11 %
5	Hoechst (RFA)	Espagne Brésil	≈ 100.000 t	≈ 8 %
6	Montefluos (Italie)	-	≈ 90.000 t	
7	Asahi Glass (Japon)	-	≈ 60.000 t	
8	Solvay-Kali (Belgique)	-	≈ 50.000 t	
9	Kanto-Denko (Japon)	-	≈ 40.000 t	
10	Daikin-Kogyo (Japon)	-	≈ 30.000 t	
11	AKZO (Pays-Bas)	-	≈ 30.000 t	

DUPONT DE NEMOURS, détient une part du marché mondial d'environ 25 % pour les CFC. DUPONT est classé pour 1988, selon Chimie Actualités, au 5ème rang des entreprises mondiales pour son activité globale "chimie". On connaît la puissance de DUPONT au niveau de la production mais aussi à celui de la Recherche et du Développement qui a conduit cette firme à être à l'origine de produits dont les noms de marque sont connus du grand public : Nylon, Lycra, Kevlar, Mylar, Fréon pour les CFC, etc.

DUPONT semble en mesure, en tout état de cause, de maîtriser les évolutions nécessaires et inéluctables de l'offre de produits fluorocarbonés, de manière à conserver une part de marché voisine du quart du marché mondial.

La deuxième entreprise mondiale dans le domaine des CFC est ATOCHEM, filiale "chimie" d'Elf-Aquitaine.

ATOACHEM parvient à cette position à l'issue d'un mouvement de croissance externe particulièrement dynamique, par rachat d'entreprises américaines produisant notamment des CFC (Pennwalt et Racon acquises en 1989). Début 1990, ATOACHEM détenait environ 60 % du marché français (de 50 à 80 % selon les produits), 30 % du marché européen et exportait environ la moitié de sa production.

La reprise récente des activités, engrais, plastique, chimie fine et spécialités d'Orkhem devrait, en outre, propulser ATOACHEM de la 14ème place du classement mondial des firmes chimiques en 1988 à environ la 10ème place en 1990, accroissant les moyens de l'entreprise pour s'adapter aux évolutions de la réglementation et des marchés.

ATOACHEM maîtrise une large palette de productions et cette situation est renforcée par la croissance récente de sa taille. Les CFC ne représentent qu'une part relativement réduite de son chiffre d'affaires (environ 1 milliard de francs sur un chiffre d'affaires prévisible de 60 milliards de F en 1990 avec son nouveau périmètre). En particulier, ATOACHEM maîtrise l'amont de la filière des CFC, c'est-à-dire notamment les chimies du chlore et du fluor et il en est de même de Pennwalt, inclus désormais dans ATOACHEM North America.

Parmi les autres cinq "grands" de la production des CFC, ICI (5ème rang mondial des firmes chimiques en 1988) et Hoechst (2ème rang) possèdent des positions plus assurées qu'Allied Signal, absente des quinze premières places de la hiérarchie mondiale des firmes chimiques. La spécificité d'ICI doit être soulignée, car cette entreprise est également présente dans l'aval, notamment pour les mousses (2), ce qui pourrait lui conférer un avantage commercial important en cas de modification rapide des conditions de l'offre.

Pour Hoechst, les CFC représentent une activité très marginale, compte tenu de son chiffre d'affaires global dans la chimie. Selon l'un des experts consultés (7), un retrait d'Hoechst de la production pourrait se produire, si les souhaits de l'opinion publique allemande en matière de protection de l'environnement et en particulier de protection de la couche d'ozone n'étaient pas pris en compte par une évolution rapide de la réglementation.

S'agissant des halons, les producteurs sont en nombre plus restreint et qui plus est, sont souvent spécialisés dans un type particulier de produit (2). Ainsi DUPONT ne produit que le halon 1301, ICI et Kali-Chimie ne produisent que le halon 1211. Au contraire, ATOACHEM est en mesure de fabriquer le 1211 ainsi que le 1301, commercialisé sous le nom de Pyrofrane.

B - IL EST NÉANMOINS TECHNIQUEMENT ENVISAGEABLE DE SE PASSER DES CFC OU DE LES ÉCONOMISER

Les CFC ont sans aucun doute apporté, de par leurs qualités, une contribution importante au développement des marchés de différents produits.

La permanence des chiffres d'affaires et des marges toujours souhaitée par les producteurs et les industries d'aval et celle des emplois correspondants pourraient sembler constituer des obstacles décisifs à l'abandon des CFC dans toute une série de filières.

En réalité, le constat scientifique est sans ambage : la priorité doit être donnée à la protection de la couche d'ozone, quelles que soient les incertitudes qui subsistent sur le rôle exact des CFC. S'ajoute à ce constat, la demande voire la pression, dans certains pays, de l'opinion publique qui exige ou exigera à bref délai le bannissement des CFC, comme élément indispensable d'une politique responsable vis-à-vis de l'environnement.

L'industrie mondiale doit en conséquence intégrer comme contrainte incontournable la réduction de la production et des utilisations des CFC.

Le choc externe que ce redéploiement constitue porte, on l'a vu, non seulement sur les producteurs de CFC mais aussi sur toutes les industries employant dans leurs fabrications ces composés chimiques.

Ce choc ne se produit toutefois pas sans qu'aucune solution de remplacement n'ait été étudiée dans un passé lointain ou récent.

Le premier type de solution consiste à élaborer des composés chimiques voisins des CFC, de la même famille chimique des dérivés fluorés des alcanes, présentant leurs caractéristiques physiques favorables mais exempts de leurs inconvénients rédhibitoires désormais vis-à-vis de l'ozone stratosphérique.

C'est la solution des substituts préconisée par les firmes chimiques engagées actuellement dans la production de CFC, en particulier pour les applications en réfrigération et mousse d'isolation. Mais cette solution ne saurait être la seule au problème posé.

Il existe, en effet, un deuxième type de solution, celle des produits de remplacement et des technologies alternatives.

Les produits de remplacement dérivent souvent de ceux utilisés avant l'introduction des CFC. Les technologies alternatives consistent à changer de procédés pour aboutir à des résultats identiques dans les différents secteurs d'aval.

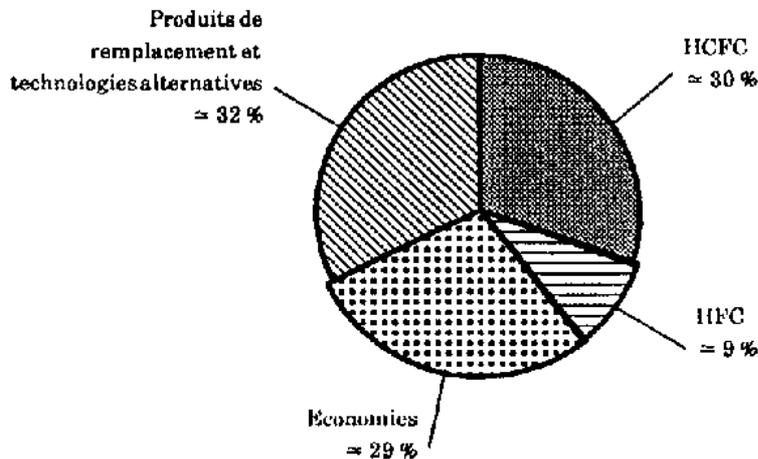
Parallèlement et au-delà de ces deux démarches, il est indispensable de mettre en oeuvre une démarche générale de gestion économe des CFC et de leurs substituts dans les secteurs concernés. Ces économies sont indispensables au niveau de l'emploi des CFC dans la période de transition conduisant à une industrie "sans CFC". Cette démarche d'économie sera, d'autre part, indispensable également pour l'avenir, dans la mesure où les produits de substitution des CFC ne seront pas, selon toute vraisemblance, sans inconvénient aucun vis-à-vis de l'environnement.

Ce qui semble, par ailleurs, parfaitement clair aujourd'hui, à la lumière des recherches en cours et de l'analyse des comportements des utilisateurs dans leurs premiers efforts de réduction d'emploi des CFC, c'est que la recherche de substituts, le recours à des produits de remplacement et des technologies alternatives et la recherche d'économies d'utilisation sont des démarches complémentaires qui doivent être poussées plus avant, simultanément.

Différentes études ont été réalisées pour tenter d'évaluer, à l'horizon 2000, les importances respectives des trois types de démarche. Ces études reposent sur une évaluation, produit par produit, application par application, des solutions techniques à retenir.

Celles-ci seront présentées dans la suite. Le graphique 11 présente l'évaluation faite par DUPONT de Nemours de la situation en l'an 2000, à applications et demande constantes.

Graphique 11 : Comment la demande en CFC serait satisfaite en l'an 2000 sur la base des applications actuelles (2)



Source : DUPONT avril 1990

Ainsi, toutes choses égales par ailleurs, la demande actuellement adressée aux producteurs de CFC soit 1.200.000 tonnes devrait laisser la place à une demande de 450.000 tonnes de HCFC et de HFC adressée aux fabricants de ces produits de substitution, sur la base des applications actuelles.

Les économies réalisables et réalisées en l'an 2000 par rapport à la situation actuelle, sont estimées à hauteur du tiers de la consommation présente de CFC.

Les produits de remplacement et les technologies alternatives pourraient prendre en charge les applications correspondant également au tiers de la consommation de CFC.

Les données présentées ci-dessus ne sont, toutefois, que des estimations. Elles sont relatives, par ailleurs, à une situation très particulière : une dizaine d'années (1990-2000) sans modification des applications actuelles des CFC, ni sur le plan de la demande et donc des besoins ni sur le plan des techniques utilisées.

En réalité, les besoins en équipements de réfrigération et de conditionnement d'air, en mousses d'isolation ou de confort, voire en solvants et en halons ne peuvent que croître avec l'élévation du niveau

de vie, à la fois dans les pays industrialisés et dans les Pays en Voie de Développement.

Le marché actuel des applications recourant aux CFC devrait donc croître sensiblement dans les prochaines années.

De ce fait, les perspectives de marché pour les HCFC et les HFC sont en réalité très supérieures aux 450.000 tonnes de l'étude citée ci-dessus.

Le futur marché mondial des HCFC et des HFC devrait se situer, selon différentes estimations entre 650.000 tonnes, selon DUPONT et 800.000 tonnes selon ATOCHEM, par an. Vers 2030, la demande mondiale en HCFC et HFC devrait atteindre 2,2 millions de tonnes (contre 1,2 million en 1988) (2).

Le tableau 23 présente la répartition par grandes zones de la demande future de HCFC et de HFC en l'an 2000 et en l'an 2030 selon les projections de DUPONT (2).

Tableau 23 : Répartition géographique de la consommation future de HCFC et HFC (3)

En % de la demande mondiale	2000	2030
Etats-Unis	49,2	28,3
Europe	19,2	13,6
Japon	20,0	12,7
Reste du monde	11,6	45,4
total	100	100

Les productions correspondantes ont donc un avenir, selon toute probabilité, florissant. Cet avenir le sera d'autant plus que les HCFC et les HFC seront plus proches techniquement des actuels CFC et plus rapidement disponibles.

Il n'en demeure pas moins que les voies des produits de remplacement et des technologies alternatives, ainsi que celle des économies d'utilisation sont pratiquables, souhaitables et, d'ailleurs, déjà empruntées, comme on le verra plus loin.

1. LES SUBSTITUTS DES CFC : HCFC et HFC

Ainsi que cela a été précisé dans l'avant-propos, les substituts des CFC sont par définition les HCFC-hydrochlorofluorocarbones et les HFC-hydrofluorocarbones.

Ces composés chimiques sont de la même famille chimique que les CFC mais leur structure fait apparaître un remplacement partiel des atomes de chlore par des atomes d'hydrogène : ce sont alors des HCFC ou un remplacement total des chlores par des hydrogènes : ce sont alors des HFC.

1.1. NOMENCLATURE DES HCFC ET DES HFC

Les nomenclatures techniques utilisées en chimie des dérivés halogénés des alcanes ont été décrites ci-dessus.

Dans le vocabulaire industriel, économique voire diplomatique, l'on trouve les sigles supplémentaires : HCFC et HFC.

Cette désignation n'est pas contradictoire avec la nomenclature des CFC.

Ainsi le R 22 (CHClF_2) est un HCFC parce qu'il contient un atome d'hydrogène ; de même pour le R 123.

La présence d'un atome d'hydrogène sur la chaîne carbonée a, comme on l'a vu, une conséquence fondamentale vis-à-vis de la destruction de l'ozone : les molécules correspondantes sont dégradées par les radicaux OH présents à l'état de trace dans la troposphère, précisément du fait de la présence de l'atome d'hydrogène. Ces molécules n'atteignent donc pas en l'état la stratosphère, où elles pourraient exprimer avec plus d'acuité leur potentiel destructeur d'ozone.

Les HFC quant à eux ne comprennent aucun atome de chlore. Par conséquent, quel que soit leur devenir dans la troposphère, les HFC ne participent pas à l'augmentation de la charge en chlore de la stratosphère.

Le tableau 24 suivant indique, par catégorie, les principaux HCFC et HFC.

Tableau 24 : Les principaux substituts des CFC

Composé	Formule chimique	Catégorie
R22	CHClF ₂	HCFC
R123	CHCl ₂ -CF ₃	HCFC
R124	CHClCF ₃	HCFC
R141b	CH ₃ -CCl ₂ F	HCFC
R142b	CH ₃ -CClF ₂	HCFC
R125	CHF ₂ -CF ₃	HFC
R134a	CH ₂ F-CF ₃	HFC
R152a	CHF ₂ CH ₃	HFC

Au total, la nomenclature la plus claire est sans doute la suivante :

- abandon du préfixe R, marqué par la seule utilisation des CFC dans la réfrigération, alors que ces composés ont de multiples autres utilisations.;
- utilisation des préfixes, CFC, HCFC ou HFC fonction de la formule chimique détaillée des composés.

Le tableau 25 regroupe les CFC, HCFC, HFC importants sur le plan industriel.

Tableau 25 : Nomenclature explicite des CFC, HCFC et HFC

CFC visés par le Protocole de Montréal	HCFC	HFC
CFC-11	HCFC-22	HFC-125
CFC-12	HCFC-123	HFC-134a
CFC-113	HCFC-124	HFC 152a
CFC-114	HCFC-141b	
CFC-115	HCFC 142b	

REMARQUE : LA DÉNOMINATION HFA : UNE ALTERNATIVE MOINS SPÉCIFIQUE.

Différents producteurs de CFC et de substituts ont introduit une dénomination différente pour les HCFC et les HFC qui consiste, d'une part, en l'utilisation du sigle HFA pour hydrofluoroalkanes et, d'autre part, en la reprise du système de numérotation à trois chiffres de la nomenclature technique décrite plus haut.

Avec ce mode de désignation, l'on aboutit aux résultats suivants pour différents substituts : le R22 (CHClF₂) qui comprend un atome de chlore est dénommé HFA ; le R134a (CHF₂-CHF₂) qui ne comprend pas d'atome de chlore est aussi dénommé HFA.

La justification de cette méthode de désignation est que les composés fluorés qui comprennent un atome d'hydrogène sont dégradables dans la troposphère et sont donc d'une nature différente car contribuant moins, en première analyse, à l'augmentation de la charge en chlore de la stratosphère.

Mais cette dénomination met sur le même plan les dérivés fluorés qui comprennent des atomes de chlore et ceux qui n'en comprennent pas.

Pour la suite, nous préférons donc conserver la distinction entre HCFC et HFC.

1.2. LES ETUDES SUR LES HCFC ET LES HFC

Ni les HCFC (à l'exception des HCFC-22 et 142b) ni les HFC ne sont, pour le moment, des composés de référence des industries chimiques.

Leurs propriétés physiques et chimiques ont donc été mal connues, jusqu'à ce que les producteurs de CFC ne commencent leurs investigations pour essayer de trouver leurs substituts, à l'intérieur de la même famille de produits chimiques (ceci de manière à pouvoir exploiter les savoir-faire antérieurs et garder leurs marchés).

Ces études doivent être très complètes et très précises de manière à défricher le champ des utilisations possibles.

Une fois repérées les molécules dotées des propriétés les plus intéressantes pour des applications éventuelles, il est nécessaire de procéder, d'une part, à des études d'impact sur l'environnement (et pas uniquement sur la stratosphère) de ces nouveaux composés et, d'autre

part, à des études de toxicologie pour vérifier que leur emploi est possible par les industries de l'aval et par les consommateurs.

Les principales firmes productrices de CFC se sont regroupées au sein de l'AFEAS (Alternative Fluorocarbon Environmental Acceptability Study) afin d'accélérer les recherches et d'en partager les coûts, dans les domaines de la physique et de la chimie des substituts dans l'environnement.

Les firmes chimiques membres de l'AFEAS sont présentées dans le tableau 26.

Tableau 26 : Entreprises membres de l'AFEAS (10)

Entreprises	Pays
DuPont Allied-Signal Racon (Atochem) Penwalt (Atochem) La Roche Chemicals	Etats-Unis " " " "
Atochem	France
ICI Chemicals and Polymers Ltd ISC Chemicals	Royaume Uni "
Hoechst AG Kali-Chemie AG	RFA "
Akzo	Pays-Bas
Montefluos	Italie
Chemical Industries of Northern Greece	Grèce
Daikin Asahi-Glass	Japon

L'AFEAS représente la mise en commun par une quinzaine d'entreprises, d'une somme de 8 millions de dollars sur trois ans, pour confier aux organismes de recherche les meilleurs du monde différentes missions d'études.

Le premier ensemble de recherches a fait l'objet de la publication en 1989 d'un document de synthèse présentant les résultats obtenus dans les domaines suivants (11) :

- propriétés physiques des HCFC et des HFC : thermodynamique, constantes d'absorption, Global Warming Potential (GWP);
- propriétés chimiques : constantes de réaction, mécanismes, durées de vie, ozone, effets toxicologiques des produits de dégradation dans la troposphère, Ozone Depletion Potential (ODP).

Le rapport de l'AFEAS mentionné ci-dessus, présente comme tout document scientifique, une liste des experts impliqués dans le programme de recherche.

On y constate une sous-représentation de la recherche française. Alors qu'ATOCHEM, entreprise nationale, assure 17 à 18 % de la production mondiale de CFC selon les différentes estimations et que plusieurs équipes de recherche françaises sont compétitives sur le plan international, l'on ne trouve qu'un seul scientifique français - R. LESCLAUX de l'Université de Bordeaux - parmi les experts impliqués dans les programmes AFEAS contre environ les deux tiers d'experts nord-américains et l'on ne trouve aucun Français parmi les experts superviseurs des travaux.

L'absence d'experts français de deux champs de bataille : celui des enjeux technologiques des mutations industrielles et celui des instances de coopération ou de négociation internationales, existe malheureusement aussi dans les domaines industriels et techniques relatifs à la réduction de l'utilisation des CFC.

L'AFEAS a, depuis la publication du rapport précité (10), engagé des travaux complémentaires dans les directions suivantes :

- explication des mécanismes de catalyse de la destruction de l'ozone par le chlore et intégration de ces mécanismes dans les modèles ;
- étude approfondie des produits de décomposition atmosphérique des substituts des CFC ;
- étude des effets de la diminution de l'ozone stratosphérique sur le niveau d'UV-B reçus au sol.

Les producteurs de CFC se sont également regroupés afin de faire effectuer à coûts partagés les indispensables études de toxicologie, au sein des PAFT (Programs for Alternative Fluorocarbon Toxicity Testing).

Les coûts des études toxicologiques sont élevés : environ 10 millions de dollars par produit étudié.

Le tableau 27 indique les parties prenantes dans ces programmes PAFT, ainsi que leur objet.

Tableau 27 : Participations des producteurs aux programmes PAFT et produits étudiés (10)

Programme	PAFT 1	PAFT 2	PAFT 3
Produits étudiés	HCFC-123 HFC-134 a	HCFC-141b	HCFC-124 HCFC-125
DuPont Allied Signal	x x	x x	x x
Atochem (+ Racon + Pennwalt)	x	x	x
ICI ISC (RTZ Chemicals)	x x	x	x x
Hoechst Kali Chemie (Solvay)	x x	x	
Montefluos	x		x
Akzo	x	x	
Asahi Glas Daikin	x x	x x	

1.3. LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES HCFC ET DES HFC

Les propriétés physiques des dérivés fluorés des alcanes conditionnent leur emploi dans les industries d'aval. C'est pourquoi une étude systématique de leurs propriétés a été confiée par l'AFEAS à différents laboratoires spécialisés.

1.3.1. Thermodynamique

Les propriétés thermodynamiques constituent la base d'emploi des HFC et des HCFC.

Le niveau du point d'ébullition normal et les tensions de vapeur conditionnent l'utilisation de ces produits en temps qu'aérosols et qu'agents moussants.

Le niveau du point d'ébullition normal dans l'échelle des températures est important pour les applications de réfrigération. L'écart entre le point d'ébullition normal et le point critique l'est également car il représente la plage de températures utilisables pour les applications de réfrigération et de solvatation.

Le point critique est en effet le point au-delà duquel les propriétés du liquide saturé de vapeur et la vapeur elle-même deviennent confondues ; la coexistence de liquide et de vapeur - capitale pour la réfrigération - est possible seulement à des températures et des pressions inférieures au point critique.

Le tableau 28 suivant présente les principales données de température pour les HCFC et les HFC étudiés par l'AFEAS. (11).

Tableau 28 : Principales estimations de température relatives aux HCFC et aux HFC (11)

°C	Point triple ⁽¹⁾	Point d'ébullition normal ⁽²⁾	Point critique
HCFC -22	-160	-41	+ 96
HCFC -123	-107	+ 28	+ 184
HCFC -124	-199	-12	+ 122
HCFC -141b	-103	+ 32	+ 208
HCFC -142b	-131	- 9,6	+ 137
HFC -125	-103	-49	+ 66
HFC -134a	-101	-26	+ 101

*Nota : (1) point pour lequel il y a coexistence des trois phases solide, liquide, gaz
(2) température pour laquelle la pression de vapeur est égale à 1 atmosphère (101,325 kPa)*

Ce tableau montre clairement quelles peuvent être a priori les utilisations des substituts.

En première analyse, l'on peut dire que les fluides les mieux placés pour la réfrigération sont le HCFC-22 - effectivement utilisé actuellement dans les systèmes de réfrigération industrielle ou commerciale -, le HFC-134a et le HFC-125, dont les points d'ébullition sont particulièrement bas.

Mais, bien sûr, d'autres facteurs entrent en jeu, et conduisent à disqualifier certains produits précédemment sélectionnés ou à en requalifier d'autres.

En tout état de cause, ainsi qu'il a été vu plus haut pour les CFC, un éventail de propriétés thermodynamiques doit être couvert pour déterminer les usages éventuels des HCFC et des HFC.

L'état effectué fin 1989, par l'AFEAS, des connaissances disponibles pour la thermodynamique des HCFC et des HFC montre que des zones d'incertitudes demeurent. Ainsi, même pour les données de température présentées au tableau 28, les estimations sont quelquefois contradictoires d'un auteur à l'autre. Ceci provient en particulier de la difficulté à disposer de produits parfaitement purs lors des mesures.

De la même manière, M. O. MAC LINDEN, l'auteur chargé dans le rapport de l'AFEAS (11) du secteur d'études des propriétés physiques indique qu'il est urgent de disposer de données de pressions de vapeur pour les HCFC-124, 141b, 142b et des valeurs de densité pour le HCFC-142b. Il précise plus loin que les mesures de solubilité dans l'eau sont peu nombreuses et peu fiables.

Les représentants des professions d'aval, c'est-à-dire les industriels des secteurs utilisant les CFC, se sont souvent émus de ne disposer que de données fragmentaires concernant les substituts des CFC (12).

Il est clair que la mise en oeuvre rapide de ces derniers exige simultanément des échantillons de qualité et des données précises et complètes concernant ces produits.

Des autorisations de production limitée ont été fournies en France par l'administration pour des HCFC voire des HFC non encore autorisés parce que n'ayant pas subi avec succès tous les tests de toxicologie.

Ces autorisations vont dans le bon sens mais il semble nécessaire d'accélérer les programmes de mesures physiques et en particulier thermodynamiques des substituts des CFC et de communiquer leurs résultats à tous les utilisateurs concernés.

1.3.2. Propriétés d'absorption dans l'ultra-violet

L'absorption d'UV solaires par les molécules de substitués de CFC n'est pas négligeable pour la plupart d'entre eux, à l'exception du HCFC-22.

Il en résulte que les molécules sont détruites dans la stratosphère et voient leur ODP (Ozone Depletion Potential) réduit d'une manière importante.

1.3.3. L'absorption infra-rouge par les HCFC et les HFC

Les HCFC et les HFC présentent la particularité d'absorber les rayonnements infra-rouges pour des longueurs d'onde comprises entre 8 et 12 μm ., correspondant à la "fenêtre" de l'atmosphère.

Cette caractéristique est partagée par d'autres molécules, en particulier par les CFC et surtout par le dioxyde de carbone CO_2 , le méthane CH_4 et la vapeur d'eau stratosphérique.

Le phénomène correspondant est, comme on le sait, celui de l'effet de serre.

La contribution des HCFC et des HFC à l'effet de serre ne peut être nulle, compte tenu de leur "aptitude" de base à absorber les rayons infra-rouges.

Mais leur contribution réelle dépend de multiples autres effets, notamment leur durée de vie dans la troposphère liée à leur stabilité chimique face aux constituants chimiques autres, présents dans ce milieu et dont certains, comme le radical OH, jouent le rôle de "détergents" (13).

1.4. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES DES HCFC ET DES HFC

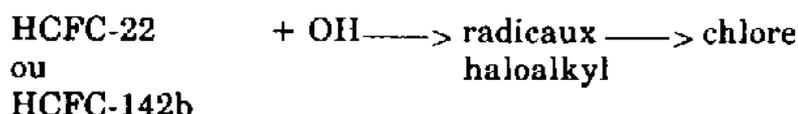
Les HCFC et les HFC présentent une différence fondamentale par rapport aux CFC, différence qui justifie qu'on les propose comme substitués à ces derniers, pour résoudre le problème de la dégradation de la couche d'ozone.

Les HCFC et les HFC, sont en effet attaqués dans la troposphère par différents constituants de ce milieu. Contrairement aux CFC, ils ne parviennent pas en l'état dans la stratosphère. La raison essentielle en est que la présence d'un atome d'hydrogène sur leur

chaîne carbonée les rend fragiles aux attaques des radicaux hydroxyle OH.

Les constantes de réaction des différents substitués avec OH et avec l'oxygène atomique ont été calculées par deux laboratoires nord-américains subventionnés par l'AFEAS. Toutefois, les réactions subséquentes qui affectent les produits de cette dégradation initiale sont encore largement inconnues.

Les enseignements de la chimie en phase gazeuse laissent penser que l'on aurait la chaîne suivante pour les HCFC-22 et 142b :



avec libération immédiate de l'ensemble des atomes de chlore initialement présents, dès l'émission du HCFC dans la troposphère, le chlore étant ensuite transformé en HCl, avant d'avoir atteint la stratosphère.

En revanche, les HCFC-123 ($\text{CHCl}_2 - \text{CF}_3$) et 141b ($\text{CH}_3 - \text{CCl}_2\text{F}$) ne perdraient immédiatement dans la troposphère que l'un de leurs deux atomes de chlore, le deuxième étant prisonnier d'espèces à durée de vie plus longue comme CF_3CClO ou CClFO . En tout état de cause, les incertitudes sur les durées de vie des HCFC semblent importantes aux experts commissionnés par l'AFEAS (8) : elles seraient de $\pm 50\%$ environ pour les HCFC ayant des durées de vie comprises entre un et trente ans.

Plusieurs conclusions sont à tirer de ces premières études : la première est que la chimie des produits intermédiaires de dégradation des HCFC doit être étudiée dans le détail, la seconde est qu'il doit en être de même pour les effets sur la troposphère de l'émission de chlore réalisée indirectement à partir de ces composés intermédiaires.

1.5. LES HCFC ET LES HFC NETTEMENT MOINS DANGEREUX QUE LES CFC POUR L'OZONE.

Dans l'étude des phénomènes de la destruction de l'ozone, l'on sait, en outre, que la durée de vie des composés chimiques susceptibles de jouer le rôle de catalyseur de cette destruction est essentielle.

En combinant l'ensemble de ces données - chimie, transports verticaux et longitudinaux, influence de l'altitude - et donc en faisant des hypothèses sur les mécanismes réactionnels et les mécanismes de transport, il est possible de calculer l'ODP de chaque composé,

grandeur représentative de l'effet relatif de celui-ci, sur l'ozone stratosphérique.

Les résultats publiés par l'AFEAS sont clairs à cet égard (11).

Le pouvoir destructeur de l'ozone - ODP (Ozone Depletion Potential) - des HCFC et des HFC est en l'état actuel des connaissances largement inférieur à celui des CFC, et ceci que l'on utilise pour le calcul des ODP des modèles à une ou à deux dimensions.

Tableau 29 : ODP des CFC, HCFC et des HFC (11)

ODP	ODP calculés avec des modèles 1 dimension (1)	ODP calculés avec des modèles 2 dimensions (2)
I CFC-11	1,0	1,0
CFC-12	0,9-1,0	0,9
CFC-113	0,8-0,9	0,8-0,9
CFC-114	0,6-0,8	0,6-0,8
CFC-115	0,4-0,5	0,3-0,4
II HCFC-22	0,04-0,05	0,04-0,06
HCFC-123	0,013-0,016	0,013-0,022
HCFC-124	0,016-0,018	0,017-0,024
HCFC-141b	0,07-0,08	0,09-0,11
HCFC-142b	0,05-0,06	0,05-0,06
III HFC-125	0	0
HFC-134a	0	0
HFC-1152a	0	0
IV CCl ₄	1,0-1,2	1,0-1,2
CH ₃ CCl ₃	0,10-0,12	0,13-0,16

(1) Modèles Atmospheric and Environmental Research, Inc. (AER), Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) et DUPONT

(2) Modèles AER, LLNL, University of Oxford et DUPONT

Le tableau 29 est à la base des justifications avancées pour promouvoir l'utilisation des HCFC et des HFC à l'avenir.

Il appelle des commentaires importants :

- les différents CFC, HCFC et HFC sont regroupés par catégories suivant l'ordre de grandeur de leur ODP (Ozone Depletion Potential) ; en raison de leur formule chimique qui ne comprend pas de chlore, les HFC ont un ODP nul ; les CFC ont un ODP élevé, celui du CFC-11 étant pris par convention comme l'unité ; par ailleurs, on a fait figurer en IV deux composés qui ne sont pas à proprement parler des

CFC mais qui exercent aussi un effet destructeur sur la couche d'ozone : il s'agit du tétrachlorure de carbone (CCl_4), aussi nocif que le CFC-11 et du méthylchloroforme (CHCCl_3) qui l'est également, bien que dans de moindres proportions ;

- l'effet de chacun des HCFC sur la couche d'ozone doit bien sûr être calculé en tenant compte de son ODP et des quantités émises dans l'atmosphère ;
- les HCFC présentent des ODP beaucoup plus faibles que les CFC. D'après les résultats des calculs, le HCFC 141b, qui présente l'ODP le plus élevé est dix fois moins nocif que le CFC-11.;
- on constate que les résultats donnés par les modèles à deux dimensions (distribution de l'ozone en fonction de l'altitude et de la latitude à plusieurs dates) sont peu différents de ceux des modèles plus anciens à une dimension (évolution de la colonne d'ozone en fonction du temps).;
- il importe toutefois de noter que les valeurs présentées ci-dessus sont calculées à partir d'équations chimiques bien précises et d'hypothèses sur les transports atmosphériques verticaux ou longitudinaux.;
- ainsi que le soulignent les experts qui ont travaillé pour l'AFEAS, des incertitudes existent sur les valeurs des ODP, qui résultent elles-mêmes d'incertitudes sur les réactions chimiques et sur la dynamique atmosphérique.
- une autre source majeure d'incertitudes provient des phénomènes de chimie hétérogène qui interviennent aux pôles pendant le printemps.

Il faut souligner que la chimie hétérogène est décrite par la plupart des experts scientifiques comme jouant un rôle capital dans la destruction de l'ozone notamment au-dessus de l'Antarctique.

Or, aucun des modèles permettant de calculer les ODP ne prend en compte, pour l'instant et en raison des difficultés rencontrées pour les modéliser, les phénomènes de chimie hétérogène.

Il est à cet égard très vraisemblable que les composés chimiques caractérisés par un ODP croissant avec la latitude se verraient affecter un ODP global plus important.

De la même manière, le renforcement de la dynamique atmosphérique aux pôles, soit au niveau des phénomènes naturels, soit au niveau d'une plus grande fidélité des modèles, conduirait à une augmentation des ODP.

Ainsi apparaissent les termes du débat relatifs aux HCFC et aux HFC.

Pour les uns, ces substituts sont bien moins dangereux pour la couche d'ozone que les CFC. Pour les autres, cette assertion repose sur des hypothèses et des méthodes qu'on ne peut considérer comme définitives.

Certains experts ⁽¹⁴⁾ pensent néanmoins que les ODP incluant les mécanismes de chimie hétérogène et de dynamique atmosphérique de l'Antarctique et de l'Arctique devraient être certes différents de ceux actuellement calculés mais ne le seraient que peu.

Ces nouveaux ODP diffèreraient des actuels d'un facteur d'environ 1 à 3. Il serait, malgré tout, indispensable de passer aux HCFC en remplacement des CFC.

En tout état de cause, les spécialistes de la chimie atmosphérique hétérogène de l'ozone militent pour l'introduction et l'utilisation d'un nouveau concept, celui de CLP (Chlorine Loading Potential).

Le CLP d'un composé chimique représente la quantité relative de chlore que ce gaz peut introduire en supplément dans la stratosphère. Comme pour l'ODP, on calcule les CLP de chaque composé par référence au CFC-11.

Le tableau 30 montre que, lorsque l'on utilise la notion de CLP au lieu de celle d'ODP, l'affirmation selon laquelle les HCFC représentent un progrès par rapport aux CFC vis-à-vis de la protection de la couche d'ozone, reste fondée.

Tableau 30 : Charge en chlore ou chlorine loading potentials des CFC, HCFC et HFC (1)

CLP	Modèle AER (1)	Modèle LLNL(2)	Modèle Oslo (3)	Modèle Dupont (4)
I CFC-11	1	1	1	1
CFC-12	1,531	1,465	1,325	1,939
CFC-113		1,110	1,234	
CFC-114		2,022	2,108	
CFC-115	2,517	2,232	2,579	
II HCFC-22	0,215	0,171	0,152	0,197
HCFC-123	0,025	0,018	0,017	0,022
HCFC-124	0,058	0,045	0,041	0,052
HCFC-141b	0,148	0,114	0,104	0,132
HCFC-142b	0,219	0,180	0,159	0,202
III HFC-125	0	0	0	0
HFC-134a	0	0	0	0
HFC-1152a	0	0	0	0
IV CCl ₄	1,013	1,077	1,036	1,031
CH ₃ CCl ₃	0,138	0,124	0,108	0,140

(1) Atmospheric and Environmental Research Inc., Etats-Unis

(2) Lawrence Livermore National Laboratory, Etats-Unis

(3) Institute for Geophysics, University of Oslo

(4) Du Pont de Nemours & Company

Le tableau 31 donne, par ailleurs, les valeurs des ODP pour les halons citées par le PNUE, valeurs qui ne sont généralement pas discutées et conduisent à la nécessité d'en restreindre sévèrement les usages.

**Tableau 31 : ODP des halons
(2)**

Halon	ODP
II 1211	3
II 2402	6

1.6. UNE CONTRIBUTION A L'EFFET DE SERRE PLUS FAIBLE QUE CELLE DES CFC MAIS NON NULLE

Il a été indiqué plus haut que les HCFC, les HFC comme les CFC absorbent les rayonnements infra-rouges dans la "fenêtre atmosphérique", c'est-à-dire pour des longueurs d'onde comprises entre 8 et 12 µm.

Toutefois, l'influence de ces composés dépend bien sûr de leurs quantités, mais aussi de leur durée de vie.

Différents travaux ont été menés, d'une part, pour mesurer l'absorption de ces composés et, d'autre part, pour calculer les valeurs d'un indicateur de synthèse appelé Global Warming Potential (GWP).

Le tableau 32 présente les valeurs de GWP des CFC, HCFC et HFC calculées pour l'AFEAS (11) à partir des modèles AER et DUPONT, sur la base de durées de vie de référence.

Tableau 32 : GWP des CFC, HCFC et HFC (11)

	Durée de vie de référence (années)	GWP AER (1)	GWP DUPONT (2)
I CFC-11	60	1	1
CFC-12	120	3,4	2,8
CFC-113	90	1,4	1,4
CFC-114	200	4,1	3,7
CFC-115	400	7,5	76
II HCFC-22	15,30	0,37	0,34
HCFC-123	1,6	0,020	0,017
HCFC-124	6,6	0,10	0,92
HCFC-141b	7,8	0,097	0,087
HCFC-142b	19,1	0,39	0,34
III HFC-125	28,1	0,65	0,51
HFC-134a	15,5	,29	0,25
HFC-1152a	1,7	0,33	0,026
IV CCl ₄	50	0,34	0,35
CH ₃ CCl ₃	6,3	0,022	0,026

(1) Modèle Atmospheric and Environmental Research.

(2) Modèle DUPONT.

Il apparaît clairement à la lecture de ce tableau que le remplacement des CFC par les HCFC entraîne une diminution de la contribution à l'effet de serre des produits considérés.

Une autre remarque doit être faite : l'abandon des HCFC au profit des HFC, s'il supprimerait toute nouvelle addition de chlore et entraînerait donc une amélioration sensible à court terme et définitive à long terme, n'aurait pas un effet radical du même type en ce qui concerne l'effet de serre.

Les données ci-dessus doivent toutefois être replacées dans leur contexte. Elles résultent elles aussi d'hypothèses sur les réactions chimiques et sur la dynamique atmosphérique, hypothèses qui ont des conséquences majeures sur les durées de vie et donc sur les contributions respectives à l'effet de serre.

Il paraît, en définitive, nécessaire de poursuivre les recherches sur les mécanismes de dégradation des HCFC et HFC dans la troposphère pour être en mesure d'aboutir à des conclusions définitives sur les contributions de ces composés à l'effet de serre.

1.7. LES TESTS TOXICOLOGIQUES

Ainsi qu'il a été dit plus haut, des programmes d'étude de la toxicité des HCFC et des HFC sont actuellement en cours.

Les HCFC-22 et 142-b qui sont à l'heure actuelle des produits commercialisés, ont passé sans encombre les tests de toxicologie.

Le tableau 33 présente l'état d'avancement des PAFT (Program for Alternative Fluorocarbon Toxicity Testing) pour d'autres HCFC et HFC.

Tableau 33 : Etat d'avancement des études de toxicologie (15)

Produit	Programme	Etape intermédiaire	Résultats définitifs
HCFC-123	PAFT-1	Essais d'application en laboratoire	1993 / 1994
HFC-134a HCFC-141b	PAFT-1 PAFT-2	Utilisation actuelle en milieu industriel pour le développement d'application	1992/ 1993
HFC-124 HFC-125	PAFT-3 PAFT 3	Etudes lancées en 1988	1994 / 1995

Ces études sont nécessairement complexes en ce que les protocoles de test doivent étudier aussi bien les effets d'expositions massives pendant des durées réduites que les effets d'expositions réduites pendant des durées longues.

En outre, il semble bien que l'étude des HCFC et des HFC ne suffise pas et doive être complétée par celle de leurs produits de dégradation dans l'environnement de travail ou dans la troposphère.

Parmi ces produits de dégradation figurent l'acide trifluoroacétique, des acides mixtes fluorochloroacétiques et l'acide fluorhydrique. Pour certains de ces produits (acides mixtes fluorochloroacétiques), aucune donnée de toxicologie n'est disponible. Pour d'autres, par exemple, l'acide trifluoroacétique, l'on a déjà testé certains effets comme ceux sur le foie mais des données sur leurs propriétés carcinogènes éventuelles sont manquantes.

Les études de toxicologie sur les produits de dégradation des HCFC et des HFC ne sont pas moins urgentes et devraient être lancées sans attendre.

1.8. DES COÛTS DE PRODUCTION ÉLEVÉS ET DES CAPACITÉS DE PRODUCTION ENCORE LIMITÉES

Ainsi qu'il a été dit plus haut, la fabrication des CFC est relativement simple, utilise des techniques de génie chimique largement répandues et produit des composés à des coûts peu élevés (10 F à 20 F le kg pour les CFC-11 et 12). De surcroît, une même unité de production peut, dans certains cas, être utilisée alternativement pour la fabrication des CFC-11, 12 ou HCFC-22.

L'ensemble de ces avantages ne sont pas réunis pour la production des HCFC et des HFC.

Leur fabrication semble beaucoup plus complexe. Différents procédés existent pour accéder à un même produit final. Ainsi, pour la fabrication du HFC-134a, ATOCHEM signale l'existence de plusieurs voies d'accès (15). Il est possible en premier lieu d'utiliser le trichoréthylène comme produit de départ et soit de parvenir directement au HFC-134a soit de passer par l'intermédiaire du HCFC-133a (CH_2ClCF_3).

Il est également possible de partir du perchloréthylène. Dans ce cas, différents chemins de réaction sont également possibles, avec comme produits intermédiaires les HCFC-123 et 124 et le HFC-125. Une autre voie consiste à utiliser le méthylchloroforme

(trichloréthane 1.1.1), le HCFC-142b étant obtenu dans une étape intermédiaire.

Rappelons que les deux HCFC déjà commercialisés les HCFC-22 et 142b, sont obtenus de la manière suivante :

- par fluoration du chloroforme pour le HCFC-22 ;
- par fluoration du méthylchloroforme (trichloréthane 1.1.1) pour le HCFC- 142b.

Les producteurs de CFC dans leur ensemble, soulignent le fait que les procédés de fabrication des HCFC et des HFC sont beaucoup plus délicats que ceux des CFC. Les étapes de fabrication sont également plus nombreuses, ce qui impliquera des unités de fabrication plus volumineuses et plus difficiles à gérer à tonnage identique.

Il est, par ailleurs, acquis que les anciennes unités de production des CFC ne pourront être utilisées pour la production de HCFC ou de HFC.

ATOCHEM estime que la construction et la mise en service d'une unité de 10.000 tonnes par an de production d'HCFC et d'HFC représentera un investissement compris entre 150 et 300 millions de F⁽¹⁶⁾.

Toutes les prévisions des producteurs concordent sur le caractère inéluctable de prix de vente des HCFC et des HFC supérieurs à ceux des CFC.

Il est clair que les coûts de production pousseront les prix vers le haut, avant que l'effet d'expérience n'entre en jeu.

Certains producteurs ⁽¹⁷⁾ indiquent clairement que, dans les applications qui leur resteront, les HCFC et les HFC auront une valeur d'usage telle que l'on pourrait atteindre des prix de vente de 10 dollars / lb pour ces derniers contre 1 dollar / lb pour les CFC.

Le tableau 34 ci-après présente une estimation du calendrier de mise en service des unités de production consacrées aux HCFC et aux CFC ⁽¹⁷⁾ et ⁽¹⁸⁾.

Tableau 34 : Estimation du calendrier de production des HCFC et des HFC (17) et (18)

Entreprise	Produit	Date d'entrée en service des unités de production	Capacités de production estimées	Localisation des unités de production
DUPONT	HCFC-22	déjà produit		
	HCFC-123	mi-1991		Corpus Christi (Texas)
	HCF-134a	mi-1991	2000 t (1991)	Corpus Christi (Texas)
ATOCHEM	HCFC-22	déjà produit	≈ 60.000 t (1990)	Pierre-Bénite, Espagne, États-Unis, Australie, Venezuela
	HCFC-141 b	début 1991 fin 1992	40.000 t (1991) ⁽¹⁾	États-Unis Pierre-Bénite
	HCFC-142 b	déjà produit	40.000 t (1991) ⁽¹⁾	Pierre-Bénite, États-Unis
	HFC-134 a	début 1992	2000 t (1992) ⁽²⁾	Pierre-Bénite
ICI	HCFC-22	déjà produit		
	HFC-134 a	début 1991	8000 t (1991) 15.000 t (1993)	Runcorn (G-B) Louisiane (États-Unis)

(1) Le nouvel atelier de Pierre-Bénite consacré à la production combinée de HCFC-141 b et de HCFC-142 b aura une capacité totale de 40.000 tonnes/an

(2) La capacité de production du nouvel atelier sera de 9000-10 000 tonnes/an en 1995

1.9. LE REMODELAGE INÉVITABLE DE L'APPAREIL DE PRODUCTION MONDIAL.

Les enjeux économiques de la reconversion CFC/HCFC, HFC, sont à l'évidence très risqués pour les producteurs.

Les tests de toxicologie ne sont pas achevés. L'adaptation des technologies d'aval n'est pas encore réalisée dans le détail. Des produits autres que les HCFC et les HFC viendront aussi prendre une part du marché des CFC. Des technologies alternatives viendront prendre le relais de certaines des technologies actuelles utilisant les CFC.

Mais pour autant, il est nécessaire d'anticiper sur ces évolutions pour lancer la construction d'unités de production, de manière à être présent sur le marché dès que la demande s'exprimera.

1.9.1. Des investissements lourds et risqués

L'ampleur des investissements à pratiquer pour répondre au choc externe que constitue la substitution des HCFC et HFC aux actuels CFC et les risques qui s'attachent aux choix techniques à effectuer dès aujourd'hui, entraîneront vraisemblablement des bouleversements dans l'industrie mondiale.

DUPONT de Nemours présente les évaluations suivantes pour les dépenses liées à la substitution (17) :

- 100 millions de dollars de dépenses cumulées pour la Recherche et le Développement (jusqu'en 1989 inclus) ;
- d'ores et déjà 60 millions de dollars d'investissements en équipements de production sont autorisés et lancés par la société ;
- au total les dépenses déjà effectuées par DUPONT sont estimées comme devant atteindre 250 millions de dollars à la fin 1990, ce qui laisse augurer d'une accélération importante des dépenses de R&D et d'investissement de production en 1990 ;
- le coût total de la restructuration de l'offre pour l'ensemble du passage des CFC aux HCFC/HFC est estimé par DUPONT comme devant atteindre le milliard de dollars pour la compagnie elle-même.

ATOCHEM présente les évaluations suivantes :

- dépenses annuelles moyennes de 100 millions de F pour la R&D incluant les tests de toxicologie, les mises au point de procédés et la mise en place d'unités pilotes ;
- 150 millions de F déjà dépensés pour le HCFC-141b ;
- 300 millions de F engagés pour le HFC-134a démarrant début 1992 ;

- investissements décidés : 500 millions de F pour une unité de 40.000 t / an produisant les HCFC-141b / 142b pour la fin 1991 ;
- 300 millions décidés pour les unités 141b / 142b nord-américaines.

Le tableau 35 présente une tentative de comparaison des efforts engagés par l'ensemble des producteurs de CFC pour la substitution, selon (3).

Tableau 35 : Tentative de comparaison des efforts engagés par les producteurs de CFC en vue de l'introduction des HCFC et des HFC (3)

Substituts Producteurs	HCFC 22	HCFC 123	HCFC 124	HCFC 141b	HCFC 142b	HFC 134a	HFC 152a	DME
DUPONT de NEMOURS	*Produit à Dordrecht (F)	* Pilote à Wilmington (USA) * Produit fin 91 dans l'Ontario	*Pilote dans New Jersey *Mélange 152a,22	Produit à Montagne (MI) USA fin 90		Produit au Texas (25M\$)	* Pilote * Mélanges avec 124,22	*Vendu sous marque DYMEL (GB) * Produit à Humberstone (GB)
ATOCHEM + RACON + PENWALT	Produit : 60 000 t/an Atochem (F) Escon (USA) - vente - PTFE	Recherche JV Allied		JV Allied Fin 91 : 40 mt/an à Pierre Bénite (500MF) Penwalt Produit New Jersey		Produira fin 92 (300 MF) Pilote JV Allied		Arrêt
ALLIED SIGNAL	Produit	Recherche JV Atochem + Brevet		Pilote Produira fin 91 en Louisiane	Recherche JV Atochem	Recherche JV Atochem	Recherche	
ICI		Pilotes + Etudes sur mélanges	Pilote	Pilote + études sur mélanges		Produira fin 91 à Runcorn(GB - 54M\$) Produira fin 93 (100M\$) en Louisiane Pilotes		
HOECHST	Produit comme intermédiaire au PTFE	Pilote	Brevet			Produira mi 92 10mt/an (25M\$) Pilotes		
AKZO	Produit							Produit 25mt/an à Rotterdam
MONTEFLUOS	Produit	R&D		R&D	R&D	R&D		
KALI	Produit	JV ISC Chemical R&D		JV ISC Chemicals Produit	Produit Produira fin 90 à Taveaux (F)	JV ISC Chemicals Recherche		
ASAHI	Produit			Produit	Produit			
SHOWA DENKO	Produit					Produit 2 000t		

En l'état actuel des informations disponibles, les remarques suivantes peuvent être faites :

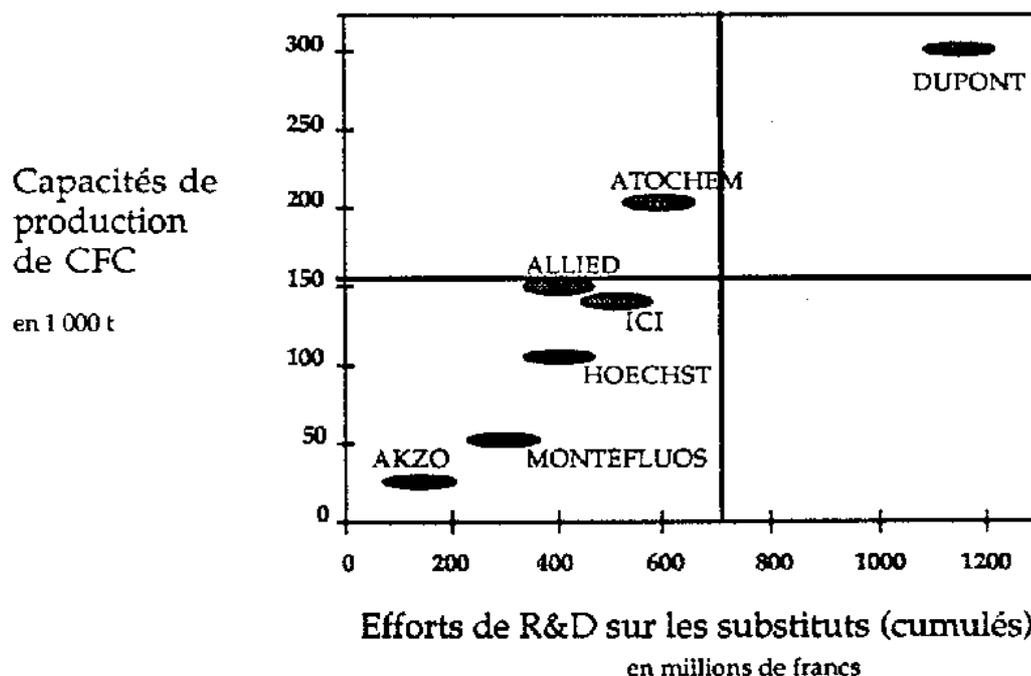
- DUPONT, premier producteur mondial de CFC avec le quart du marché, semble déterminé à être présent dans la production de chacun des substituts ; le HCFC-123 (conditionnement d'air) et le HFC-134 (réfrigération) ainsi que les mélanges semblent toutefois constituer une offre particulièrement importante pour DUPONT.
- ATOCHEM semble axer ses efforts sur la consolidation de ses positions pour le HCFC-22, sur les HCFC-141b et HCFC-142b pour lesquels il dispose d'une exposition forte, et, avec un léger temps de retard sur DUPONT, sur le HFC-134a
- Allied-Signal pratique une politique systématique d'alliances ou de joint-ventures pour sa Recherche et Développement
- ICI et Hoechst semblent avoir opté pour une certaine spécialisation, à tout le moins pour l'actuelle période de remodelage de la production
- AKZO et Montefluos semblent pratiquer un certain attentisme
- au niveau des produits, le HFC-134a semble réunir les efforts de tous les producteurs actuels de CFC.

1.9.2. Les restructurations à venir

En utilisant les données publiées sur les capacités de production des différents fabricants de CFC ainsi que celles sur leurs efforts de Recherche et Développement, on peut tenter d'estimer les chances de survie des différents producteurs au cours de la période de restructuration qui va s'engager.

Le graphique 12 met en évidence la position précaire de AKZO et MONTEFLUOS et le nombre élevé de producteurs ayant des positions intermédiaires (HOECHST, ICI et ALLIED SIGNAL).

Graphique 12 : Efforts de recherche & développement et taille des producteurs de CFC
- Estimations fin 1989 - (3)



Dans le remodelage de l'appareil de production mondiale de CFC qui devrait intervenir, selon J.-P. DÉTRIE (3), trois éléments apparaissent en définitive discriminants pour la situation concurrentielle des entreprises du secteur :

- l'effort financier à réaliser pour la recherche et le développement : le coût global de la mise au point d'un substitut HCFC ou HFC est actuellement estimé à 400 millions de F.;
- le coût de la reconversion à supporter, en même temps que les investissements nouveaux à réaliser pour répondre aux attentes des marchés.;
- le niveau et la date de lancement des recherches consacrées aux substituts : vu les délais nécessaires pour la mise au point de pilotes et le lancement commercial d'un produit, tout retard technologique risque d'être coûteux, sinon fatal.

Il faut, à cet égard, distinguer le cas des producteurs de grande taille de celui des producteurs de taille réduite.

Si le producteur est de grande taille et intégré verticalement, il ne souhaitera pas dépendre d'un de ses concurrents et orientera ses recherches en fonction de ses besoins. S'il est de plus petite taille, sa capacité de Recherche et Développement déterminera son maintien ou sa sortie de l'activité.

Deux tendances semblent déjà apparaître selon J.-P. DETRIE, pour les firmes chimiques de taille globale importante : d'une part, le rachat de producteurs de CFC de taille moyenne (Racon et Pennwalt pour ATOCHEM, ISC Chemicals filiale de RTZ Chemicals par Rhône-Poulenc) et, d'autre part, le redéploiement industriel (AKZO se renforce sur le Diméthyléther-propulseur pour aérosols).

Une stratégie complémentaire est celle des alliances dans le domaine de la Recherche et du Développement afin d'en réduire les coûts. Les programmes de recherche AFEAS et PAFT sont des exemples de coopération généralisée à la quasi-totalité des producteurs. D'autres modalités de coopération bilatérale sont également possibles.

Ainsi ATOCHEM coopère avec ALLIED-SIGNAL (Etats-Unis) pour la recherche sur les HCFC-123, HCFC -141b et le HFC-134a.

Dans ce type d'accords, la coopération concerne la recherche et le développement mais s'arrête au pilote industriel, les deux partenaires gardant leur totale indépendance pour la production et la commercialisation des produits finis.

D'autres accords de recherche ont également été signés entre SOLVAY KALICHEMIE et ISC Chemicals.

Malgré ces accords de partage des coûts de recherche et de développement, il semble bien que la transition industrielle des CFC vers les HCFC/HFC excède les moyens des plus petits des producteurs intermédiaires. Selon J.-P. DETRIE (3) : « plusieurs entreprises devraient sortir à terme du secteur des CFC et des HCFC et des HCFC/HFC. »

Grâce à sa puissance actuelle, à sa stratégie dynamique, et à sa place de second producteur mondial sur le nouveau marché des HCFC/HFC, ATOCHEM est bien placé pour jouer un rôle majeur dans ce défi. Sans doute lui faudra-t-il pouvoir, au moment opportun, continuer sa politique de croissance externe par rationalisation avec des entreprises qui se désengageront du secteur.

La bonne santé de l'entreprise et la puissance financière de sa maison-mère, ELF-AQUITAINE, lui en fourniront, on peut l'espérer, les moyens. Toutefois, la réglementation internationale qui restreint les rationalisations entre pays de la CEE alors qu'elle est libre entre USA et Canada par exemple, devra évoluer pour ne pas pénaliser les industriels européens.

1.9.3. Vers une offensive japonaise ?

L'attitude des producteurs européens face aux restructurations probables des prochaines années n'est pas un sujet sans importance.

La chimie fine est l'un des secteurs où l'avance européenne, par rapport au reste du monde, est importante. Les positions européennes sont en particulier très fortes dans ce domaine par rapport à celles du Japon.

Il n'est pas inintéressant toutefois de constater (cf. tableau 36) que les industriels japonais ne sont pas inactifs dans la production des substituts des CFC.

Tableau 36 : État de la production de substituts au Japon (1990) (3)

	123	141b	142b	134a	225
SHOWA-DENKO 1200 t/an				Produit 2000 t	
DAIKIN 30 000 t/an			Produit		
ASAHI CHEMICALS 60 000 t/an	en construction 500/600 t	Produit	Produit		Produit

Les producteurs européens et en particulier ATOCHEM devront sans doute faire face dans un avenir proche, aux intentions prévisibles de producteurs japonais de s'implanter en Europe. A cet égard, des entreprises comme ASAHI-CHEMICALS (solvants) ou DAIKIN (producteur de climatiseurs intégré vers l'amont) pourraient être des acquéreurs potentiels de producteurs contraints au redéploiement.

2. LES PRODUITS DE REMPLACEMENT ET LES TECHNOLOGIES ALTERNATIVES : DES SOLUTIONS COMPLÉMENTAIRES

Pour répondre au défi de la réduction d'emploi des CFC, voire à celui de leur abandon, l'utilisation de produits de remplacement et de technologies alternatives constitue, on l'a vu, une voie complémentaire de celui des HCFC/HFC. On estime que cette solution pourrait représenter 32 % du marché des CFC correspondant aux applications actuelles.

2.1. DÉFINITIONS

Les produits de remplacement sont les produits choisis hors de la famille chimique des CFC, HCFC et HFC.

Certains, déjà utilisés dans le passé, ont été abandonnés au profit des CFC, en raison des avantages présentés par ces derniers.

Ils retrouvent ou peuvent retrouver une nouvelle compétitivité en raison des éléments suivants :

- les contraintes de réduction d'emploi des CFC ;
- la non-disponibilité des HCFC et HFC ;
- le coût prévisible des HCFC et HFC dans la phase de leur mise au point.

Les technologies alternatives sont les procédés actuellement connus, en cours de mise au point ou attendus pour un avenir plus ou moins proche, qui peuvent permettre d'atteindre un même service que les technologies utilisant les CFC ou les HCFC/HFC.

Le rôle des produits de remplacement et des technologies alternatives sera détaillé dans la troisième partie pour chacune des applications des CFC, avec leur calendrier d'introduction, en privilégiant le cas de l'industrie française.

Il paraît néanmoins nécessaire d'en discuter la pertinence sur un plan général, en les comparant aux possibilités offertes par les HCFC/HFC sur la base des principales conclusions des rapports sur les options techniques du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (19).

2.2. LE CAS DES AÉROSOLS.

Les solutions de remplacement des CFC sont nombreuses pour les aérosols d'usage courant (19).

Parmi les produits de remplacement, l'on peut citer :

- le propane et le butane qui présentent l'inconvénient d'être inflammables (gaz propulseur) ;
- le diméthyléther qui présente le même inconvénient (gaz propulseur) ;
- le gaz carbonique comprimé (gaz propulseur) ;
- le méthylchloroforme et le chlorure de méthylène peuvent servir de solvants, en étant additionnés au gaz propulseur.

Les technologies alternatives sont les suivantes :

- dispositifs manuels divers pour produire des sprays (atomiseurs à pompe mécanique) ;
- abandon des sprays et recours à d'autres types de présentations (pour les cosmétiques : solides, bâtonnets, billes, etc...).

D'après les experts du PNUE, il existe peu de solutions en l'état actuel des technologies en dehors des substituts des CFC, pour les produits médicaux, notamment pour les produits inhalés, pour lesquels la non-toxicité du gaz propulseur est particulièrement précieuse.

La consommation de CFC pour des aérosols à usages médicaux a été estimée à 10-12.000 tonnes, dont 3-4.000 tonnes pour les produits médicaux inhalés.

Globalement, à la fin du siècle, les produits de remplacement et les technologies alternatives pour les aérosols devraient laisser aux HCFC un marché mondial d'environ 25.000 tonnes par an. Les substituts concernés seraient les HCFC-22,123,124 et le HFC-134a.

Un autre marché actuel pour les CFC est constitué par les produits de stérilisation. Le CFC-12 est en effet mélangé au produit de stérilisation le plus répandu - l'oxyde d'éthylène -, afin de réduire le caractère inflammable et explosif de ce composé. Les quantités totales de CFC-12 actuellement utilisées pour la fabrication de mélanges stérilisants à base d'oxyde d'éthylène sont relativement importantes

(environ 20-25000 tonnes par an). Les solutions de remplacement sont les suivantes :

- utilisation de l'oxyde d'éthylène pur moyennant des précautions d'utilisation ;
- utilisation du formaldéhyde ;
- utilisation de mélanges CO₂ / oxyde d'éthylène ;
- utilisation d'un HCFC comme gaz de mélange.

2.3. LE CAS DES FLUIDES FRIGORIGÈNES

Le domaine du froid est probablement celui où l'apport des CFC a été le plus important et où les difficultés d'un éventuel abandon de ce type de produit sont les plus grandes.

Les dispositifs commercialisés de production de froid reposent à l'heure actuelle dans la quasi-totalité des cas, sur le cycle à compression (condensation/évaporation). La base de connaissances technologiques développées pour ces techniques et les appareils industriels de production est très importante.

Tout l'effort des producteurs de CFC est actuellement de mettre au point des HCFC et des HFC dont les propriétés et les conditions d'emploi soient aussi voisines que possible de celles des CFC.

Il n'en demeure pas moins que, dans certaines conditions d'applications, d'autres fluides frigorigènes et des techniques alternatives ont été utilisés et le sont encore dans certains cas.

2.3.1. Peu de fluides de remplacement compétitifs pour les cycles à compression (condensation / évaporation).

De nombreux composés possèdent en théorie les propriétés thermodynamiques nécessaires à leur emploi comme fluide frigorigène dans des installations à compression. Ainsi, dans le passé l'anhydride sulfureux SO₂ (Température d'ébullition à 1 atmosphère = - 10 °C ; Température critique : 158 °C) a pu être utilisé, de même que l'anhydride carbonique CO₂ (Température d'ébullition à 1 atmosphère = - 78 °C ; Température critique = + 31 °C).

En réalité, de tous les fluides connus et expérimentés dans le passé, seul l'ammoniac NH₃ (Température d'ébullition à l'atmosphère = - 33,3 °C ; Température critique = + 132 °C) a conservé une place

notable dans les applications de grande taille, du type chambres froides de grande capacité et pourrait jouer un rôle important à l'avenir.

L'ammoniac a été supplanté dans les installations commerciales et industrielles, en raison de sa toxicité et de l'effet de panique que créent les émissions résultant de fuites de ce composé.

Il apparaît aujourd'hui (20) que l'ammoniac pourrait redevenir compétitif si le schéma des installations était modifié. Il s'agirait de rassembler les compresseurs et les échangeurs dans les locaux isolés, avec mise en place, entre ce local et les armoires à froid, de circuits frigorigènes fonctionnant avec des fluides frigoporteurs non dangereux.

Or, ces fluides existent comme l'eau additionnée de propylène glycols ou le chlorure de calcium CaCl_2 . Il n'y a donc pas d'obstacle technique majeur à ce type de conceptions.

Signalons enfin une "curiosité" technique. Depuis quelques semaines, le South Bank Polytechnic Institute of London teste les rendements énergétiques et frigorifiques d'un réfrigérateur ménager du commerce dans lequel le fluide frigorigène initial (CFC-12) a été purement et simplement remplacé par du pentane, sans aucune modification technique de l'appareil. Les premiers résultats seraient excellents, les rendements atteints étant supérieurs à ceux observés initialement avec le CFC-12. La quantité de pentane injectée dans le circuit de réfrigération serait de l'ordre de 100g (20). L'inflammabilité du pentane est bien connue mais la quantité présente dans le réfrigérateur étant faible, cette voie semble mériter d'être étudiée plus avant.

2.3.2. Les technologies fondées sur l'effet Peltier.

L'effet Peltier est d'une nature très particulière. Il consiste à appliquer une force électromotrice entre les deux soudures de deux baguettes ou de deux fils de métaux différents. L'une des soudures se réchauffe et l'autre se refroidit. Il s'agit de l'effet inverse de celui du thermocouple. Ce phénomène est plus accentué lorsque l'on emploie des métaux au caractère métallique réduit et plus encore si l'on recourt aux semi-conducteurs. Pour amplifier le phénomène, on peut utiliser de nombreux couples en série.

Il ne semble pas que des développements soient en cours sur cette technologie, compte tenu des coûts de fabrication des assemblages métalliques et de la nécessité de disposer d'une source d'électricité.

2.3.3. Les technologies fondées sur les cycles à absorption ou à adsorption

2.3.3.1. Principes techniques communs

Pour produire du froid, il faut réaliser un cycle thermodynamique dans lequel de la chaleur est enlevée à un corps et généralement restituée à un autre corps ou au milieu ambiant. Le cycle à compression (condensation / évaporation) est le plus fréquemment mis en oeuvre dans la pratique. Toutefois, d'autres possibilités techniques existent pour mettre en jeu le binôme condensation / évaporation.

Les technologies d'absorption ou d'adsorption constituent une voie pertinente pour s'affranchir de deux contraintes majeures de la compression : la présence de pièces en mouvement et la nécessité de produire de l'énergie mécanique.

2.3.3.2. Principe des cycles à absorption

Dans ce type de cycle, au lieu de dépenser du travail mécanique comme dans le cycle à compression, on dépense de la chaleur. Deux types de procédés à absorption existent : l'absorption liquide / gaz connues depuis longtemps et les nouveaux procédés solide / gaz.

Le cycle à absorption liquide / gaz fonctionne de la manière suivante : dans une chaudière, on réchauffe un mélange ou une solution de deux corps A et B, dont l'un - A - est beaucoup plus volatil que l'autre -B-. En élevant la température de la chaudière à un niveau compris entre les deux températures d'ébullition, on provoque l'évaporation du premier constituant A.

Avec une bonne composition du mélange, la pression de la vapeur produite est telle que le constituant A peut se condenser sur un condenseur. On fait passer ensuite le liquide A proche de son point d'ébullition dans un évaporateur où il enlève une certaine quantité de chaleur. La vapeur de A provenant de l'évaporateur est mise en contact avec le mélange résiduel initial dans un appareil appelé absorbeur : l'absorption de la vapeur de A par le mélange résiduel est accompagné d'un dégagement de chaleur ⁽⁶⁾.

Une machine à absorption fait intervenir plusieurs variables (composition du mélange, pression et température) et est généralement décrite comme plus souple que les machines frigorifiques à compression.

Les couples de substances destinés aux cycles à absorption doivent être tels que le composant le plus volatil ait les mêmes propriétés que les fluides frigorigènes utilisés dans les machines à compression. Il faut en outre que le couple soit chimiquement stable, que l'on ait une forte différence entre les températures d'ébullition des deux composants et qu'enfin, les solutions ne soient ni trop denses ni trop visqueuses pour éviter des pertes de charge trop élevées le long des conduits et pour ne pas ralentir les échanges thermiques. Le mélange doit également être exempt d'impuretés pour éviter la corrosion des matériaux du dispositif.

Le couple le plus fréquemment utilisé est le couple eau / ammoniac. L'on trouve également le couple eau / bromure de lithium.

Le cycle à absorption solide / gaz fonctionne sur des principes analogues. Une des difficultés importantes de ce procédé est celui du transfert de chaleur au sein du solide.

Une équipe de recherche française dirigée par le Professeur SPINNER, de l'Institut de Science et de Génie des Matériaux et Procédés (CNRS) de Font-Romeu, a développé une nouvelle approche où le solide (en l'occurrence du chlorure de calcium CaCl_2) est inclus dans une matrice de graphite (fourni par Le Carbone de Lorraine du groupe Péchiney). Dans ce cas le gaz utilisé est l'ammoniac, et l'on a formation, par réaction chimique, d'un complexe entre l'ammoniac et le chlorure de calcium (21).

Les systèmes à absorption solide / gaz fonctionnent eux aussi sans compresseur. Avec une seule réaction, on a un cycle alternatif de production de froid puis de chaleur et réciproquement. En couplant deux réacteurs, on parvient sans difficulté à un cycle continu.

2.3.3.3. Les cycles à adsorption

Les cycles à adsorption mettent en oeuvre un cycle évaporation/condensation lié à l'utilisation d'un adsorbent.

Les couples solide / gaz utilisés dans la pratique sont le plus souvent le couple charbon actif / méthanol et le couple zéolithe / eau (la zéolithe est un aluminosilicate synthétique).

La méthode de mise en oeuvre la plus simple est, dans le cas du méthanol, par exemple, intermittente, à deux phases successives.

Le dispositif matériel comprend deux circuits, l'un contenant un fluide caloporteur transitant par une source de chaleur, l'autre

contenant le fluide frigorigène (le méthanol). La première phase du cycle correspond à l'évaporation du méthanol liquide et donc à la production de froid, à l'issue de laquelle le méthanol est adsorbé par le charbon actif (la chaleur produite par l'adsorption est évacuée). La deuxième phase correspond à la désorption du méthanol (qui nécessite l'apport de chaleur) et à sa condensation (la chaleur de condensation est évacuée). Un système de vannes permet le recyclage du liquide condensé dans l'évaporateur.

Dans un système de ce type, le fonctionnement est discontinu.

Différentes mises en oeuvre du principe ci-dessus ont été faites dans la pratique.

On distingue (22) les systèmes à lit fixe et à température uniforme et les systèmes à lit fixe et à propagation d'onde de chaleur. Ces procédés sont à fonctionnement discontinu, néanmoins le couplage de deux adsorbants fonctionnant en déphasage permet d'aboutir à la production de froid (ou de chaleur) de façon quasicontinue. D'autres procédés dits à lit mobile et à fonctionnement continu permettent d'éviter les inconvénients des premiers systèmes.

2.3.3.4. Les systèmes mixtes absorption / adsorption

Les systèmes de ce type consistent en la double utilisation d'un système à absorption classique liquide/gaz et d'un système nouveau solide/gaz fonctionnant soit sur le principe d'absorption soit sur celui de l'adsorption.

2.3.3.5. Applications des différents procédés

Application des procédés à absorption liquide / gaz

Le procédé mettant en oeuvre un cycle d'absorption liquide / gaz est d'ores et déjà sélectionné dans les conditions suivantes :

- lorsque un silence absolu de l'installation est requis : réfrigérateurs de chambres d'hôtel, caves à vin pour appartement ;
- lorsque l'on ne dispose pas d'énergie électrique pour aisément utiliser un cycle de compression et qu'au contraire une source de chaleur est disponible : réfrigérateurs de camping, de bateau ; réfrigérateurs en zone rurale dépourvue de réseau électrique.

Les dispositifs à absorption présentent également un grand intérêt lorsque l'on peut ou veut utiliser une source de chaleur à basse température. On construit alors un dispositif à deux éléments : une pompe à chaleur qui permet de passer d'une chaleur à basse température à une chaleur à haute température, un réfrigérateur à absorption qui utilise cette source de chaleur à haute température pour produire du froid. Ces dispositifs permettent d'atteindre des rendements intéressants. Les réalisations pratiques mettant en oeuvre l'absorption existent, de même que les entreprises ayant développé ces techniques :

- Philips-Whirlpool (Pays-Bas / Etats-Unis) et Electrolux (Suède) disposent d'un quasi-monopole pour les réfrigérateurs domestiques à absorption (Philips-Whirlpool est le n° 1 mondial et Electrolux le n° 2 de la réfrigération domestique) ;

Ces réfrigérateurs présentent toutefois l'inconvénient d'être pour le moment coûteux : le marché estimé (20) est d'un million d'unités par an, soit une part encore négligeable du marché de la réfrigération ;

- la Suède a développé des dispositifs à absorption couplés à la récupération de chaleur des fumées industrielles ; l'absorption sert alors à condenser des vapeurs et notamment des vapeurs de solvants ;
- le Japon a systématiquement développé des systèmes de conditionnement d'air à absorption fonctionnant grâce à la récupération de chaleur en sortie de chaudières à déchets domestiques ou utilisant des brûleurs à gaz ; ces systèmes ont pour but d'alléger la demande d'électricité aux heures de pointe et d'éviter éventuellement le recours aux centrales électriques utilisées seulement aux heures de pointe ; selon F. MEUNIER (22), 6.000 unités de ce type auraient déjà été mises en service par les industriels japonais, dont 2.000 unités de grande puissance pour le conditionnement d'air industriel ; les ventes de ces dispositifs à absorption représenteraient environ 1 % du marché total de la réfrigération et des pompes à chaleur ;
- des essais de fonctionnement de réfrigérateurs à absorption utilisant l'énergie solaire (cellules photovoltaïques) ou le gaz naturel comme sources de chaleur et le mélange eau / ammoniac, sont en cours au Centre d'Energétique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (responsable scientifique : M. D. CLODIC). Un autre laboratoire, le Laboratoire de thermodynamique

de l'Ecole Nationale Supérieure des Industries chimiques de Nancy, dirigé par M. Pierre LE GOFF travaille dans le domaine des pompes à chaleur à absorption liquide / gaz.

Au total, les techniques de production de froid par absorption liquide / gaz, paraissent d'ores et déjà constituer une voie d'avenir pour la climatisation et pour la réfrigération, à condition de la coupler à des dispositifs du type des pompes à chaleur.

Application des procédés à absorption solide / gaz

Le cycle à absorption solide / gaz chlorure de calcium (CaCl_2) graphite / ammoniac présente par nature des avantages importants :

- aucune pièce en mouvement ;
- utilisation de source de chaleur au lieu d'énergie mécanique ;
- absence de CFC, HCFC ou HFC ;
- possibilité d'atteindre des températures très basses : -40°C ;
- possibilité d'atteindre des températures supérieures à 150°C ;
- possibilité de "stockage" de froid.

L'Institut de Science et de Génie des Matériaux et des Procédés (ISGMP - CNRS) à Font-Romeu, dont l'équipe thermodynamique est dirigée par M. B. SPINNER, est sans doute l'un des leaders de cette technologie, étant donné le nombre de brevets qu'elle a déposés avec ELF-Aquitaine qui assure une partie du financement de ses recherches.

Les perspectives tracées pour cette technologie par l'ISGMP et par ELF sont en pratique les suivantes (21) :

- pompes à chaleur et thermotransformateurs (élévation de température d'un fluide) (23) ;
- réfrigérateur pour le commerce (puissance comprise entre 500 W et 1,5 kW au lieu des 200-300 W et pour les réfrigérateurs domestiques) ;
- machines à froid pour l'industrie ;
- systèmes de transport pour surgelés (-28°C) ;

- climatisation pour matériel roulant (automobile ou transport ferroviaire) en utilisant une source chaude autonome (brûleur) ou de récupération (gaz d'échappement ou circuit de refroidissement moteur pour l'automobile) ; utilisation de la capacité de stockage de froid pour débiter la climatisation avant la mise en service, d'où la diminution de la taille du climatiseur ;
- climatisation à énergie solaire, en utilisant, pour améliorer les rendements, des tubes sous vide pour la captation de l'énergie solaire.

Cette technique a rencontré l'intérêt d'industriels français comme ELF qui finance les recherches de l'ISGMP, de PMI françaises innovantes, de Dornier (Groupe Daimler-Benz-RFA) et d'industriels coréens ou japonais.

Il semble que cette technologie soit très proche du moment où les applications pratiques vont se multiplier.

Application des nouveaux procédés à adsorption solide / gaz

La technologie du cycle d'adsorption solide / gaz est récente et les applications sont encore peu nombreuses.

Cette technologie pourrait toutefois s'étendre à l'avenir dans les domaines suivants :

- la réfrigération solaire ;
- les pompes à chaleur ;
- la production continue de froid (températures voisines de -10 °C) ;
- la mise au point de systèmes autonomes portables pouvant assurer une température donnée pendant une durée fixée (systèmes de transport) ;
- la climatisation automobile.

L'intérêt des systèmes à adsorption est manifeste pour la climatisation automobile de l'avenir. Celle-ci consomme dans certains pays - notamment les Etats-Unis - une part importante des quantités de CFC-12 mises sur le marché. Cette utilisation est au demeurant peu rationnelle dans la mesure où les fuites de fluide frigorigène sont très fréquentes sur les véhicules automobiles - on estime d'ailleurs que la moitié de la consommation de CFC-12 dans le domaine de la climatisation automobile, correspond aux Etats-Unis à la recharge d'appareils souffrant de fuites.

Un créneau technologique semble exister pour l'adsorption dans le conditionnement d'air pour l'automobile.

En effet, selon F. MEUNIER (22), les constructeurs étudient à l'heure actuelle de nouveaux systèmes de refroidissement des moteurs à explosion, où l'eau serait remplacée par un système à évaporation (eau glycolée en légère surpression à 110-120°C). Ces systèmes présenteraient, en effet, l'avantage de permettre un meilleur refroidissement (plus grande fluidité de la vapeur d'eau), un meilleur rendement de moteurs et une diminution de la masse du fluide de refroidissement.

Il serait possible, en outre, avec ces nouveaux dispositifs de réaliser un couplage aisé du circuit de refroidissement du moteur avec un système de conditionnement d'air fonctionnant sur le principe de l'adsorption.

Pour les techniques de l'adsorption solide / gaz, la France dispose d'une équipe de recherche très compétitive sur le plan international : le Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (CNRS) à Orsay, dont l'équipe "thermodynamique" est dirigée par M. Francis MEUNIER, Directeur-adjoint.

A titre d'exemple de réalisations pratiques ou de pilotes du LIMSI, l'on peut citer :

- la réalisation de machines à glace fonctionnant à l'énergie solaire, sur la base d'un brevet CNRS, par Brissonneau et Lotz Marine (Groupe Jeumont-Schneider à l'époque de la mise en service de 3 prototypes) ; ces machines produisent de la glace à partir de lumière solaire : le charbon actif chargé en méthanol est chauffé le jour par la lumière du soleil d'où expulsion du méthanol et stockage de celui-ci sous forme liquide dans un récipient isotherme - la nuit, le charbon actif se refroidit et "pompe" le méthanol qui s'évapore peu à peu de la cuve, ce qui produit du froid (24).
- la réalisation d'un entrepôt de réfrigération de 12 m³ utilisant l'énergie solaire ;
- la réalisation, avec l'aide de l'AFME et de la CEE, d'une pompe à chaleur zéolithe / eau de 230 kW installée dans des abattoirs de volaille à Arrivé (Vendée) et fournissant de l'eau chaude sanitaire, à partir d'eau à 25°C.

2.3.3.6. *La nécessité de valoriser les acquis de la recherche française*

Les positions de pointe dans les technologies alternatives de la production de froid ou de chaleur acquises par les laboratoires du CNRS résultent d'une volonté déterminée de celui-ci de maintenir la recherche dans ce domaine, alors que de nombreux pays abandonnaient ce secteur au début des années 80. A l'heure actuelle, cet effort se poursuit dans le cadre du Groupement Action Recherche Coordonnée pour la période 1988-1991. Un club de relations industrielles sur les pompes à chaleur et les machines à froid a été créé afin de sensibiliser les industriels du froid et de favoriser l'utilisation de ces technologies.

La "faisabilité" technique de dispositifs fonctionnant sur le principe de l'absorption et de l'adsorption est aujourd'hui démontrée.

Se pose évidemment le problème de l'industrialisation qui seule, pourra confirmer ou infirmer l'avenir de ces technologies.

En tout état de cause, celles-ci semblent particulièrement intéressantes pour les pays à fort ensoleillement et en particulier pour les Pays en Voie de Développement.

Mais l'industrialisation implique des investissements importants pour obtenir des séries longues et donc des coûts compétitifs et exige une continuité dans l'activité.

A titre d'exemple, Brissonneau et Lotz Marine après avoir réalisé, en 1987, des premières percées, sur la base des travaux du CNRS, était cédée par la maison mère Jeumont-Schneider et le repreneur mettait rapidement fin aux activités de l'entreprise dans la réfrigération.

A l'inverse de ce revirement, dû à des ajustements stratégiques, il faut souligner l'action volontariste et continue d'ELF-AQUITAINE qui assure un soutien sans faille au laboratoire de l'ISGMP et se trouve aujourd'hui à la tête d'un portefeuille de brevets extrêmement important.

Différentes procédures existent en France pour aider la recherche industrielle. L'AFME a joué un grand rôle dans l'acquisition de ce leadership technologique. La Région Languedoc-Roussillon a également apporté sa pierre à l'édifice.

Un handicap important pour l'industrialisation réside toutefois d'une part dans l'attentisme de certaines PMI vis-à-vis de ces technologies alternatives et d'autre part dans leur taille sans doute insuffisante pour des fabrications à série longue.

Il manque en réalité, en France, une industrie structurée et une ou plusieurs entreprises compétitives sous contrôle national, ayant retenu la réfrigération comme axe stratégique de développement et disposant des moyens nécessaires. Mais des bases de reconquête existent avec des entreprises comme CEAT, Quiri, ou l'Unité Hermétique.

Les chances de valorisation des acquis des équipes de recherche françaises passent sans doute désormais par une coopération européenne.

Un programme Euréka 1 (programme n°109), existe pour les pompes à chaleur et les machines à production de froid à 0 °C de grande capacité. Le Projet Joule (1990-1992) mis en oeuvre par la DG XII de la Commission des Communautés Européennes permet un financement de certaines recherches dans le domaine de la thermodynamique en Europe.

Le moment semble venu d'accélérer les réalisations industrielles dans les domaines de la réfrigération et du conditionnement d'air, dans le cadre d'un nouveau programme Euréka doté de moyens très importants.

L'intérêt pressant des industriels japonais ou coréens pour ces nouvelles technologies du froid, intérêt dicté par les énormes perspectives du marché qu'elles ont, est un motif de plus pour engager une action rapide et déterminée.

2.4. LE CAS DES MOUSSES

Les CFC concourent, dans la fabrication des mousses plastiques, à l'obtention de deux effets : d'une part l'effet d'expansion du matériau plastique avec formation d'alvéoles et d'autre part l'effet d'isolation, les CFC ayant une conductibilité thermique très faible.

2.4.1. Produits de remplacement

Des produits de remplacement des CFC pourraient permettre de parvenir au même effet de moussage. Celui-ci est recherché pour l'allègement du matériau qu'il procure et pour la modification de ses propriétés mécaniques.

Le tableau 37 donne pour chaque catégorie de mousses des exemples de produits de remplacement ⁽¹⁹⁾.

Tableau 37 : Produits de remplacement pour les mousses (19)

Produits de remplacement des CFC	Catégorie de mousses
Pentane	Polyéthylène expansé Polystyrène expansé extrudé Mousses phénoliques
Eau Gaz carbonique Chlorure de méthylène	Mousses de Polyuréthane

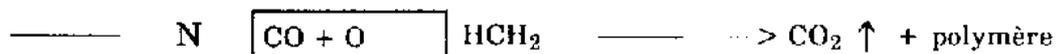
Les produits de remplacement des CFC, HCFC et HFC peuvent prendre en charge sans difficulté la fonction d'expansion. En revanche, la fonction d'isolation thermique est mal reproduite pour les mousses à cellules fermées.

De même les CFC utilisés dans la production des mousses à cellules ouvertes assurent, en s'évaporant, le refroidissement du matériau et cette fonction n'est pas assurée par les produits de remplacements, d'où d'éventuels incidents de combustion.

2.4.2. Technologies alternatives

Une voie complémentaire et souvent nécessaire de la précédente est, dans le cas des polyuréthanes, la modification du polyol.

La formation de la mousse de polyuréthane s'effectue à partir d'un mélange d'isocyanate et de polyol, auquel on ajoute divers composants supplémentaires comme des catalyseurs ou des durcisseurs. La réaction fondamentale est la suivante :



La réaction entraîne un dégagement de gaz carbonique qui contribue à l'allègement du matériau. Si l'on veut accroître cet effet, de l'eau est ajoutée au mélange : la réaction de l'eau sur l'isocyanate est de conduire à la formation d'une quantité additionnelle de CO₂.

Si l'on veut obtenir un allègement supplémentaire et / ou des propriétés d'isolation, on recourt à l'addition d'un CFC.

L'eau a été décrite plus haut comme un produit de remplacement des CFC. Mais il est également possible ou quelquefois nécessaire de modifier le polyol utilisé pour maintenir à l'identique les propriétés des mousses de polyuréthane.

D'autres options techniques consistent en l'abandon des mousses plastiques fabriquées avec des CFC, HCFC ou HFC au profit d'autres matériaux :

- retour aux emballages carton, bois et / ou polystyrène expansé (fabriqué sans CFC) ;
- retour à la laine minérale, à la laine de verre aux habillages de plâtre pour l'isolation ;
- panneaux à vide : cette technologie fait l'objet de nombreuses études et développements aux Etats-Unis (25), sandwiches de panneaux métalliques entre lesquels le vide est fait ; billes de matériau minéral ou plastique léger placées dans une enveloppe plastique dans laquelle le vide est également fait (les billes assurent la rigidité de l'ensemble).

Une contrainte fondamentale pour les matériaux d'isolation alternatifs est bien sûr leur capacité d'isolation réelle à long terme. De mauvaises performances dans ce domaine dégraderaient rapidement les bilans énergétiques et conduiraient à des augmentations des consommations d'énergie, ce qui n'est évidemment pas une conséquence recherchée.

2.5. LE CAS DES SOLVANTS

Les alternatives à l'utilisation des CFC, HCFC et HFC, comme solvant dans l'industrie électronique, la mécanique de précision, l'optique qui sont à l'heure actuelle les principaux consommateurs de CFC-113, sont relativement nombreuses.

Le tableau 38 présente les solvants considérés comme produits de remplacement par le Groupe technique du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (19).

Tableau 38 : Solvants utilisables en remplacement des CFC (19)

Produit	Avantage	Inconvénient
chlorure de méthylène	bonne efficacité	probablement cancérigène destruction non polluante nécessaire
trichloroéthylène	"	"
perchloroéthylène	"	"
trichloroéthane (méthylchloroforme)	"	nocif pour la couche d'ozone, destruction non polluante nécessaire
solvants aqueux dont eau + HCl	"	destruction non polluante nécessaire consommation accrue d'énergie
eau sans additif	pas de dépollution nécessaire	efficacité faible
hydrocarbures / détergents / savons / terpènes	bonne efficacité	inflammables toxicité inconnue destruction non polluante nécessaire
alcool	bonne efficacité	inflammable destruction non polluante nécessaire produits taxés

Ces différents produits, dont l'efficacité devrait être en tout état de cause plus réduite que celle des HCFC et HFC, seront utilisés avec des techniques comme les ultra-sons renforçant leur pouvoir dissolvant, lorsque cela sera nécessaire.

D'autres techniques destinées à accroître l'efficacité des solvants seront selon toute vraisemblance développées. L'engagement pris par des grandes compagnies informatiques comme IBM ou DEC de remplacer rapidement les CFC, est le gage de sauts technologiques prochains dans ce domaine.

Une autre voie, incluant des modifications de processus industriels significatives, consistera en la mise au point de techniques

de fabrication "propres", c'est-à-dire ne nécessitant pas des étapes de nettoyage. Un bon exemple est constitué par le fluxage, pour la soudure et le brasage, où de nouveaux produits volatils suppriment la nécessité de dégraissage par lavage (26).

2.6. LE CAS DES AGENTS D'EXTINCTION,

Le domaine de l'extinction des incendies est celui où les CFC, en réalité les halons 1211, 1301 et 2402, trouvent en l'état actuel difficilement des remplaçants.

Les techniques à base de pulvérisation d'eau, de gaz carbonique ou de mousses carboniques, ou de poudres (sulfates d'ammonium) sont, d'une part, fortement dommageables pour certains équipements et, d'autre part, inefficaces dans certaines configurations industrielles ou commerciales.

Les seules alternatives technologiques semblent être, en l'occurrence, une conception différente de la distribution des locaux, une utilisation de matériaux ininflammables et des contraintes de fonctionnement plus rigoureuses pour les installations industrielles.

CONCLUSION

La voie des produits de remplacement et des technologies alternatives apparaît, à beaucoup d'observateurs ou d'experts, comme une voie difficile dont les résultats ne seront utilisables qu'à moyen terme.

Il est incontestable que les pistes décrites rapidement plus haut nécessitent des changements profonds dans les processus de fabrication, de commercialisation et sans doute supposent aussi des changements de mentalités.

Précisément, la prise de conscience des impératifs de protection de l'environnement dans l'opinion publique pourrait faire mûrir ces options technologiques plus rapidement que ne l'exigeraient la rationalité économique au sens habituel du terme et ses différentes composantes de coûts, de prix et de durée de vie minimale de l'appareil productif.

S'il se confirmait que des changements de mentalités s'effectuent en profondeur, les produits de remplacement des CFC, HCFC et HFC et les technologies alternatives pourraient devenir des arguments de vente très efficaces.

Dans ce cas, les entreprises industrielles pourraient préférer aux mutations technologiques impliquées de toute façon par le passage des CFC aux HCFC et aux HFC, les mutations plus radicales et plus coûteuses certes, mais peut-être plus porteuses, représentées par la mise en oeuvre des technologies alternatives.

En tout état de cause, ni les substituts des CFC, ni les technologies alternatives ne peuvent affranchir les agents économiques de la nécessité d'observer un mode de gestion plus économe des produits d'aval dans lesquels figurent les CFC et figureront les HCFC et les HFC ou d'autres produits de remplacement.

3. LA NÉCESSITÉ D'UNE GESTION ÉCONOME DES CFC, ET DE LEURS SUBSTITUTS

Le constat scientifique montre qu'une limitation des rejets dans l'atmosphère des composés chlorés à durée de vie longue est indispensable.

Une troisième démarche, complémentaire des précédentes, est constituée par l'introduction d'un mode de gestion économe tant des CFC, avant leur disparition, que des HCFC et HFC.

Le passage aux HCFC entraînerait une diminution des rejets de chlore à durée de vie longue, à condition toutefois qu'une augmentation des quantités émises dans l'atmosphère ne vienne pas annuler l'effet positif du changement de produits. Il convient également de limiter les rejets des HCFC pour ne pas amplifier l'effet de serre.

Par ailleurs, si le passage aux HFC représente selon toute probabilité une solution définitive au problème de l'ozone, les HFC ont un pouvoir d'absorption des rayonnements infra-rouge et donc participeront à l'effet de serre.

Toutes les analyses scientifiques du problème et les contraintes économiques convergent donc : il est nécessaire d'améliorer le confinement des CFC et de leurs substituts, pour réduire les émissions dans l'atmosphère. Il est également indispensable de récupérer ces composés chimiques et de les recycler ou de les détruire sous des formes non polluantes si le recyclage n'est pas possible.

Confinement, récupération, recyclage ou destruction sont les maillons indispensables d'une utilisation économe et responsable des CFC, HFC et HCFC.

Des progrès dans ces domaines peuvent conduire à des réductions très significatives des rejets dans l'atmosphère.

Les cas des applications concernées par ces mesures sont discutées sur le plan de la faisabilité technique dans la suite, sous forme d'un commentaire du tableau 39.

Tableau 39 : Options techniques pour les économies d'utilisation

Méthode/ Applications	Confinement	Récupération	Recyclage/Destruction
<u>Aérosols</u>	Récupération des boîtiers usagés et des stocks invendus		<ul style="list-style-type: none"> • Destruction en atmosphère confinée
<u>Refrigeration</u> domestique commerciale industrielle	<p><u>Fluide :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • utilisation de compresseurs hermétiques (non ouverts) • amélioration des soudures et brasures • augmentation de l'épaisseur des pièces métalliques des échangeurs • généralisation du dégivrage automatique • détection des fuites : dispositifs d'alerte, additifs odorants • révisions périodiques des installations commerciales ou industrielles • fluides de vidange autres que CFC • réseaux frigoporteurs sans CFC <p><u>Mousses :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • augmentation de l'imperméabilité des matériaux solides, de l'étanchéité des soudures des parois métalliques 	<p><u>Fluide :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • vannes de récupération sur les installations • équipements de vidange (récupération) • formation des installateurs et des agents de maintenance • intervention des distributeurs pour le rachat des matériels usagés • agrément technique des entreprises du secteur <p><u>Mousses :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • récupération et transport des mousses en milieu confiné 	<p><u>Fluide :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • si recyclage impossible (fluides trop sales), destruction non polluante des CFC, HCFC et HFC <p><u>Mousses :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • destruction des mousses en milieu fermé
<u>Conditionnement d'air</u> domestique industriel automobile	<ul style="list-style-type: none"> • diminution de la longueur des tuyaux flexibles de raccordement • normes d'imperméabilité pour les polymères utilisés • indicateurs de rendement • détecteurs de fuites • réseaux frigoporteurs sans CFC 	<ul style="list-style-type: none"> • vannes de récupération sur les installations • formation des installateurs et des agents de maintenance • agrément technique des entreprises du secteur 	<ul style="list-style-type: none"> • recyclage si fluides peu pollués • destruction non polluante dans le cas contraire
<u>Mousses plastiques hors réfrigération</u>	<ul style="list-style-type: none"> • amélioration imperméabilité des matériaux plastiques 	<ul style="list-style-type: none"> • récupération matériaux isolants rigides du HTP 	<ul style="list-style-type: none"> • réutilisation
<u>Solvants</u>	<ul style="list-style-type: none"> • machines des traitements hermétiques comprenant des dispositifs de condensation, filtration et recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> • déclaration d'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> • amélioration des méthodes de purification • gestion des stocks contrôlée
<u>Agents d'extinction</u>	<ul style="list-style-type: none"> • essais des installations avec fluides de remplacement • élimination des fuites des bouteilles ou circuits de halons • fiabilité accrue des dispositifs de déclenchement 	<ul style="list-style-type: none"> • échange gaz nouveaux contre gaz périmés 	<ul style="list-style-type: none"> • destruction non polluante des fluides périmés nécessité de la mise au point d'une méthode

3.1. LE CONFINEMENT

Le confinement, jusqu'à la mise en évidence de la responsabilité des composés chlorés à durée de vie longue dans l'altération de la couche d'ozone, n'a été recherché que pour accroître la fiabilité des installations, pour éviter des opérations de recharge et par suite des coûts supplémentaires.

Le confinement est aujourd'hui impératif pour des raisons écologiques, que l'on se place dans la période de retrait progressif des CFC ou dans celle d'utilisation des HCFC et des HFC.

S'agissant de l'application des aérosols, le confinement est a priori impossible. En réalité, les consommateurs jettent souvent des conteneurs ("bombes") métalliques à moitié pleins et l'on peut envisager une récupération de ces boîtiers. Il en est de même pour les invendus ou les stocks périmés. Une telle démarche participe à la fois du confinement et de la récupération.

Pour la réfrigération et le conditionnement d'air, le confinement est possible et nécessaire. On doit distinguer deux niveaux : celui du fluide frigorigène et celui des mousses d'isolation.

Dans le cas des réfrigérateurs domestiques, on estime généralement que la quantité de CFC présente dans le circuit de réfrigération d'un appareil de moyenne gamme est de 100 à 200 g. La quantité de CFC comprise dans les mousses des parois des réfrigérateurs, où ils jouent le double rôle d'agent d'expansion des mousses lors de la fabrication et d'isolant thermique par leur présence dans les alvéoles de celles-ci, est en moyenne de 3 à 4 fois supérieure.

Les consommateurs font souvent l'observation que les réfrigérateurs actuels semblent avoir une durée de vie inférieure à celle des premiers réfrigérateurs mis sur le marché dans les années 1940-1950. Les pannes de compresseur, les fuites de fluide frigorigène, voire la perte de capacité d'isolation des parois sont alors évoquées.

En réalité, le changement de réfrigérateur est le plus souvent le résultat d'une volonté d'achat d'un équipement plus performant que les constructeurs proposent, dans le cadre d'une gestion marketing de l'obsolescence technologique.

S'agissant du confinement du fluide frigorigène, le constructeur français SELNOR (filiale de Thomson électroménager)⁽²⁷⁾ indique que les normes de qualité pour les circuits de réfrigération et les échangeurs ne sont pas moins restrictives que par le passé, pour les producteurs européens. Certains produits bas de gamme d'importation pourraient relever cependant du cas contraire. Il n'en demeure pas moins que l'épaisseur des parois métalliques des échangeurs et la

généralisation des dispositifs de dégivrage automatique et continu pourraient diminuer sensiblement l'occurrence des fuites consécutives à des "coups de canif" dans les parois enrobées de glace pour accélérer le dégivrage.

Les mousses de polyuréthane utilisées comme isolants, par ailleurs, sont considérées comme étanches, principalement du fait de la très faible mobilité des molécules de CFC. Le renforcement de l'étanchéité des caissons formant parois est néanmoins envisageable.

Ces mesures sont valables également pour la réfrigération industrielle et commerciale et le conditionnement d'air, mesures auxquelles devraient s'ajouter, compte tenu des grandes quantités de fluides utilisés, l'obligation de disposer de détecteurs de fuite ou de perte de charge, ainsi que celle de limiter la longueur des circuits de distribution du froid, d'améliorer l'imperméabilité de ceux-ci et de recourir à des circuits secondaires comprenant des fluides frigoporteurs comme le chlorure de calcium ou l'eau glycolée.

Le problème du confinement pour les mousses rigides ne semble pas se poser. En revanche, on pourrait envisager d'interdire, sous certaines conditions, purement et simplement l'usage des CFC, HCFC et HFC pour les mousses souples, qui relâchent l'agent gonflant très rapidement. Une autre solution serait la fabrication en atmosphère confinée. Aucune de ces solutions ne semble toutefois praticable.

En ce qui concerne les solvants, leur utilisation devrait entraîner l'obligation de recourir à des machines hermétiques. Il est à noter que si ce n'est pas le cas actuellement pour un nombre important d'industries, ce type de machines opérant en atmosphère confinée constitue un marché en pleine expansion dont les Japonais se sont déjà emparés (26).

Enfin, le confinement pourrait être amélioré sensiblement pour les halons par l'utilisation de fluides de remplacement pour le test des installations. Une autre amélioration consisterait en l'élimination des fuites et des déclenchements non justifiés.

L'importance des tests, des fuites et des déclenchements injustifiés dans les consommations de halons en France, en 1986, était la suivante : 20 % pour le halon 1301 et 15% pour le halon 1211. Les consommations sur feu représentaient respectivement 10 % et 5 % du total, le complément à 100 % étant stocké.

3.2 LA RÉCUPÉRATION

L'action initiale et fondamentale concernant la récupération est bien sûr la sensibilisation du public et la motivation des professions qui en sont chargées directement ou indirectement.

La récupération suppose toutefois des mesures techniques. Celles-ci sont détaillées dans le tableau 39. Les principales mesures sont :

- l'obligation de détenir des équipements de vidange /récupération pour les installateurs et les gros utilisateurs dans ce domaine.;
- la formation des professionnels aux opérations techniques de récupération et l'agrément des entreprises.

La récupération est, sans doute, le point le plus difficile à traiter. Le succès d'opérations tests menées en France dans certaines grandes villes pour les réfrigérateurs ménagers, de même que pour la récupération des boîtiers d'aérosols, ne doit pas faire oublier que la récupération doit surtout être mise en oeuvre dans les installations industrielles et commerciales de réfrigération et de conditionnement d'air.

3.3. LE RECYCLAGE ET/OU LA DESTRUCTION

Les méthodes de recyclage sont à l'heure actuelle au point pour la plupart des fluides frigorigènes.

Il ne faut toutefois pas sous-estimer le coût de ces opérations de filtration / purification, et le fait que les rendements en sont souvent décroissants.

Une incitation économique au recyclage pourrait diminuer le coût du recyclage ou élever le coût du produit neuf. Il n'en demeure pas moins que sur un plan technologique, le recyclage peut être impossible dans le cas de fluides très chargés en impuretés. En conséquence, l'opération ultime de destruction non polluante des produits doit être possible. Les filières de récupération doivent nécessairement comprendre explicitement cette étape pour être crédibles.

Le cas des halons pose un problème particulier. Selon les représentants du Comité Technique Français des Halons (dépendant du Centre National de Prévention et de Protection)⁽²⁸⁾, aucune méthode industrielle de destruction des halons n'existe à l'heure

actuelle. Il est clair que la limitation aux usages essentiels des halons suppose la récupération et la destruction des stocks affectés aux autres usages, sous peine de voir les mesures prises être inopérantes du fait des fuites dans les installations et des déclenchements intempestifs de celles-ci.

Le recyclage des mousses quant à lui ne semble pas être à l'ordre du jour des préoccupations des industriels.

L'élévation du prix de certaines mousses, qui devrait résulter de l'abandon des CFC (augmentation corrélative de la masse de matière plastique employée) pose toutefois le problème de la mise au point de méthodes de recyclage performantes sur le plan économique.

4. CONCLUSION

Parmi les trois types d'options technologiques permettant la disparition des CFC-recours aux substituts HCFC et HFC, produits de remplacement et technologies alternatives, confinement / récupération / recyclage - quelle est celle qui paraît la meilleure, laquelle va l'emporter, laquelle faut-il privilégier pour l'action des pouvoirs publics ?

Des réponses différentes peuvent être apportées sur des plans différents. Mais ces questions ont-elles un sens ?

Avec d'excellents arguments techniques, les chimistes proposent des produits de la même famille que celle des CFC, les HCFC et les HFC et prévoient de les mettre sur le marché dans les deux ou trois ans. Les économistes surenchérisent en insistant sur le fait que c'est avec cette solution que l'impact du bannissement des CFC sur le prix sera le plus réduit.

La difficulté est que les produits HCFC et HFC ne sont pas des substituts "drop-in", c'est-à-dire des produits que l'on peut verser directement à la place des anciens, dans les réservoirs des appareils industriels ou ménagers. Une adaptation coûteuse des appareils est en fait nécessaire, de même qu'une adaptation des industries d'aval. On verra, dans la suite, dans le cas de la France, que cette adaptation s'est faite ou se fait rapidement dans les aérosols, les mousses, les solvants.

Il n'en reste pas moins vrai que l'industrie la plus touchée par la nécessité d'adaptation significative aux HCFC et aux HFC - la réfrigération et le conditionnement d'air -, est aussi l'industrie dont les perspectives commerciales sont à la fois les plus difficiles en raison de la concurrence et les plus larges - en raison de l'évolution des goûts des consommateurs des pays industrialisés qui pousse à la

généralisation de la climatisation automobile, par exemple, et, en raison des besoins d'équipement des ménages et des industries agro-alimentaires des Pays en Voie de Développement.

Le choc externe sur l'industrie du froid que constitue le bannissement à plus ou moins longue échéance des CFC pourrait conduire à une accélération des mutations technologiques, voire à un saut technologique majeur, déclenché ou assumé par les entreprises qui ont les moyens d'investir dans ce secteur. Il semble en réalité que les conditions d'un tel saut, décrites par de bons auteurs en stratégie industrielle (29) soient remplies.

Mais à l'inverse, les produits de remplacement et les technologies alternatives ne peuvent répondre à tous les cas. Les HCFC et les HFC seront probablement irremplaçables dans certaines utilisations.

De même, le confinement, la récupération et le recyclage sont indispensables pour diminuer les coûts, changer les mentalités et permettre une transition acceptable vers les HFC.

Existe-t-il enfin une sorte de calendrier implicite et naturel pour la mise en oeuvre des trois options technologiques, calendrier qui verrait la mise en place immédiate des économies d'utilisation et des produits de remplacement, l'introduction à court terme des HCFC/HFC et à long terme des technologies alternatives ?

Il y a sans doute du vrai à certains égards, dans une telle présentation. Mais cette vision paraît un peu simpliste. En réalité, la protection de la couche d'ozone signifie un choc extérieur sur un ensemble d'industries dont on voit bien aujourd'hui qu'elles sont le siège de réactions d'adaptation rapide, foisonnant dans des directions nombreuses et différentes.

Les industriels demandent souvent du temps pour s'adapter. Mais l'industrie est aussi capable de réactions rapides et de sauts qualitatifs.

La variété des options technologiques proposées actuellement pour se passer des CFC ou les économiser, prouve en tout cas qu'il est envisageable de renforcer le Protocole de Montréal dont les mesures étaient, en leur temps, les bienvenues mais se révèlent aujourd'hui insuffisantes.

III - LES MESURES PRÉVUES PAR LE PROTOCOLE DE MONTRÉAL ÉTAIENT OPPORTUNES MAIS S'AVÈRENT INSUFFISANTES

Le Protocole de Montréal, entré en vigueur le 1er janvier 1989, fixe comme objectif une réduction de 50 % par rapport au niveau de 1986 de la consommation de CFC.

Cet accord, le premier en matière de coopération internationale pour la protection de l'environnement, a entraîné un mouvement de réduction important des consommations de CFC dans le monde.

Les stratégies des différents pays pour atteindre les objectifs fixés ont été diverses mais toutes couronnées de succès grâce à des efforts considérables des producteurs de CFC mais aussi des industries d'aval.

On peut dès lors considérer qu'étant opportunes sur un plan scientifique, les mesures du Protocole de Montréal, le sont également sur un plan industriel.

Il reste que le Protocole de Montréal ne peut être tenu, en l'état actuel des connaissances, comme suffisant : les réductions de consommation sont insuffisantes d'une part, et d'autre part, le nombre de pays signataires l'est également.

A - DES MESURES OPPORTUNES

La réglementation internationale, prévue par le protocole de Montréal, en ce qui concerne les substances appauvrissant l'ozone, semble bien orientée. Un relais efficace a été pris, au niveau national dans les pays industrialisés.

1. LE PREMIER EXEMPLE D'UNE COOPÉRATION INTERNATIONALE POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Le contexte de l'élaboration du Protocole de Montréal est celui d'une sensibilisation croissante de l'opinion publique sous l'effet de travaux scientifiques qui laissent de moins en moins de doutes quant à l'implication des chlores à durée de vie longue dans l'altération de la couche d'ozone.

Les premiers soupçons sont exposés par ROWLAND et MOLINA dans leur fameux article de 1974 et déclenchent une série de travaux d'interprétation, souvent contradictoires dans les mécanismes proposés. De fait, ce n'est qu'en 1988 qu'une preuve expérimentale de pronostic de l'implication des CFC sera apportée.

Entre-temps, la découverte en 1985 du trou d'ozone de l'Antarctique accélère la prise de conscience de l'opinion et des pouvoirs publics. Désormais convergent les forces des producteurs de CFC comme DUPONT qui ont dès la fin des années 80 lancé des recherches sur les substituts des CFC, les préoccupations des gouvernements de certains pays comme les pays nordiques qui ont une position avancée en matière de protection d'environnement et les efforts du Programme des Nations Unies pour l'Environnement qui a pris, dès 1981, l'initiative de lancer des négociations internationales sur la réduction de l'utilisation des CFC.

Ces négociations voient s'opposer, comme il est naturel, les intérêts nationaux (30).

Les Etats-Unis proposent de généraliser l'interdiction des CFC dans les aérosols qu'ils ont mise en vigueur en 1978. Pour la CEE, la réduction correspondant à ces usages devrait s'établir à 30 % et non pas à 100 % ; sa préoccupation est de limiter la croissance des capacités de production de CFC, qui sont excédentaires en Europe. D'autres pays comme les pays nordiques (Finlande, Suède, Norvège) souhaitent au contraire une limitation globale des émissions, les aérosols ne formant qu'un cas particulier d'utilisation. A l'inverse, le Japon, l'Europe méridionale et les Pays en Voie de Développement concernés, considèrent toute réglementation comme prématurée. De leur côté les industriels s'opposent à toute perspective d'interdiction de l'ensemble des utilisations de CFC-11 et 12. Lorsque la Convention de Vienne est signée en mars 1985, le point d'équilibre de l'accord est celui de la réduction des CFC aux seuls aérosols.

Les vingt-sept pays et la CEE signataires de la Convention de Vienne, en mars 1985 reconnaissent la nécessité d'une coopération internationale accrue afin de limiter les dommages que les activités

humaines font subir à la couche d'ozone qui protège la biosphère des rayons ultra-violet du soleil.

La Convention de Vienne est ainsi un progrès considérable dans la voie d'une gestion internationale coordonnée d'un problème d'environnement global.

La Convention de Vienne constitue un accord-cadre, exprimant des préoccupations mais ne prévoit aucun dispositif contraignant. Ceci devra faire l'objet de protocoles spécifiques ultérieurs. Mais les participants appellent de leurs vœux un texte réglementant la production, les émissions et l'utilisation des CFC et halons qui ont un effet particulièrement destructeur sur la couche d'ozone.

La découverte du trou d'ozone de l'Antarctique exerce alors une pression sur les pays signataires de la Convention de Vienne. Les stratégies industrielles des producteurs de CFC qui continuent leurs efforts de recherche sur les CFC contribuent à l'émergence d'un point d'accord, non sans que les positions des différents pays n'aient continué à s'opposer.

Le 16 septembre 1987, un Protocole est signé à Montréal par vingt-sept pays sur les cinquante-cinq qui participent aux négociations.

2. L'OBJECTIF D'UNE RÉDUCTION DE 50 % DES CFC À L'HORIZON 1999

2.1. LES PRODUITS CONCERNÉS ET LES BASES DE CALCUL

Le Protocole de Montréal réglemente séparément cinq CFC : les CFC-11, 12, 113, 114 et 115 et trois halons : les halons 1211, 1301 et 2402.

Le Protocole distingue les productions et les consommations.

Les bases de calcul pour les productions sont pour chacun des deux groupes de produits -CFC et halons- la somme des quantités annuelles de chaque produit corrigées par les ODP.

La consommation est calculée sur les mêmes bases, en additionnant la production et les importations et soustrayant les exportations. Toutefois, il est prévu qu'à compter du 1er janvier 1993 aucune exportation de substances réglementées vers des États qui ne sont pas signataires du Protocole ne sera soustraite dans le calcul du niveau de consommation de la partie exportatrice.

Les objectifs de réduction sont à respecter dans le cadre national pour chacun des pays signataires, la CEE étant cependant considérée comme un même Etat au niveau de la consommation.

2.2. UNE RÉDUCTION DE 50 % À L'HORIZON 1999

Le Protocole prévoit une réduction des niveaux de production et de consommation :

1- Gel de la consommation des CFC visés à leur niveau de 1986, à compter du 1er janvier 1989 ; gel identique de la production pour les pays producteurs, qui peuvent toutefois bénéficier d'une marge supplémentaire de 10 % afin de répondre aux besoins d'importation des Pays en Voie de Développement (PVD) ou à des fins de rationalisation industrielle.

2- Réduction de 20 % par rapport à 1986, de la consommation, intervenant en 1994 ; réduction identique de la production, qui peut toutefois bénéficier d'une marge supplémentaire de 10 % afin de répondre aux besoins d'importation des PVD ou à des fins de rationalisation industrielle.

3- Réduction supplémentaire de 30 %, par rapport à 1986, de la consommation, intervenant en 1999 ; réduction identique pour la production qui peut toutefois bénéficier d'une marge supplémentaire de 15 % afin de répondre aux besoins d'importation des PVD ou à des fins de rationalisation industrielle.

La situation spécifique des Pays en Voie de Développement est également prise en compte par la disposition suivante : ils peuvent disposer de dix ans de délai pour se conformer au Protocole si leur consommation par tête est inférieure à 0,3 kg/habitant.

Le transfert d'excédents de production est autorisé pour les pays produisant moins de 25.000 tonnes de substances réglementées à condition que le cédant et le bénéficiaire ne transgressent pas les limites de la réglementation de la production.

Le cas des halons est traité de la manière suivante : leur consommation et leur production seront gelées au niveau de 1986, trois ans après l'entrée en vigueur de la convention, à l'issue d'une nouvelle concertation et d'un examen scientifique.

L'entrée en vigueur du Protocole a été subordonnée à ce qu'au moins onze Etats représentant les deux tiers de la consommation mondiale des substances concernées l'aient alors ratifié et à condition que la Convention de Vienne de 1985 soit elle-même entrée en vigueur.

La Convention de Vienne est entrée en vigueur le 22 septembre 1988.

Par suite des adhésions initiales des pays suivants : Etats-Unis, Canada, tous les pays nordiques, pays de la CEE (moins l'Espagne et l'Irlande), Japon, Mexique, Maroc, Egypte, Ghana, Kenya, Nouvelle-Zélande, Suisse, Autriche, Togo, Panama, Sénégal, Venezuela, Israël, et d'un rythme de ratification rapide, le **Protocole de Montréal est entré en vigueur le 1er janvier 1989.**

Le Protocole de Montréal prévoit, enfin, que les parties peuvent décider de sa révision, à la majorité des deux tiers des parties présentes et participant au vote, représentant au moins cinquante pour cent de la consommation totale, par les parties, des substances réglementées.

En mars 1989, d'après le PNUE, cinquante-cinq pays avaient signé le Protocole et quarante-six l'avaient ratifié.

3. UNE RÉGLEMENTATION INTERNATIONALE BIEN CIBLÉE

Le dispositif de Montréal paraît bien ciblé dans la mesure où il vise les composés chlorés les plus dangereux et les CFC dont le volume de production est le plus important.

3.1. LES COMPOSÉS CHLORÉS LES PLUS DANGEREUX ONT ÉTÉ VISÉS...

Les substances réglementées par le protocole de Montréal, qui figurent dans l'annexe A de cet accord, étaient, a priori, les plus nocives, de par leur durée de vie et leur potentiel de destruction de l'ozone.

Tableau 40 : Substances visées par le Protocole de Montréal Annexe A : Substances réglementées

Groupes	Substances	Durée de vie (années)	ODP (1)
Groupe I	CFC-11	60	1,0
	CFC-12	120	1,0
	CFC-113	90	0,8
	CFC-114	200	1,0
	CFC-115	400	0,6
Groupe II	Halon 1211	25	3,0
	Halon 1301	110	10,0
	Halon 2402	-	6,0

(1) Estimations au moment du protocole de Montréal.

ODP : potentiel de destruction de l'ozone par rapport à celui des CFC-11.

S'agissant plus particulièrement des CFC, ceux d'entre eux qui étaient visés par le Protocole étaient, en outre, les plus répandus.

3.2. ... AINSI QUE LES CFC LES PLUS PRODUITS

Alors que la production des halons 1211 et 1301 confondus ne représente que 25 000 tonnes, celle des CFC réglementés par le Protocole, qui sont le plus consommés, est actuellement la suivante :

- CFC-11 :	375 000 tonnes
- CFC-12 :	450 000 tonnes
- CFC-113 :	150 000 tonnes
- CFC-114 :	15 000 tonnes
- CFC-115 :	15 000 tonnes

Au moment des négociations de Montréal, une partie importante des CFC les plus consommés (CFC-11 et 12 : 80 % de la production mondiale) était, en plus, utilisée de façon particulièrement dangereuse pour la couche d'ozone. Les aérosols correspondaient encore ainsi à 30 % de la consommation totale de CFC en 1987 et la climatisation automobile à environ 13 % (16,5 % aux Etats-Unis).

On retiendra que les restrictions ont un caractère global et progressif.

Les parties peuvent s'organiser comme elles l'entendent pour parvenir à l'objectif global final, en respectant la réduction intermédiaire prévue pour les CFC.

La mise en oeuvre de la réglementation internationale du protocole de Montréal a, dans l'ensemble, été efficacement relayée, au niveau national, dans les pays industrialisés.

4- UN RELAIS EFFICACE PRIS AU NIVEAU DES PAYS INDUSTRIALISÉS

Le Protocole de Montréal est entré en vigueur le 1er janvier 1989. Cet accord international entend traiter un problème de pollution globale. Son cadre d'application est toutefois national.

Ainsi, chacun des pays signataires doit prendre les mesures qui s'imposent pour en respecter les termes et ces mesures doivent agir sur des structures de production et de consommation qui lui sont propres, et, qui sont, comme on l'a vu précédemment, différentes d'un pays à l'autre.

Si l'on considère l'ensemble des pays signataires, on constate que différentes méthodes ont été retenues : réglementations, accords de mise en oeuvre passés suscités par les pouvoirs publics, mesures prises unilatéralement par les industriels.

Ce qu'il faut souligner, c'est que les structures de consommation étant différentes, et les solutions de réduction des consommation plus ou moins aisées à mettre en oeuvre selon le secteur d'utilisation, le respect des objectifs de Montréal a été obtenu ou sera obtenu avec plus ou moins de difficulté.

Ainsi, lorsque la part des CFC utilisés dans les aérosols était forte, des réductions de consommation de CFC dans ce secteur -techniquement moins difficiles que pour d'autres- ont pu permettre un respect des objectifs de Montréal. A l'inverse, lorsque les aérosols ne représentent pas ou plus un débouché important pour les CFC ou lorsqu'un effort de réduction a été effectué spontanément avant les dates de référence du Protocole en matière de consommation, le respect du Protocole est beaucoup plus difficile.

Il faut signaler enfin que l'application du Protocole de Montréal dans chacun des pays peut donner lieu à une sorte de "jeu de mistigri" larvé. On entend par là, certaines tentatives faites par certains secteurs d'exciper de contraintes techniques présentées comme insurmontables pour reporter sur les secteurs voisins la charge de l'adaptation et du respect des objectifs de Montréal.

Une tentative de synthèse est présentée dans la suite sur la situation de départ de grands pays utilisateurs, en termes de consommation et de structure de celle-ci et en termes de méthodes utilisées pour la mise en oeuvre du Protocole.

Les développements ultérieurs présentent pour chaque secteur d'utilisation un bilan des réalisations engagées et les perspectives de progrès, en mettant l'accent sur le cas de la France.

4.1. MÉTHODES UTILISÉES DANS LES PRINCIPAUX PAYS CONSOMMATEURS

4.1.1. Les États-unis

4.1.1.1. La situation de départ

Les États-Unis assument un rôle dominant dans le domaine des CFC depuis le développement systématique de ceux-ci par General Motors en 1930.

Leur leadership s'exerce dans les domaines scientifique et industriel selon J-F NOËL, J. THEYS et S. FAUCHEUX ⁽³⁰⁾.

La part des scientifiques américains dans la mise en évidence de l'implication des CFC dans l'altération de la couche d'ozone ressort de la première partie du présent rapport. Le rôle précurseur du premier producteur mondial DUPONT est déterminant également dans le lancement des travaux sur les HCFC et les HFC. Les Etats-Unis sont enfin le deuxième pays après la Suède à interdire, dès 1978, les CFC-11 et 12 dans les aérosols.

Il est évidemment difficile et sans doute inutile de faire, dans cette attitude offensive jusqu'à aujourd'hui, la part de ce qui provient d'une prise de conscience aiguë des impératifs de protection de l'environnement et de ce qui constitue l'expression d'une stratégie économique classique de gestion programmée de l'obsolescence technique contraignante pour les entreprises moins avancées.

En tout état de cause, les Etats-Unis ont démontré, dans les faits, la réalité de leur implication. Le tableau 41 et les développements suivants montrent à la fois les progrès réalisés et l'ampleur du chemin qui reste à faire pour respecter les objectifs du Protocole de Montréal ou a fortiori des normes plus contraignantes pour les suivants.

Tableau 41 : Situation des Etats-Unis (2)

Année	Zone	Consommation totale en tonnes	Part des différents secteurs					
			Aérosols	Froid	Mousses	Solvants	Autres	Total
1974	<u>Monde</u>	920 000	69	18	5	6	2	100
1988	Etats-unis	420 000	4	40	33	23	-	100

En l'absence de données chiffrées sur les consommations des Etats-Unis en 1974, il est difficile d'estimer l'ampleur de la réduction de consommation de CFC que représente l'interdiction de 1978 pour les aérosols. Avec des hypothèses vraisemblables comme les suivantes : 40 % de la consommation mondiale assurés par les Etats-Unis et 40 % de celle-ci dans les aérosols, on parvient à une quantité utilisée dans les aérosols en 1974 de 150.000 tonnes environ aux Etats-Unis.

En 1988, les aérosols ne représentaient plus que 17.000 tonnes de CFC environ, (soit une diminution d'approximativement 100.000 tonnes par rapport à 1974) alors que la réfrigération et le conditionnement d'air se caractérisent par une consommation approchant 170.000 tonnes.

Si l'on fait, par ailleurs, le bilan des consommations liées au secteur énergétique, on arrive aux résultats suivants pour 1989 ⁽²⁾ : près de 60 % des CFC utilisés le sont dans des applications liées au secteur énergétique, soit une quantité d'environ 250.000 tonnes de CFC, avec la répartition suivante :

- . fluides pour la réfrigération et le conditionnement d'air : 95.000 tonnes
- . fluides pour l'air conditionné automobile : 70.000 tonnes
- . agents d'expansion pour mousses d'isolation (réfrigération, conditionnement d'air) : 85.000 tonnes

La mise en oeuvre du Protocole de Montréal initial ou révisé exige désormais des réductions de consommation dans le secteur le plus dépendant des CFC, celui de la réfrigération, ainsi que celui des solvants.

Selon ⁽²⁾ et ⁽¹⁷⁾, au titre des mesures prises récemment, il faut noter le recours au système de droits à polluer et de taxes. Un système d'allocation de quotas échangeables de production de CFC a été en outre mis sur pied par l'EPA (Environmental Protection Agency).

Le système de la taxe sur les CFC paraît le plus original et, à ce titre, est détaillé ci-dessous ⁽³¹⁾ :

4.1.1.2. La taxe sur les CFC

Une taxe sur les CFC visés par le Protocole de Montréal a été mise en place pour accélérer l'abandon des CFC. Il semble en effet qu'aux Etats-Unis les capacités de production diminuent plus vite que les besoins des utilisateurs. Ceci a pour conséquence une tension sur les prix des CFC 11 et 12 principalement, et des bénéfices accrus pour les producteurs américains, ce qui apparaît injuste du point de vue des autorités américaines.

Montant et mode de calcul de la taxe sur les CFC

La taxe est entrée en vigueur le 1er janvier 1990. Son principe est de s'appliquer aux quantités corrigées par l'ODP du CFC considéré. Le mode de calcul est ainsi le suivant : pour une quantité x de CFC_y : taxe = taxe de base $\times x$ lb \times ODP_y (lb = livre britannique).

Par ailleurs, la taxe de base augmente au cours du temps suivant le calendrier donné dans le tableau 42 :

Tableau 42 : Evolution de la taxe de base sur les CFC aux Etats-Unis ⁽³¹⁾

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Montant de la taxe de base en \$	1,37	1,37	1,67	2,65	2,65	3,10	3,55	4,00	4,45	4,90
% de variation par rapport à l'année précédente	-	0	+ 21,9	+ 58,7	0	+ 17	+ 14,5	+ 12,7	+ 11,2	+ 10,1

De 1990 à 1999, la taxe de base est ainsi multipliée par un facteur égal à 3,6.

Le tableau 43 présente pour quelques années clés le montant en F/kg des taxes en vigueur à ces dates.

Tableau 43 : Montant des taxes sur les CFC aux Etats-Unis ⁽³¹⁾

	Rappel ODP	Taxe en F/Kg			
		1990	1992	1995	1999
CFC - 11	1	17,3	21,1	39,3	62,1
CFC - 12	1	17,3	21,1	39,3	62,1
CFC - 113	0,8	13,9	16,9	31,4	49,7
CFC - 114	1,0	17,3	21,1	39,3	62,1
CFC - 115	0,6	10,4	12,7	23,6	37,3
Halon 1211	3	51,9	63,3	117,9	186,3
Halon 1301	10	173	211,0	393,0	621,0
Halon 2402	6	103,8	126,6	235,8	372,6

(*) Conversion faite sur la base d'1 dollar = 5,7 francs

A titre indicatif, selon DUPONT, les prix en vigueur pour les CFC-11 et 12 étaient au début 1990 d'environ 2 \$/lb, soit 25,3 F/kg sur la base d'un dollar à 5,7 F. Le montant de la taxe est ainsi très important dès 1990 : environ les deux tiers du prix de vente avant son introduction.

Champ d'application de la taxe sur les CFC

La taxe sur les CFC s'applique aux trois cas suivants ⁽³¹⁾:

1- Vente ou utilisation de produits chimiques destructeurs de l'ozone par les fabricants ou les importateurs :

- une liste des produits destructeurs de l'ozone est donnée dans la loi : il s'agit des cinq CFC et des trois halons réglementés par le Protocole de Montréal ; seul le Congrès des États-Unis peut modifier cette liste ;
- les ventes concernées sont celles réalisées par les fabricants et les importateurs de ces CFC et de halons ;
- la taxe est calculée sur la valeur nette des ventes réalisées, c'est-à-dire les ventes réalisées diminuées des retours et ajustements ;
- cette taxe s'applique aussi aux cas où le fabricant ou l'importateur utilise ces substances, au lieu de les vendre ;
- les ventes de produits réglementés fabriqués à l'étranger par des firmes américaines ne sont pas taxées, tant que ceux-ci ne sont pas importés aux États-Unis.

2- Vente ou utilisation de produits importés, dans la fabrication desquels les CFC et halons réglementés sont intervenus :

- la base de calcul est la taxe qui aurait été imposée si les produits réglementés et utilisés dans la fabrication avaient été vendus aux États-Unis ;
- pour calculer la quantité de produits réglementés, la loi prévoit que le Secrétaire au Trésor américain devra choisir entre les trois méthodes suivantes : il pourra accepter les données de quantités fournies par l'importateur ; si l'importateur ne réussit pas à fournir des données convaincantes ("suffisant"), le Secrétaire au Trésor pourra calculer ces quantités sur la base des standards en vigueur dans l'industrie américaine ; en cas de nécessité, le Secrétaire au Trésor pourra décider d'appliquer, en lieu et place des méthodes ci-dessus, une taxe égale à 5 % de la valeur du produit importé.

3- Détention de stocks par des intermédiaires ou des utilisateurs intermédiaires :

- les stocks détenus au 1er janvier 1990 par tout agent économique autre que les fabricants ou les fabricants des produits réglementés sont taxés si ces substances sont détenues en vue de leur vente ou leur utilisation ultérieure dans un process industriel ;
- les augmentations de taxe intervenant de 1990 à 1994 s'appliquent aux stocks rémanents ;
- la taxe s'applique à tous les distributeurs, grossistes ou détaillants ;
- la taxe s'applique aussi aux fabricants de matériels de réfrigération qui détiennent des produits réglementés en vue du remplissage des circuits et aux industries qui détiennent ces produits pour les utiliser en tant que solvants ;
- la taxe ne s'applique pas à la détention de produits dans la fabrication desquels des produits réglementés sont intervenus.

Exemptions

De multiples régimes d'exemption sont prévus concernant tant certains produits que certaines situations :

1- Les halons bénéficient d'un régime particulier :

- la taxe ne s'applique pas à ces produits en 1990 ;
- une taxe constante de 25 cents par livre sans ajustement par l'ODP, soit environ 3,2 F/kg, leur est appliquée de 1991 à 1993 ;
- le régime général leur est appliqué à partir du 1er janvier 1994.

2- Les produits utilisés dans la fabrication des mousses rigides d'isolation reçoivent également un traitement particulier semblable à celui des halons jusqu'en 1993 :

- exemption en 1990 ;
- taxe de 25 cents par livre, soit environ 3,2 F/kg ;
- le régime général leur est appliqué à partir du 1er janvier 1994.

3- Les produits recyclés :

- les produits récupérés aux Etats-Unis aux divers stades des processus de recyclage des CFC et halons visés sont définitivement exemptés de la taxe ;
- les produits récupérés comme trop pleins lors d'une opération de chargement de réservoirs ou comme produits de vidange d'une installation ne sont pas considérés comme des produits de recyclage.

4- Les produits intermédiaires de fabrication entièrement consommés :

- les usages de substances réglementées comme produits intermédiaires dans des réactions chimiques où ils sont entièrement consommés ne sont pas soumis à taxation ;
- ceci s'applique aux ventes par les fabricants ou les intermédiaires ;
- les exemptions correspondantes sont subordonnées à un enregistrement des sociétés concernées.

5- Les exportations sont exemptées de la taxe :

- ces exemptions concernent les fabricants et sont partielles ; l'exemption met en jeu une exemption de base et une exemption additionnelle ;
- l'exemption de base pour un fabricant donné correspond au pourcentage de sa production exportée en 1986, calculé de la manière suivante :

$$\frac{\sum_{\text{produits}}^i (\text{quantité exportée en 1986})_i \times \text{ODP}_i}{\sum_{\text{produits}}^i (\text{quantité produite en 1986})_i \times \text{ODP}_i}$$

appliqué à la production de l'année considérée ; les données de référence pour 1986 seront celles publiées par l'Environmental Protection Agency (EPA) ;

- l'exemption additionnelle est relative aux augmentations de production destinées à l'exportation ; *l'EPA est autorisée, dans le respect du Protocole de Montréal et de ses textes d'application à attribuer, en exemption de la taxe, des autorisations de production supplémentaire pour l'exportation, aux seuls fabricants américains ;*

- les fabricants sont autorisés à s'échanger entre eux ou au profit de tiers (intermédiaires) les exemptions de taxe dont ils bénéficient pour l'exportation ;

- les quantités de produits réglementés utilisés pour la fabrication de biens manufacturés exportés ne sont pas exemptées de la taxe.

Le produit de cette taxe est versé au Budget général fédéral des Etats-Unis.

4.1.1.3. Vers un remplacement rapide des CFC aux Etats-Unis

Certains Etats des Etats-Unis, Hawaï, le Vermont, l'Oregon, le Connecticut, veulent aller plus loin encore que l'Etat fédéral et ont mis ou vont mettre prochainement en place des mesures législatives concernant le conditionnement d'air automobile. Des lois ont été votées obligeant les stations-services à s'équiper avec du matériel permettant le recyclage des CFC.

Les conditions d'un changement très profond sont ainsi en place aux Etats-Unis.

La taxe sur les CFC et halons est un instrument positif vis-à-vis de la protection de l'environnement mais redoutable sur le plan économique :

- la taxe encourage le recyclage des produits visés par le Protocole de Montréal ;

- mais elle met en place une série de barrières à l'entrée sur le marché américain pour les produits dont la fabrication a fait intervenir des CFC ; si ces mesures sont la contrepartie nécessaire des incitations internes, les degrés de liberté donnés à l'administration pour l'appréciation du contenu en CFC sont redoutables et peuvent entraîner l'imposition de surcoûts (5 %) à la vente s'ajoutant à l'inadéquation d'image ;

- les intérêts des firmes américaines à l'exportation sont préservés autant que faire se peut.

Par ailleurs, en août 1989 ⁽³²⁾, General Motors indiquait qu'il éliminerait, dès 1993, toute utilisation des CFC dans les systèmes d'air conditionné de ses voitures. Les véhicules millésimés 1994 seront dotés d'installations fonctionnant avec un substitut. De son côté, Ford s'est engagé à supprimer les CFC, en 1993, pour la fabrication des mousses et l'année suivante pour le dégraissage et le nettoyage.

IBM a, par ailleurs, annoncé comme "Corporate Commitment" l'élimination des CFC pour ses fabrications dès 1993 ⁽³³⁾.

La montée des préoccupations relatives à l'environnement dans l'opinion publique fait que le "Clean Air Act" en cours de discussion finale en juin 1990 est bien accueilli, alors que ses dispositions très sévères -notamment pour la consommation d'énergie- devraient entraîner des dépenses supplémentaires de 20 à 30 milliards de \$ par an pour l'industrie américaine ⁽³⁴⁾.

Le remplacement des CFC est donc pris dans un mouvement général qui pourrait accélérer le processus de remplacement des CFC considéré comme banc d'essai d'une révolution écologique en train de se produire aux Etats-Unis.

Il faut cependant rappeler que la réglementation aux Etats-Unis, permet souvent d'obtenir de nombreuses dérogations.

4.1.2. La situation du Japon

La consommation de CFC par le Japon était estimée à hauteur de 135.000 tonnes en 1988 par DUPONT, soit 12 % environ de la consommation mondiale.

La structure de la consommation en 1988 est indiquée dans le tableau 44.

Tableau 44 : Part des différents secteurs dans la consommation de CFC au Japon (19)

	Consommation totale en tonnes	Part de chacun des secteurs d'utilisation en %				
		Aérosols	Réfrigérateurs	Mousses	Solvants	Total
1988	≈ 140.000	10	31	22	37	100

Depuis le début des années quatre-vingt, la consommation de CFC a connu une très forte augmentation, que l'on peut chiffrer à hauteur de 10 % par an. Cette augmentation provient principalement de l'utilisation courante du CFC-113, comme solvant dans les industries électroniques et informatiques, et dans la mécanique de précision. La consommation de CFC-113 augmente de 50 % entre 1984 et 1986 pour atteindre 60.000 tonnes en 1987.

Les moyens mis en oeuvre par le Japon pour la réduction des utilisations de CFC sont les suivants ⁽²⁾:

- décisions spontanées de firmes qui sont, sur le plan écologique comme sur le plan de la qualité, davantage à l'écoute du marché que dans d'autres pays ;
- incitations financières pour favoriser les transitions technologiques octroyées par le MITI.

4.1.3. La CEE

La Communauté européenne est devenue partie à la Convention de Vienne et au Protocole de Montréal, qui est appliqué sur son territoire par le biais du Règlement CEE n° 3322/88.

Le Conseil a conclu, le 2 mars 1989, à la nécessité d'une réduction dans les plus brefs délais, tant à l'échelle communautaire que mondiale, d'au moins 85 % par rapport au niveau actuel de la production et de l'utilisation des CFC, en vue de leur élimination totale sur la fin du siècle.

La Commission a soumis le 14 mars 1990 une proposition de modification du règlement CEE n° 3322/88 allant dans ce sens.

C'est toutefois sur la base du Protocole de Montréal, que les différents pays membres ont engagé leur effort de réduction de l'utilisation des CFC.

Les principaux pays de la CEE se situent, on l'a vu dans la deuxième partie, légèrement en retrait des Etats-Unis en ce qui concerne les consommations de CFC par habitant. La différence essentielle provient de la moindre utilisation du conditionnement d'air qu'aux Etats-Unis. Comme dans ce dernier pays, le premier point d'application des efforts de réduction a concerné le secteur des aérosols. Les réductions possibles ont été obtenues rapidement dans ce secteur et les autres secteurs doivent désormais s'engager dans le processus de remplacement.

Les méthodes choisies par les différents pays d'Europe sont fondées pour le moment sur une sensibilisation des professions concernées par l'utilisation des CFC et leur adhésion soit au calendrier de réduction du Protocole de Montréal, soit à un calendrier plus rapide qu'elles peuvent avoir proposé elles-mêmes. Le tableau 45 rassemble les quelques données disponibles en matières de consommations nationales.

Tableau 45 : Données sur les consommations dans la CEE ⁽²⁾

	Année de référence	Estimation de consommation en tonnes	Part de chacun des secteurs d'utilisations en %			
			Aérosols	Froid	Mousses	Solvants
CEE	1988	310.000	46	9	28	17
Grande-Bretagne (*)	1986	-	64	11	16	9
	1989	-	24	31	28	17
France	1986	-	54	10	20	16
	1988	-	48	19	23	10
	1989	67.000	-	-	-	-

(*) Pourcentages corrigés par les ODP

La Grande-Bretagne qui a significativement réduit sa consommation de CFC dans les aérosols a bénéficié d'un engagement spontané des industries concernées.

La RFA et la France ont recouru à la signature de conventions nationales, aux termes desquelles les branches utilisatrices s'engagent sur un calendrier de réduction des usages de CFC. Cette méthode a permis une répartition des efforts en fonction des possibilités techniques, du pouvoir de négociation des branches et surtout de la pression de l'opinion publique présente ou à venir sur l'industrie concernée, telle qu'elle peut être ressentie par les dirigeants des interprofessions.

4.1.4. Le cas de la RFA : une attitude offensive en faveur de l'environnement et de la compétitivité industrielle

L'industrie allemande manifeste une préoccupation ancienne et sérieuse vis-à-vis des problèmes posés par l'utilisation des CFC.

Dès 1976, les aérosoliers ouest-allemands proposaient une réduction volontaire de 33 % par rapport à 1975, de l'emploi des

CFC-11 et 12 dans les aérosols. De fait, une réduction de 50 % était obtenue en 1985 ⁽³⁰⁾.

L'enjeu de la protection de la couche d'ozone a désormais en RFA une triple dimension :

Environnementale, car la protection de l'environnement proche ou global est une volonté réelle de la population et pas seulement des "Verts" ;

Politique, parce que la prise en compte des impératifs de protection de l'environnement par les différents partis politiques allemands constitue un atout électoral ;

Economique, parce que l'industrie allemande est d'une part soucieuse d'acquiescer une image de premier défenseur de l'environnement dans le pays et d'autre part décidée à faire de l'adéquation de ses produits aux impératifs de protection de l'environnement un atout commercial s'inscrivant en droite ligne dans sa recherche constante de la qualité.

Tout se passe à l'heure actuelle comme si une interaction subtile entre les pouvoirs publics et les industries utilisatrices de CFC conduisait naturellement à l'adoption prochaine de normes en avance sur la réglementation européenne et donc difficiles à observer mais porteuses à terme d'avantages compétitifs décisifs.

Bien que les dispositions proposées le 11 avril 1990 en matière de CFC par le Ministre de l'Environnement, M. TÖPFER, soient à l'heure actuelle en cours de discussion au sein du Gouvernement de la RFA, il paraît intéressant de présenter ces propositions, pour les différents secteurs d'utilisation ⁽⁸⁾. A cet égard, les CFC concernés sont ceux visés par le Protocole de Montréal (CFC-11, 12, 113, 114, 115 et halons 1211, 1301 et 2402) auxquels s'ajoutent les CFC-13 et 112, le tétrachlorure de carbone CCl₄ et le méthylchloroforme CH₃ CCl₃.

Les propositions de M. TÖPFER sont les suivantes :

1- Aérosols

- interdiction de tous les CFC dès la promulgation de l'ordonnance,
- les produits autorisés dans le cadre de la loi sur les médicaments ne sont pas touchés pour le moment,
- des autorisations exceptionnelles pourront être accordées.

2- Froid

- interdiction le 1er janvier 1992 pour les installations contenant plus de 5 kg de l'un ou plusieurs des produits visés,
- interdiction le 1er janvier 1995 pour les installations contenant moins de 5 kg de produits visés.

3- Mousses

- interdiction dans les 30 jours de tous les produits visés pour les mousses dans l'emballage, la vaisselle jetable et les mousses de remplissage en aérosols,
- interdiction des produits visés le 1er janvier 1992 pour les mousses non isolantes,
- interdiction des produits visés le 1er janvier 1993 pour les mousses d'isolation.

4- Solvants

- interdiction le 1er janvier 1992 pour les produits et certaines installations,
- autorisations exceptionnelles pour le tétrachlorure de carbone (CCl₄).

5- Agents d'extinction

- interdiction le 1er janvier 1996,
- autorisations exceptionnelles pour les usages de protection de la vie humaine.

6- HCFC-22

- le HCFC-22 est autorisé jusqu'au 1er janvier 1998 en tant que fluide frigorigène et agent d'expansion pour les mousses d'isolation et les autres mousses, hors les applications emballage, vaisselle jetable et remplissage.

7- Confinement, récupération

- les pertes en cours de fonctionnement doivent être aussi réduites que la technique le permet,
- la récupération est obligatoire pour tous les produits visés ainsi que pour le HCFC-22, à compter de six mois après la promulgation de l'ordonnance

8- Anciennes installations

- l'autorisation et l'apport de fluides frigorigènes dans les installations construites avant l'entrée en vigueur de l'interdiction est autorisée jusqu'à la mise hors service de celles-ci, à condition qu'aucun produit de remplacement ne puisse être employé.

9- Etiquetage, affichage

- tous les produits, appareils contenant des substances visées et/ou du HCFC-22 doivent porter sur une étiquette la mention "contient des CFC détruisant l'ozone",
- cette obligation vaut aussi pour les mousses, sauf celles contenant du HCFC-22,
- les mousses contenant des HCFC ou HFC autres que le HCFC-22 doivent porter la mention "ne contient pas de CFC détruisant l'ozone".

L'impact économique d'une telle série de dispositions est clair : elles constituent aussi bien des barrières à l'entrée sur le marché intérieur que des moyens d'acquérir une position compétitive sur ce marché et à l'exportation.

Par ailleurs, leur rigueur, notamment en ce qui concerne le HCFC-22, pourrait compromettre la viabilité de la période de transition, ce qui irait à l'encontre du but recherché.

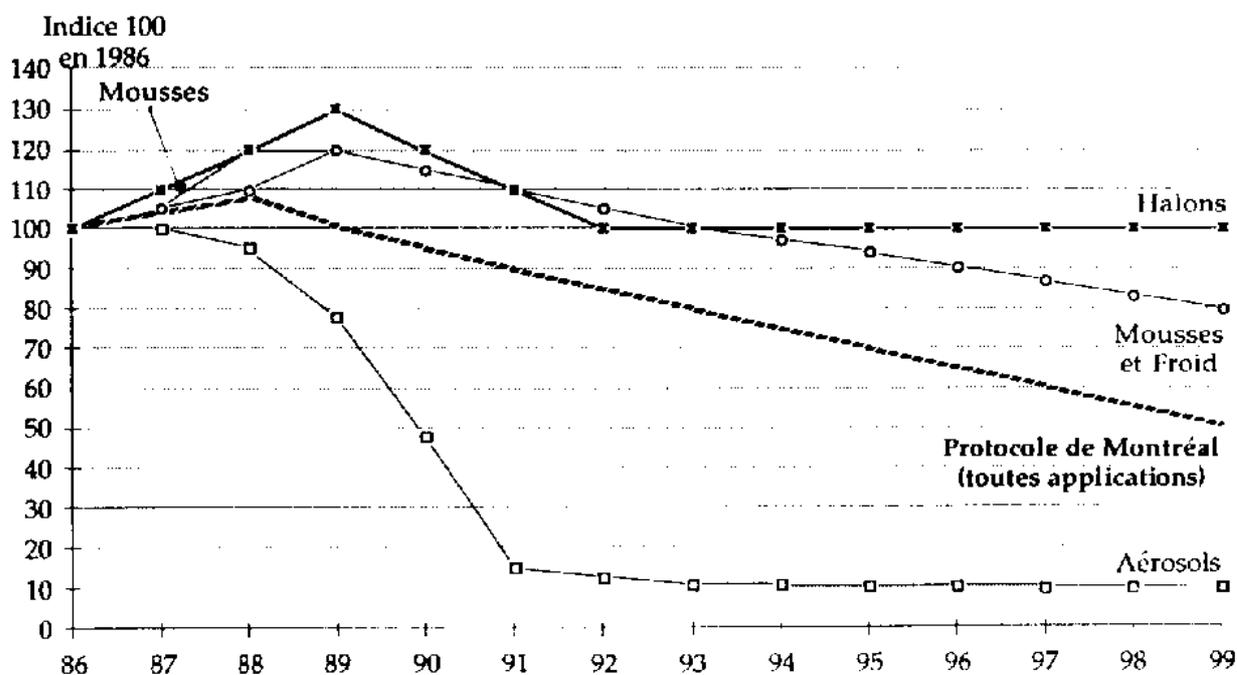
4.1.5. Données générales sur la France

Les conventions signées en France par le Secrétariat d'Etat à l'Environnement en France seront présentées dans la suite.

Le graphique 13 (3), présente le rythme retenu pour la réduction des utilisations dans chaque interprofession.

L'effort de réduction est à l'évidence inégalement réparti pour le moment.

Graphique 13 : L'application du Protocole de Montréal en France (3)



• Absence de convention pour la filière des solvants

5. UNE APPLICATION SECTORIELLE QUI PEUT ÊTRE AMÉLIORÉE

5.1. AÉROSOLS

5.1.1. Données de consommation

Le secteur des aérosols est, on l'a vu, celui dans lequel les réductions d'utilisation de CFC ont été les plus importantes.

Le tableau 46 présente les estimations de DUPONT (9) :

Tableau 46 : Estimation de consommations mondiales de CFC pour les aérosols (9)

	Consommation totale de CFC	Aérosols	
		En % de la consommation totale mondiale de CFC	Tonnes
1974	911.250	= 69	628.760
1988	1.129.500	= 19	214.605

Selon d'autres auteurs (2), la consommation mondiale pour les aérosols était de l'ordre de 180.000 tonnes en 1986. Il est possible mais difficile de certifier qu'un redémarrage de la production d'aérosols se soit produit à partir de 1987/1988, compte tenu de l'amélioration des perspectives économiques dans certains pays. En 1988, les CFC utilisés (selon l'association des producteurs de CFC -Chemical Manufacturers Association)(7) au niveau mondial étaient les suivants :

CFC-11	81.639 tonnes
CFC-12	94.911 tonnes
Autres (CFC-114 principalement) ...	5.000 tonnes

Le tableau 47 détaille les usages faits des aérosols et la proportion de ceux-ci où intervenaient les CFC en 1986.

Au total, ce sont près de 9 milliards de boîtiers qui sont vendus chaque année, à travers le monde, représentant un chiffre d'affaires de 180 milliards de F⁽²⁾.

Tableau 47: Domaines d'application des aérosols et utilisation des CFC en 1986 (19)

	Etats-Unis	CEE	AELE	Japon
Total				
Nombre de boîtiers	2.564.000.000	2.832.000.000	152.000.000	408.000.000
% de boîtiers avec CFC	6	56	47	47
Produits de toilette				
Nombre de boîtiers	787.000.000	1.504.000.000	94.000.000	164.000.000
% de boîtiers avec CFC	0	80	-	86
Insecticides				
Nombre de boîtiers	193.000.000	8.000.000	4.000.000	53.000.000
% de boîtiers avec CFC	1,5	10	-	7
Produits pharmaceutiques				
Nombre de boîtiers	165.000.000	205.000.000	4.000.000	8.000.000
% de boîtiers avec CFC	69	95	-	68
Produits pour l'automobile				
Nombre de boîtiers	442.000.000	199.000.000	16.000.000	75.000.000
% de boîtiers avec CFC	0	50	-	7
Produits ménagers				
Nombre de boîtiers	635.000.000	471.000.000	19.000.000	60.000.000
% de boîtiers avec CFC	0	10	-	31
Produits pour l'industrie				
Nombre de boîtiers	81.000.000	92.000.000	11.000.000	38.000.000
% de boîtiers avec CFC	31	85	-	31

En 1988, les chiffres de production de boîtiers d'aérosols étaient les suivants, selon (2) :

Etats-Unis 2,9 milliards de boîtiers
 CEE 3,2 milliards de boîtiers
 Royaume-Uni 840 millions de boîtiers
 France entre 630 et 650 millions pour 1988 ;
 (634 millions pour 1989).

5.1.2. L'attitude constructive des aérosoliers et la Convention sur les aérosols

5.1.2.1. La structure de la profession en France

La fabrication des aérosols met en jeu plusieurs métiers ou professions :

- les fabricants de boîtiers : en France, ce sont des multinationales verticalement intégrées ; CMB Packaging détient 80 % du marché des boîtiers en fer blanc ; Cebal et Boxal (filiale d'Aluminium-Suisse) détiennent quant à elles 90 % du marché des boîtiers en aluminium,
- les fabricants de valves, qui sont eux aussi des filiales de multinationales étrangères, pour la plupart,
- les fabricants de gaz propulseurs qui sont également peu nombreux (ATOCHÉM, DUPONT, Akzo principalement en France),
- les fabricants de produits actifs : ce secteur est concentré pour les produits d'entretien ou cosmétiques et peu concentré dans le domaine de la pharmacie.

L'opération de conditionnement est effectuée selon deux types de modalités :

- par les fabricants de produits actifs eux-mêmes : 60 % de ce marché sont détenus par deux sociétés ("conditionnement captif"),
- par des sociétés travaillant à façon : cinq sociétés dominent le marché, les autres conditionneurs étant de taille beaucoup plus réduite (conditionnement "à façon").

15.000 personnes concourent directement en France à la fabrication et à la commercialisation des aérosols, pour un chiffre d'affaires de la Profession estimé à 12 milliards de F HT par le Comité Français des Aérosols ⁽³⁵⁾.

Les conséquences prévisibles de l'abandon en cours des CFC sur ce secteur sont résumées dans le tableau 48, en distinguant les solutions des produits de remplacement et des technologies alternatives.

Tableau 48 : Impact de l'abandon des CFC sur la filière aérosol en France ⁽³⁾

	Produits de remplacement	Technologies alternatives
Fabricants Produits primaires boitiers valves	. modifications réalisées à coûts faibles	. efforts de R&D nécessaires . nouvelles solutions intégrant emballage et remplissage
propulseurs	. les producteurs de CFC produiront HCFC et HFC . marchés nouveaux pour les autres firmes chimiques	. pertes de marché dues à la concurrence des pompes mécaniques et présentations liquides ou solides nouvelles
produits actifs	. reformulations nécessaires . augmentation des prix avec HCFC et HFC . diminution des prix ou marges supplémentaires avec hydrocarbures ou diméthylether	. reformulation nécessaire
conditionneurs	. reconfiguration installations . sécurité accrue nécessaire . à façon : - disparition des entreprises de petite taille . captif : - adaptation possible si ressources financières suffisantes - recours à la sous-traitance dans le cas contraire	. à façon : disparition des plus petits sauf accords avec emballeurs . captif : adaptation ou sous-traitance
distribution	. mesures de sécurité accrues pour stockage	. modification du stockage et de l'occupation des linéaires

Selon M. DESRUET ⁽³⁵⁾, l'investissement de conversion atteint 2 millions de F par million de boitiers, soit une dépense de 1,5 milliard de francs pour la conversion totale.

5.1.2.2. Les aérosoliers français devancent l'évolution de la réglementation

La quasi-totalité des entreprises impliquées dans le travail des aérosols se sont rassemblés en 1958 au sein du Comité Français des Aérosols qui regroupe à l'heure actuelle quatre-vingt-seize sociétés représentant tous les secteurs d'activités de l'industrie des aérosols.

Début 1980, un règlement de la CEE impose une réduction de 30 % d'utilisation des CFC dans les aérosols. Le 3 juillet 1980, le Comité Français des Aérosols signe avec le Secrétaire d'Etat chargé de l'Environnement une convention selon laquelle l'Industrie française des aérosols s'engage à réduire d'au moins 30 % son utilisation de CFC-11 et 12 dans les aérosols.

En application de la Convention de Vienne et du Protocole de Montréal, le Comité Français des Aérosols a signé avec le Secrétariat d'Etat chargé de l'Environnement et le Ministre de l'Industrie la convention du 7 février 1989.

Cette convention prévoit :

- une réduction d'au moins 90 % au 31 décembre 1990 du niveau d'utilisation des CFC dans les aérosols par rapport au niveau atteint en 1976,
- une limitation de l'utilisation des CFC aux usages dits essentiels et l'engagement de la Profession pour que les quantités utilisées pour ces usages ne dépassent pas 5 % de la consommation totale de 1976.
- l'apposition sur tous les aérosols sans CFC d'une étiquette et d'un logo-type assorti de la mention "préserve la couche d'ozone".

Le Comité Français des Aérosols indiquait le 3 avril 1990, par la voix de son Président ⁽³⁵⁾, qu'au 31 décembre 1989, la diminution enregistrée atteignait 80 % par rapport à 1986 : "pour nous le problème des CFC n'est plus un problème."

5.1.2.3. Les choix techniques et leurs prolongements

La réduction des utilisations de CFC s'est effectuée principalement par l'introduction de produits de remplacement en France, et en particulier les hydrocarbures propane et butane, ainsi que le diméthyléther.

Le tableau 49 présente les solutions adoptées à l'heure actuelle avec leurs avantages et inconvénients ainsi que celles que l'on peut envisager pour l'avenir.

Tableau 49 : La réduction des CFC et les solutions de remplacement des aérosols (19) et (35)

	Produits ou technologies	Applications	Avantages/inconvénients
<u>Situation avant 1980</u>	CFC-11 CFC-12	Cosmétiques et produits d'entretien	Un seul inconvénient : dégradation de la couche d'ozone et participation à l'effet de serre
	CFC-11 CFC-12 CFC-114	Pharmacie et produits techniques	
	CFC-114	Parfumerie	
<u>Situation actuelle</u>	butane, propane, isobutane, diméthyléther (DME)	Tous usages sauf aérosols d'inhalations médicales et certains produits alimentaires	Inflammable mais petites quantités dans des boîtiers
	Pompes mécaniques	Parfumerie	Oxydation par l'air des arômes
	CFC-11 CFC-12 CFC-114	Pharmacie	Dégradation de la couche d'ozone
<u>Possibilités supplémentaires pour l'avenir</u>	Mélange HCFC 22/142 b HCFC 152a (Etats-Unis)	Parfumerie	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilité meilleure qu'hydrocarbures et DME • Tests toxicologiques non terminés
	HFC -134a HFC-152a	Produits pharmaceutiques	

Selon M. DESRUET ⁽³⁵⁾, les professionnels regrettent de n'avoir pu faire une conversion directe CFC/substituts HCFC, HFC. Notamment, le HCFC-22 et surtout ses mélanges avec le HCFC-142b présentent de nombreux avantages techniques. Pour le domaine des aérosols inhalés, seuls les HCFC-142b et le HFC-152a pourraient remplacer les actuels CFC-11, 12 et 114.

En tout état de cause, il ne semble pas que les futurs HCFC et HFC soient en mesure de reprendre une part importante de l'ancien marché des CFC. Tout au plus évalue-t-on à quelques milliers de tonnes les perspectives de marché pour les HCFC et les HFC dans le secteur des aérosols. La raison en est que l'opération de bannissement peut être considérée comme terminée. Seuls les usages essentiels

(pharmacie) demeurent sans réponse immédiate mais les solutions techniques ne devraient pas tarder à apparaître.

Une certaine attention doit être accordée toutefois aux usages essentiels. Les Etats-Unis ont donné l'exemple d'une définition insuffisamment stricte des usages essentiels pour les aérosols et d'une augmentation progressive des emplois de CFC pour ces usages, dont le nombre s'est multiplié au cours du temps jusqu'à correspondre à une quantité de 15 à 20.000 tonnes à l'heure actuelle.

La récupération, enfin, ne semble pas à négliger notamment pour les stocks d'inventus. Une société française a mis en place avec succès cette activité. Les grands de la distribution pourraient être mobilisés à cet égard dans le cadre de leur implication dans le retraitement des déchets.

5.2. LE DOMAINE DU FROID

On entend par domaine du froid, celui des fluides frigorigènes, les mousses d'isolation thermique étant traitées dans le domaine des mousses.

5.2.1. Données de consommation

Le secteur du froid est celui dans lequel la réduction de l'utilisation des CFC est le moins avancé, compte tenu de différents facteurs :

- l'importance du parc installé et l'absence de substitut HCFC et HFC ou de produit de remplacement, que l'on puisse mettre directement "dans les réservoirs" (drop-in) sans modification technique,
- l'absence de fluide de substitution(HCFC ou HFC) dont toutes les spécifications d'utilisation soient connues,
- la prise en charge de l'effort de réduction déjà effectué par les industries d'aérosols dans la plupart des pays signataires.

Les données de consommation mondiale de DUPONT sont présentées dans le tableau ci-dessous (9).

Tableau 50 : Estimation de la consommation de CFC pour le froid (9)

	Consommation totale de CFC	Froid	
		En % de la consommation totale mondiale de CFC	Tonnes
1974	911.250	≈ 18	164.000
1988	1.129.500	≈ 30	340.000

Le domaine du froid est complexe et détaillé dans le tableau suivant :

Tableau 51 : La consommation mondiale de CFC dans les divers domaines du froid en 1986 (2) et (19)

	Part des différents domaines dans la consommation de CFC pour le secteur du froid
<u>Réfrigération</u>	40 %
dont domestique	1
artisanale et commerciale	24
industrielle (y compris transport) .	15
<u>Air conditionné</u>	60 %
dont domestique/commercial/	
industriel	16
automobile	44

Les consommations mondiales des principaux CFC utilisés dans le domaine du froid en 1988 étaient les suivantes selon la Chemical Manufacturers Association (7) :

CFC-11	31.000 tonnes
CFC-12	237.000 tonnes
HCFC-22 + R 502 (CFC-115 + HCFC-22) .	70.000 tonnes

Une caractéristique essentielle du domaine du froid est l'importance du parc installé mondial, dont la durée de vie est par essence relativement longue ⁽²⁾

Monde	. nombre de réfrigérateurs/congérateurs domestiques installés	610 millions
	. nombre d'installations pour le stockage au froid	120 millions
	. nombre de véhicules utilitaires réfrigérés	100 millions
	. nombre voitures de tourisme climatisées	150 millions
	. quantité de CFC dans installations actuelles	1.000.000 tonnes
	. durée de vie installations commerciales et industrielles dans les domaines de la réfrigération et de la climatisation	entre 7 et 20 ans

La durée de vie des installations commerciales et industrielles est une donnée particulièrement importante du problème de la réduction des utilisations de CFC dans le domaine du froid.

Les installations existantes ne peuvent être interdites sans conséquences financières graves pour les agents économiques. Or leurs durées de vie sont importantes : à titre de comparaison, selon M. WROBEL ⁽³⁶⁾, un compresseur de réfrigération a une durée de vie moyenne de 40.000 heures de fonctionnement, environ, contre 3.000 heures au maximum pour un moteur à piston de véhicule automobile.

Signalons, que les installations existantes fonctionnant avec des CFC ne peuvent recevoir les HCFC et les HFC qu'au prix de modifications techniques très importantes et très coûteuses, ce qui condamne pratiquement de telles solutions et renvoie à celle d'un changement complet des compresseurs et d'échangeurs.

Il est, par ailleurs, nécessaire de préciser que la climatisation n'est encore véritablement développée qu'aux États-Unis et au Japon. Ces deux pays réaliseraient à eux deux les deux tiers de la consommation mondiale de CFC pour le conditionnement d'air soit environ 40 % de la consommation mondiale totale pour la réfrigération et le conditionnement d'air ⁽²⁾.

Un autre point doit être noté : la réfrigération domestique ne représente qu'une part faible (1 %) de la consommation mondiale de CFC du secteur du froid. Si le marché correspondant est un marché de

renouvellement dans les pays industrialisés, en revanche ce marché croit de 10 à 15 % par an dans les Pays en Voie de Développement.

La consommation de CFC pour le froid est, comme on l'a vu, relativement faible en France par rapport à d'autres pays : environ 15 à 20 % en 1989 de la consommation totale de CFC soit approximativement entre 7.000 et 10.000 tonnes.

La réfrigération domestique est un secteur arrivé aujourd'hui à maturation, avec un taux d'équipement des ménages de 99 %. Le parc installé est compris entre 20 et 25 millions d'unités.

La réfrigération commerciale et industrielle connaît un fort taux de croissance, de l'ordre de 12 %.

L'air conditionné commercial ou industriel est encore peu développé en France mais pourrait connaître une forte croissance. Le parc automobile français est équipé en conditionnement d'air seulement à hauteur de 10 à 15 %.

Une caractéristique importante de la consommation de CFC dans le secteur du froid est que 80 % des quantités utilisées sont mises en oeuvre par les installateurs-réparateurs, les 20 % restant étant utilisés par les fabricants de matériel.

5.2.2. De nombreux intervenants, rassemblés en France dans la convention du 7 février 1989

La filière du froid fait intervenir de nombreux intervenants. Il faut à cet égard distinguer les constructeurs, les distributeurs, les assembleurs, les installateurs et les réparateurs.

Le tableau 52 donne quelques éléments de base concernant la filière française du froid.

Tableau 52 : Eléments sur la filière française du froid (2), (3), (20) et (27)

	Réfrigérateur/conditionnement d'air domestique/commercial/industriel
<u>Fabricants de matériels</u>	<ul style="list-style-type: none"> . compresseurs petite puissance : Carrier (USA) (filiale : Trane) et York (USA) ; filiales et licenciés en France . compression moyenne puissance : USA et Japon, . fabricants français moyenne-grande puissance : CEAT, QUIRI, . autres entreprises françaises : Maneurop (brevets GE), l'Unité hermétique (licences Tecumseh) . marché mondial et hautement concurrentiel
<u>Fabricants de fluides</u>	<ul style="list-style-type: none"> . fournissent directement les grands utilisateurs, . ATOCHEM, DUPONT, ICI,
<u>Distributeurs de fluides</u>	<ul style="list-style-type: none"> . fournissent les petits et moyens utilisateurs . PRIMAGAZ : 24 % du marché (distributeur exclusif de DUPONT) . DEHON : <ul style="list-style-type: none"> - 73 % du marché (distributeur exclusif d'ATOCHEM) - 20 à 25.000 tonnes de CFC traitées par an - investissement de 10 millions de F en 1989 pour une unité de recyclage
<u>Distributeurs de matériels de froid</u>	<ul style="list-style-type: none"> . domestique : <ul style="list-style-type: none"> - grandes surfaces généralistes ou spécialisées - artisans/commerçants . industriel et commercial : <ul style="list-style-type: none"> - quelques entreprises
<u>Bureaux d'études</u>	<ul style="list-style-type: none"> . rôle important pour les installations de moyenne ou grande capacité
<u>Assembleurs</u>	<ul style="list-style-type: none"> . domestique (1989) : <ul style="list-style-type: none"> - SELNOR (Thomson Electro ménager) : 30 % du marché - Electrolux : 15 % ; Philips-Whirlpool : 14 % ; Ariston : 3 % ; BSHG : 2,8 % ; autres : 40 % . commercial : <ul style="list-style-type: none"> - Froid Satam Brandt et Bonnet réfrigération (filiale groupe italien Elfi) représentent 60 % du marché . industriel : <ul style="list-style-type: none"> - grands fabricants intégrés vers l'aval - nombreux assembleurs de petite taille
<u>Installateurs-frigoristes</u>	<ul style="list-style-type: none"> . entre 2.500 et 3.000 entreprises en France . 90 % emploient moins de 10 salariés . 3 seulement ont un effectif supérieur à 50 salariés
<u>Réparation maintenance</u>	<ul style="list-style-type: none"> . les installateurs/réparateurs assurent 80 % de la consommation totale de CFC du secteur (20 % par les fabricants et assembleurs)

La multitude des intervenants rend particulièrement complexe le problème de la transition.

Une convention entre le Secrétaire d'Etat à l'Environnement, le Ministre de l'Industrie et l'ensemble des professions concernées a toutefois été signée le 7 février 1989 et comporte les dispositions suivantes :

- en prenant comme référence la consommation de CFC de l'année 1986 dans la réfrigération et le conditionnement d'air, le niveau de consommation de CFC visés par le Protocole de Montréal passera par les étapes ci-dessous :

120 %	au 1er janvier 1989
100 %	au 1er janvier 1993
80 %	au 1er janvier 1999

- les professions s'engagent à améliorer le confinement, la récupération, le recyclage ou la destruction des CFC visés ; une charte est annexée à la convention et concerne «les mesures à prendre concernant la conception, l'étude, l'installation, l'exploitation, la maintenance des installations de froid et de climatisation et la formation des personnels» ;
- l'industrie s'engage à perfectionner les installations de transvasement, éliminer les emballages de remplissage dits "tubes monteurs", de manière à réduire les émissions de CFC
- une étiquette sera apposée sur les installations contenant les CFC visés, indiquant : «cette installation contient un fluide qui peut appauvrir la couche d'ozone. Eviter tout rejet dans l'atmosphère. Récupérer ce fluide en vue de son recyclage : cette opération doit être réalisée par un professionnel qualifié.»

Selon l'opinion d'un très grand nombre d'organisations professionnelles de la branche, la convention du 7 février 1989 et la charte qui y est annexée sont d'excellents points de départ. Les éventuelles mesures à prendre pour faciliter son succès ou accélérer le calendrier d'objectifs devraient aller dans le sens ainsi défini.

Il reste que des voies précises doivent être trouvées pour obtenir les premiers résultats.

5.2.3. Les options techniques et leur validité pour l'avenir

Comme pour l'ensemble des problèmes posés par l'application du Protocole de Montréal, trois voies sont possibles pour répondre aux impératifs introduits par ce dernier : l'utilisation de substituts HCFC et HFC, les produits de remplacement, les technologies alternatives et les économies d'utilisation.

Avant de détailler ces différentes voies, une constatation doit être faite, en conclusion des auditions pratiquées avec la quasi-totalité des organisations représentatives du secteur du froid : il est nécessaire d'accélérer le changement dans cette industrie.

5.2.3.1. Informer et impulser

La transition vers des technologies sans CFC ne s'effectuera pas sans une amélioration sensible de l'information des différents intervenants de la filière froid à la fois sur les enjeux et les impératifs du Protocole de Montréal et sur les moyens techniques nécessaires pour s'y conformer.

Il est indispensable qu'une collaboration étroite rassemble les producteurs de substituts HCFC et HFC, les firmes chimiques spécialisées dans les additifs, avec les différentes professions ou industries connexes. Il sera ensuite nécessaire de communiquer des lignes d'action claires aux organisations professionnelles concernées.

5.2.3.2. Substituts, produits de remplacement et technologies alternatives

Le tableau 53 présente une synthèse rapide des produits de substitution ou de remplacement et des technologies alternatives, en distinguant une situation transitoire et une situation à long terme.

S'agissant des substituts, il apparaît clairement que le HCFC-22, déjà connu et commercialisé, constitue une solution envisageable dans de nombreux cas, notamment le froid commercial avec le minimum de changements techniques -le remplissage direct des anciennes installations avec du HCFC-22 n'étant toutefois pas possible.

Tableau 53 : Le remplacement des CFC dans la réfrigération, la climatisation et les pompes à chaleur (2), (3), (17), (18) et (20)

	Situation actuelle	Situation transitoire		Situation à long terme	
		Produits/ Technologie	Remarques	Produits/ Technologies	Remarques
<u>Réfrigération Domestique</u>	CFC 12 HCFC 22	HCFC 134a HCFC 22	accroissement de consommation d'énergie tests non terminés buites non trouvées compresseurs non certifiés	HFC 134a HFC 152a mélange ternaire absorption/adsorption	accroissement consommation énergie inflammable pays ensoleillés, ou sans réseau électrique dont Pays en Voie de Développement
Commerciale (y compris transport)	CFC-12 (-20°C) HCFC-22 (-35°C) CFC-502 (-45°C)	HCFC-22 HCFC-123	tests toxicité non achevés	HFC-134a mélange ternaire	tests techniques encourageants
Industrielle	CFC-12 HCFC-22 CFC 502 NH ₃	NH ₃ Mel 22 + 142b HCFC-22 NH ₃ Mel 22 + 142b	(avec réseaux frigoporteurs pour les installations fixes) 142 b réputé inflammable installations fonctionnant déjà au HCFC-22 et au NH ₃ inchangées 142b réputé inflammable	NH ₃ HFC-125 NH ₃	(avec réseaux frigoporteurs installations fixes) tests toxicologiques non achevés avec réseaux frigoporteurs
<u>Climatisation Domestique</u>	HCFC-22	HCFC-22	Fuites à réduire	HCFC-125 HCFC-134a absorption/adsorption	Pays ensoleillés, Pays en Voie de Développement
Automobile	CFC-12	HCFC 142b HFC-134a Mel HCFC-22 + HCFC 142 b + HFC-134a	les 2/3 de la consommation sont dus aux fuites	HCFC-134a absorption/ adsorption	Tous pays
Commerciale industrielle	CFC-11 CFC-12 HCFC-22 CFC-500 CFC-502	HCFC-22 HCFC-123 HFC-134a	Tests encourageants	HFC 125 HFC-134a	
<u>Pompes à chaleur</u>	CFC-12 (85°C) HCFC-22 (60°C) CFC-114 (130°C)	HCFC-22	Pas de remplaçant pour CFC-12 et CFC-114 pour le moment	absorption/adsorption	Tous pays

Le HCFC-22 n'est pas menacé à court terme, de même que le HCFC-142b et représente donc une solution sérieuse pour les années à venir. Le mélange HCFC-22 + 142b devrait s'imposer dès que les compagnies d'assurance l'auront agréé, après avoir constaté que, si le HCFC-142b est inflammable, le mélange HCFC 22 + 142b ne l'est pas ⁽²⁰⁾.

L'ammoniac, par ailleurs, est utilisable et présente de grandes qualités : coût peu élevé et efficacité énergétique supérieure à celle du CFC. Les nouvelles installations pourraient trouver un avantage de durée de vie prévisible sans restriction réglementaire, en étant conçues sur le principe d'un isolement des locaux techniques et du recours à des réseaux frigoporteurs.

Il est clair enfin que le produit fondamental pour le secteur du froid devrait être à l'avenir le HFC-134a si toutefois, il franchit les tests de toxicologie sans encombre, si l'on parvient à trouver des huiles miscibles et si l'adaptation des compresseurs se fait sans difficulté. Son introduction suppose une adaptation des compresseurs et des échangeurs du fait de caractéristiques thermodynamiques différentes de celles des CFC-11 et 12. Il semble que tous les constructeurs de réfrigérateurs du commerce testent actuellement des compresseurs fonctionnant au 134a ⁽²⁷⁾.

Les HCFC-22 et 142b représenteraient actuellement 30 % des quantités de CFC/HCFC utilisées dans le secteur du froid.

En l'an 2000, ce sont 60 % des usages actuels qui pourraient être satisfaits par l'ensemble des HCFC et du HFC-134a.

Les technologies alternatives sans CFC ou substituts ont été placées, dans le tableau 53, dans la colonne situation à long terme. Il est vrai que, compte tenu des délais de mise en production industrielle, les solutions détaillées dans le II B ci-dessus ne peuvent être industrialisées en une seule année. Toutefois, ces technologies pourraient, en cas de décision positive des industriels du froid, représenter des marchés importants dans des délais brefs.

Il appartient aux professionnels du froid et à l'ensemble des organisations représentatives de tous les maillons de cette filière industrielle, de rassembler leurs moyens de recherche et d'étude et de se doter d'une communication dynamique sur la nécessité d'aller de l'avant rapidement pour réduire des usages de CFC et de moyens suffisants pour emporter l'adhésion de l'ensemble des intervenants.

5.2.3.3. Confinement, récupération et recyclage : l'importance de la formation

Les différents principes du confinement, de la récupération et du recyclage ont été décrits précédemment.

Il est capital de faire des progrès dans ce sens. En effet, selon M. BRIAN ⁽³⁷⁾, la consommation de CFC pour la seule réfrigération s'élèverait à 6.500 tonnes environ dont 4.000 tonnes pour les CFC visés par le Protocole de Montréal.

Or, le taux de recharge serait de 40 à 50 % soit environ 3.000 tonnes, recharges entraînées par des dégâts, incidents, maladresses ou autres causes. Ces recharges sont elles-mêmes souvent précédées par des vidanges, qui, en l'état actuel des choses, ne sont pas assorties de récupération.

Compte tenu de cette situation, des normes techniques pourraient être introduites par la France seule ou au niveau européen dans les domaines suivants :

- augmentation de l'épaisseur des parois des échangeurs accessibles aux utilisateurs,
- élimination des raccords par joints ; normes de qualité pour soudures et brasures,
- détecteurs de fuites obligatoires sur les installations de moyenne et grande puissance,
- révisions/entretien périodiques obligatoires pour les installations de moyenne ou grande puissance,
- utilisation de compresseurs hermétiques obligatoire pour certaines installations,
- présence obligatoire de vannes de récupération sur les installations,
- utilisation de fluides de vidanges autres que les CFC,
- insertion dans le cahier des "règles de sécurité sur les installations frigorifiques" (CEN) de toutes les dispositions ci-dessus concernant le confinement et la récupération,
- application de cet ensemble de règles - déjà appliquées dans les marchés publics - aux marchés privés,
- application de ces normes à tous les produits vendus sur le marché national.

La récupération des réfrigérateurs domestiques doit être continuée et amplifiée, car, si les quantités collectées sont réduites pour le moment (160 tonnes de CFC au total pour Paris et Lyon), son rôle en terme de sensibilisation et d'éducation est essentiel.

Le parc installé est de 20 à 25 millions de réfrigérateurs en France ; une sensibilisation accrue du public pourrait conduire à un accroissement rapide des quantités collectées. La grande distribution - généraliste ou spécialisée- doit être impliquée dans le processus de récupération (incitation ou obligation).

Mais la limitation principale des rejets ne peut provenir que des installations commerciales et industrielles.

L'efficacité dans ces domaines exige d'autres mesures portant sur les hommes et les entreprises du secteur et venant en prolongement de la charte annexée à la Convention du 7 février 1989.

Les mesures suivantes pourraient être envisagées :

- augmentation des moyens de formation aux sciences et techniques du froid : renforcement des institutions actuelles, création de nouvelles,
- examen de qualification professionnelle pour les responsables techniques d'entreprises de réfrigération/climatisation,
- formation aux techniques de récupération/recyclage,
- formation aux nouvelles technologies sans CFC et octroi d'un diplôme en fin de cycle de formation pour les personnels des assembleurs/utilisateurs,
- label de qualité pour les entreprises d'installation et de maintenance,
- certificats d'étanchéité donnés après l'installation,
- aides pour le financement des équipements de récupération achetés par les PMI/PME (coût : entre 10 et 60.000 F),
- "permis de conduire" pour les grosses installations de réfrigération/climatisation : formation et examen.

5.3. MOUSSES

5.3.1. Données de consommation

Le tableau 54 présente les estimations de DUPONT pour les consommations de CFC pour la fabrication de ces mousses (9).

Tableau 54 : Estimations de consommation de CFC pour la fabrication des mousses (9)

	Consommation mondiale totale de CFC	Mousses	
		En % de la consommation totale mondiale de CFC	Tonnes
1974	911.250	≈ 5	45.000
1988	1.129.500	≈ 28	316.000

Selon ATOCHEM (10), la répartition de la consommation mondiale de CFC à l'intérieur du secteur mousse est la suivante :

Polystyrène plaques	7 %
Polystyrène fluides	8 %
Polyoléfines	5 %
Mousses phénoliques	1 %
Mousses polyuréthanes rigides (isolation)	49 %
Mousses polyuréthanes souples	23 %
Divers polyuréthane	7 %

Les principaux CFC utilisés en 1988 pour les mousses à cellules ouvertes (mousses souples) et les mousses à cellules fermées (mousses rigides), selon la Chemical Manufacturers Association (7), sont indiqués dans le tableau 55.

Tableau 55 : Consommation mondiale de CFC dans les mousses (7)

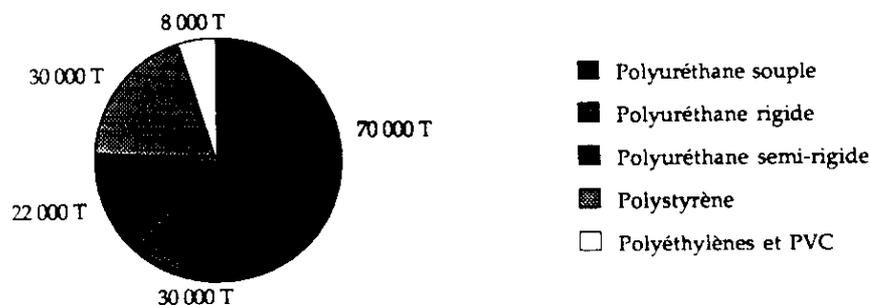
	Mousses à cellules ouvertes (tonnes)	Mousses à cellules fermées (tonnes)	Total (tonnes)
CFC-11	77 045	165 982	243 027
CFC-12	9 584	59 413	69 997
Total	86 629	224 395	313 014

La quasi-totalité des CFC utilisés en 1988 dans le monde pour la fabrication des mousses étaient des produits visés par le Protocole de Montréal.

La consommation de CFC, en France, pour la fabrication des mousses est évaluée à hauteur de 10.000 tonnes en 1986, avec une marge d'incertitude très grande (± 3.000 tonnes) selon les auteurs. Un fait est sûr : une augmentation rapide de la consommation est intervenue entre 1976 et 1986, avec un quasi-doublement.

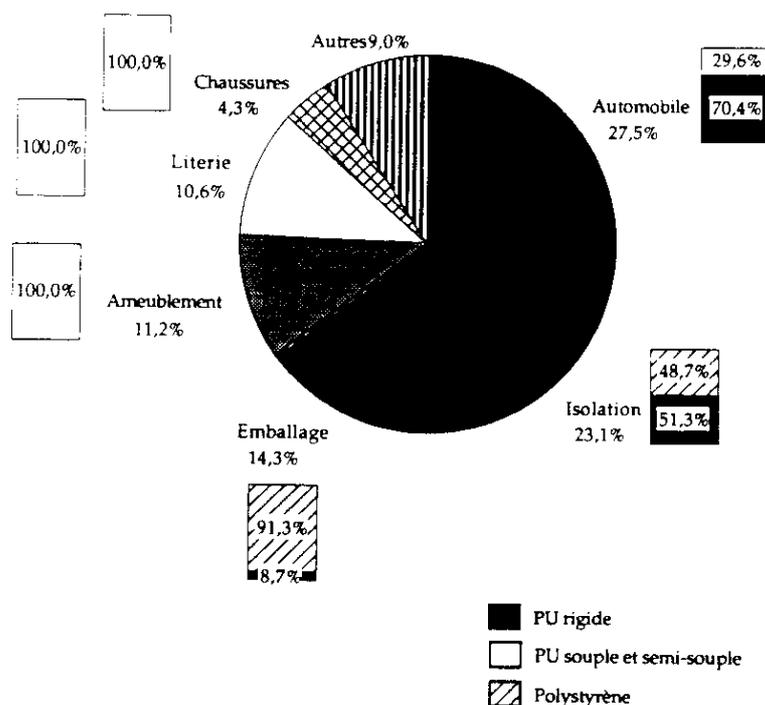
La production totale de mousses était en France, quant à elle, d'environ 160.000 tonnes en 1988. La répartition des différents types de mousses est présentée dans le graphique 14 par catégorie de mousses (3).

Graphique 14 : Production française de mousses fabriquées avec des CFC, en 1988, par types de mousses (3)



Le graphique 15 donne la répartition de la consommation de mousses en France par types d'utilisations.

Graphique 15 : Consommation française de mousses par types d'utilisations (3)



5.3.2. Les intervenants de la filière française des mousses et la convention du 7 février 1989

La filière de la fabrication des mousses est composée de plusieurs types d'intervenants et d'un grand nombre d'utilisateurs finals :

1- Fabricants des matériaux de base :

- fabricants de matières plastiques ; dans le cas des polyuréthanes par exemple, qui représentent environ les deux tiers des tonnages de mousses fabriquées, on trouve les fabricants de polyols comme Dow, ICI, Bayer, Rhône-Poulenc.

Dans le cas des mousses phénoliques, on trouve les mêmes fabricants auxquels viennent s'ajouter d'autres entreprises :

- fabricants d'additifs : pour les polyuréthanes, le principal additif est l'isocyanate ; on utilise également divers agents de durcissement, de catalyse, etc... Les fabricants d'additifs ne sont

pas toujours les mêmes que les fabricants des matériaux de base,

• fabricants d'agents moussants : ce sont les gaz du type CFC qui permettent l'expansion des mousses et peuvent conférer des propriétés d'isolation thermique (CFC-12) ; il est là aussi rare que les fabricants de CFC soient ceux qui produisent les matériaux de base et les additifs.

2- Formulateurs

Ce sont les intermédiaires entre les fabricants des matériaux de base et les petits utilisateurs qui ne possèdent pas les compétences pour réaliser par eux-mêmes la définition des mélanges et leur préparation.

3- Transformateurs

Les transformateurs sont soit des utilisateurs finals, soit des fournisseurs de mousses utilisées dans différentes fabrications de produits finis. Au total, on estime à 250 le nombre d'entreprises produisant les différents types de mousses, employant environ 15.000 personnes ⁽²⁾.

L'ensemble des professions concernées par les mousses ont signé le 7 février 1989 avec le Secrétaire d'Etat à l'Environnement et le Ministre de l'Industrie une convention qui comprend les dispositions suivantes :

- en prenant comme référence l'année 1986 pour la consommation de CFC visés par le Protocole de Montréal, les consommations seront les suivantes :
 - 125 % à compter du 1er janvier 1989
 - 100 % à compter du 1er janvier 1993
 - 80 % à compter du 1er janvier 1999
- le confinement et la mise en oeuvre de substituts seront assurés le plus rapidement possible.

5.3.3. Les options techniques et leur avenir

Les mousses plastiques peuvent être classées par type de matières utilisées : les plus importantes en termes de débouchés sont les polystyrènes expansés ou extrudés, les mousses de polyuréthanes, les mousses de chlorure de polyvinyle et les phénoliques.

On distingue également les mousses rigides des mousses souples. Les mousses à cellules fermées sont telles que l'agent

d'expansion est piégé dans les alvéoles (cet agent gazeux peut également être un isolant thermique) ; les mousses à cellules ouvertes voient l'agent d'expansion s'échapper rapidement à l'extérieur de la mousse.

Le tableau 56 (3) indique les principaux usages des différentes mousses plastiques utilisant des CFC.

Tableau 56 : Les familles de mousses et leurs utilisations (3)

Type de mousses	Secteurs utilisateurs
<ul style="list-style-type: none"> ● <u>Polystyrènes</u> - expansé - expansé extrudé 	emballage/froid isolant thermique
<ul style="list-style-type: none"> ● <u>Mousses de polyuréthane (PU)</u> rigides - semi rigides - souples 	panneaux sandwich tuyauterie précalorifugée appareils électro-ménagers automobile matériels de sport automobile ameublement literie, textiles
<ul style="list-style-type: none"> ● <u>Autres types de mousses</u> - polyéthylène expansé - mousses phénoliques mousses de chlorure de polyvinyle (PVC) 	bâtiment, marine froid, isolation industrielle

La fabrication des mousses requiert un savoir-faire relatif à différents domaines technologiques :

- la chimie des produits de base disponibles ainsi que celle des agents d'expansion, catalyseurs, additifs divers,
- les procédés de fabrication : in-situ, par blocs, par coulée continue.

A cet égard, les propriétés des mousses font partie intégrante des procédés de fabrication des produits dans lesquels elles interviennent ⁽³⁸⁾.

Ainsi dans le cas des réfrigérateurs domestiques ⁽²⁷⁾, les mousses de polyuréthane permettent la cohésion de pièces métalliques et assurent la rigidité des appareils.

De la même façon, dans le cas des matériaux du type panneaux-sandwiches (parements métalliques pour bâtiments industriels - bardage et couverture-) ⁽³⁹⁾, les polyuréthanes collent entre elles les deux plaques de métal extérieures.

Les panneaux-sandwiches d'isolation des camions frigorifiques voient la densité du polyuréthane qu'ils comprennent fixée de manière à assurer un certain coefficient d'isolation pour une épaisseur qui elle résulte de contraintes mécaniques (rigidité) et de contraintes d'encombrement (nombre de palettes en largeur) ⁽⁴⁰⁾.

Toute modification de l'un des paramètres de la fabrication des mousses doit nécessairement être compensée par une modification des autres paramètres pour parvenir à une qualité constante.

Toute modification de nature du CFC utilisé, son remplacement par un autre produit, conduisent de fait à des modifications des conditions de fabrication et de propriétés des mousses. Les quelques exemples suivants sont illustratifs :

- lors de la fabrication des mousses de polyuréthane souples à cellules fermées, le CFC-11 joue le rôle d'agent d'expansion ; mais ce produit volatil s'évapore et ce faisant refroidit la mousse,
- le remplacement du CFC-11 par de l'eau est possible pour fabriquer des polyuréthanes, puisque l'eau réagit avec l'isocyanate pour donner du CO₂ ; mais dans ce cas, l'on obtient des mousses plus dures, ce qui peut convenir à certaines applications mais pas à d'autres, en l'état donné d'un certain marché ⁽³⁸⁾.
- les panneaux sandwichs doivent être étudiés et agréés pour leur résistance au feu et leur capacité d'isolation pour le froid ⁽³⁹⁾ ; toute modification des caractéristiques des mousses peut entraîner un changement de propriétés dont les conséquences peuvent être importantes pour leurs spécifications et leurs classifications techniques.

Le tableau 57 suivant présente, pour les différentes catégories de mousses, les différentes solutions actuelles et futures, envisagées pour le remplacement des CFC.

Tableau 57 : La réduction des CFC et les solutions de remplacement dans le secteur des mousses (5), (16), (17), (19), (38) à (40)

	Situation actuelle	Situation transitoire		Situation à long terme	
		Produits/ technologies	Remarques	Produits/ technologies	Remarques
<u>Polystyrène expansé (PSE)</u> · mousses rigides à cellules fermées · isolation (BTP) · emballage · froid	Expansion avec vapeur d'eau de billes de PSE contenant du pentane (pas de CFC)	idem	-	idem	-
<u>Polystyrène expansé extrudé (PSEE)</u> · mousses semi-rigides à cellules fermées · isolation (BTP) · emballage	CFC-11 CFC-12	Pentane, butane ----- HCFC-22 ----- HCFC-141b ----- Mel. HCFC-22 + 142b HCFC-142b	inflammables ----- légèrement inflammable ----- légèrement inflammable	HCFC-123 HCFC 124 HFC-134a	Tests de toxicologie non achevés
<u>Polyvinyles (PVC)</u> · mousses à cellules fermées souples ou rigides · isolation (BTP)	CFC-11 CFC-12	-	plus de fabrication en France prévue à terme	-	-
<u>Phénoliques (P¹)</u> · cellules fermées · marine, BTP	CFC-11 CFC-113 CFC-11 + 113	Pentane HCFC-141b HCFC-123	inflammable lgt inflammable	-	-
<u>Polyuréthanes rigides (PUR)</u>	CFC-11 CFC-12	CO ₂ CFC-11 + CO ₂ ----- HCFC-22 HCFC-123 ----- HCFC 141b	Mélange CFC-11 et CO ₂ en proportions variables possible Economies d'utilisation par rapport au CFC 11	-	-
<u>Polyuréthanes souples (cellules ouvertes)</u>	CFC-11	Chlorure de méthylène HCFC-22 HCFC-123 HCFC 141b	lourdes contraintes d'utilisation pour le chlorure de méthylène	HCFC-134a	tests de toxicologie non achevés
<u>Polyuréthanes à peau intégrée</u>	CFC-11	H ₂ O HCFC 22 HCFC-141b	-	-	-

Le champ des possibilités apparaît ainsi extrêmement ouvert. Les producteurs de CFC, en liaison avec les fabricants de matériaux

chimiques de base ou d'additifs, développent leurs propres solutions. Ainsi DUPONT semblerait vouloir promouvoir des mélanges comme le mélange HCFC-123 + 141b. ATOCHEM étudierait particulièrement les mélanges HCFC-22, 141b ou 142b.

Les fabricants de réfrigérateurs ont tous engagé un effort sensible de réduction de l'utilisation des CFC pour la fabrication des mousses d'isolation.

Ainsi SELNOR ⁽²⁷⁾ a, en un an, diminué de 50 % la quantité de CFC utilisés avec le processus suivant :

- la situation initiale était celle-ci : pour les mousses d'isolation d'un réfrigérateur ménager de capacité moyenne, 1 kg de CFC était utilisé (750 g de CFC-11 destiné à expander la mousse, 250 g de CFC-12 destiné à conférer à la mousse ses propriétés isolantes),
- la réduction de la quantité de CFC totale a été obtenue en réduisant de plus de la moitié la quantité de CFC-11, en le remplaçant en partie par de l'eau, dont on sait qu'elle réagit avec l'isocyanate pour produire du CO₂.

Les voies d'avenir paraissent être, pour M. BRU ⁽²⁷⁾, le HCFC-123 sur lequel les industriels fondent de grands espoirs, le HCFC-22 et le HFC-134a paraissant moins intéressants. D'autres solutions sont néanmoins possibles (HCFC-141b, mélanges HCFC-123 et 141b proposés à l'avenir par DUPONT et ICI).

Une coopération triangulaire est en place entre les chimistes, les producteurs de CFC et les utilisateurs.

Plusieurs remarques peuvent être faites à cet égard :

- les marchés des HCFC iront aux producteurs qui auront la meilleure qualité de relation (conseil, assistance, test) avec les industries d'aval ; cette coopération est d'autant plus importante que l'utilisateur final dispose de peu de moyens de recherche et développement,
- il est nécessaire que les producteurs de CFC accélèrent la mise sur le marché des substituts, dans la mesure où les tests de toxicologie le permettent, de façon à rendre possible les changements de procédés de fabrication des mousses plastiques,
- les producteurs de CFC pourraient étendre leur coopération pour tous les aspects réglementaires de

l'utilisation des mousses et financer des recherches applicatives en commun,

- à tout le moins, chaque producteur de CFC devrait s'attacher à réduire les coûts d'adaptation des industries d'aval des mousses.

5.4. SOLVANTS

5.4.1. Données de consommation

Ainsi qu'il a été dit plus haut, les utilisations de CFC se sont multipliées ces dernières années dans le domaine des solvants, en raison de la croissance des industries électroniques et informatiques, de la mécanique de précision et de l'optique.

Le tableau 58 montre cette progression dans le monde entre 1974 et 1988, sur la base des estimations faites par DUPONT.

Tableau 58 : Evolution de la consommation de solvants CFC dans le monde (9)

	Consommation totale de CFC dans le monde	Solvants	
		En % de la consommation mondiale totale de CFC	En tonnes
1974	≈ 911.000	6	≈ 55.000
1988	≈ 1.130.000	19	≈ 215 000

Les CFC utilisés dans ce domaine sont les suivants :

CFC-113 (90 % de la consommation mondiale de CFC-solvants)

CFC-12 (10 % de la consommation mondiale de CFC-solvants ; utilisation comme diluant de l'oxyde d'éthylène, produit stérilisant)

ATOCHEM ⁽¹⁸⁾ donne des évaluations pour la répartition géographique de sa consommation pour le seul CFC-113, qui sont rassemblées dans le tableau 59.

Tableau 59 : Estimation de la consommation mondiale de CFC-113 (18)

	Monde	Etats-Unis	CEE	Japon
1986	200.000	73.000	40.000	80.000
1988	250.000	-	-	-
1989	-	80.000	52.000	80.000

L'utilisation qui était faite en 1988 des CFC dans le monde en tant que solvants se répartit de la manière suivantes ⁽²⁾ :

Electronique	40 %
Optique, aérosols industriels, etc	30 %
Mécanique de précision	25 %
Nettoyage à sec	5 %

Pour être complet sur le domaine des solvants, il faut inclure, comme le fera sans doute le Protocole de Montréal révisé, des composés comme le tétrachlorure de carbone et le méthylchloroforme (trichloro 1.1.1. éthane).

Les principales données concernant le **tétrachlorure de carbone** (CCl₄) sont les suivantes ⁽²⁾ :

Consommation mondiale en 1988	≈ 950.000 tonnes
Principales utilisation en 1988	. à 95 % fabrication des CFC-11 et 12 ; . autres applications (composant de pesticides, agent nettoyant, solvant) ; . produits toxiques ; . usages interdits ou réglementés en tant que solvant dans les pays suivants : Etats-Unis, Canada, Scandinavie, CEE.

Les principales données concernant le **méthylchloroforme** (CH₃CCl₃) sont les suivantes ⁽²⁾ :

Consommation mondiale en 1988	≈ 800.000 t (estimation ATOCHEM)
Consommations régionales en 1988	- Etats-Unis : 280.000 t - Europe de l'Ouest : 151.000 t - Japon : 151.000 t - Pays en Voie de Développement : 65.000 t
Principales utilisations	. nettoyage des métaux, des textiles (produit de remplacement du perchloréthylène et du

- trichloréthylène considérés comme toxiques);
- . additif dans les aérosols pour stabiliser et réduire l'inflammabilité des formules ;
- . agent d'expansion dans les mousses plastiques (utilisation résiduelle).

La consommation de CFC en tant que solvant en France est comprise entre 8.000 et 10.000 tonnes en 1988 ^{(2) et (3)}.

La répartition par usages du CFC-113 en France (les seules données précises sont relatives au CFC-113) est peu différente de la répartition mondiale ⁽²⁾ :

Electronique	40 %
Mécanique de précision	25 %
Optique, horlogerie	20 %
Nettoyage à sec	10 %
Chimie	5 %

Ainsi 85 % des utilisations françaises de CFC-113 correspondent à des usage de nettoyage industriel fin et 65 % de la consommation sont liés à des secteurs de haute technologie.

Les principaux utilisateurs de CFC-113 sont en France :

- les industries aéronautiques et spatiales : Aérospatiale, CNES, Matra Espace ;
- les industries électroniques et informatiques : IBM, Thomson, Matra Electronique ;
- l'industrie automobile : Renault, les grands équipementiers automobiles.

Le nombre d'entreprises françaises utilisant le CFC-113 est très important : environ 10.000 selon certaines estimations ⁽²⁾. La consommation est toutefois très inégalement répartie : quelques grandes entreprises assurent la majeure partie de la consommation, le restant étant le fait d'un très grand nombre de petits utilisateurs.

Le CFC-113 a des propriétés d'usage particulièrement précieuses : faible tension superficielle, ce qui lui permet de pénétrer dans des micro-failles ; évaporation rapide à température ambiante, ce qui permet d'éviter le séchage ; toxicité quasi nulle, d'où emploi à l'air libre dans la plupart des cas ; solvant non agressif qui dégraisse les surfaces sans les attaquer.

5.4.2. L'absence de convention de réduction des CFC-solvants en France

Les utilisateurs de CFC-solvants ne sont pas regroupés en France en tant que tels. Aucune convention n'a pu être signée entre le Gouvernement et les organisations professionnelles, faute de partenaires industriels.

Il est toutefois possible d'avoir une vue d'ensemble de l'utilisation du CFC-113 dans l'industrie aéronautique et spatiale, par l'intermédiaire du Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales (GIFAS)⁽²⁶⁾ qui a mené, dans le cadre de son groupe de travail physico-chimie, une réflexion sur la réduction des emplois de CFC-113 comme solvant.

Les autres industries utilisatrices n'ont pas confié, semble-t-il, à leurs organisations professionnelles le soin d'orienter leur action dans ce domaine. Ainsi, la Fédération des Industries Electriques et Electroniques semble laisser la responsabilité et l'initiative de la réduction aux entreprises elles-mêmes⁽⁴¹⁾.

Si on peut effectivement attendre des grandes entreprises une prise en charge totale et autonome de ce problème, cela ne saurait être le cas des PMI/PME qui sont nombreuses à utiliser le CFC-113, même si c'est généralement en faibles quantités.

Or, on peut s'attendre à ce que les grandes entreprises soient disposées, comme IBM aux Etats-Unis⁽³³⁾, à transférer gratuitement leur savoir-faire dans les produits de remplacement et les technologies alternatives, sinon à l'ensemble de la profession au moins à leurs sous-traitants ou clients.

Il faut donc impérativement, pour parvenir à bannir le CFC-113 des industries électroniques et informatiques, mettre en place une instance de coopération et d'information sur les technologies nouvelles, rassemblant les grandes entreprises et les PMI/PME de l'électronique et de l'informatique.

La situation est peu différente au sein de la Fédération des Industries métallurgiques et du Traitement des Métaux.

Il semble, en tout état de cause, nécessaire d'accélérer la prise de conscience des professions concernées par les enjeux de la réduction de l'utilisation des CFC en tant que solvant, tant sur le plan de l'environnement que sur le plan commercial. Ce dernier aspect apparaît à ne pas négliger.

On peut craindre, en effet, que les législations de certains pays en pointe dans le domaine de l'environnement, comme on l'a vu pour

les cas des États-Unis et de la RFA, mettent en place des obstacles à l'entrée sur leurs marchés pour les produits impliquant les CFC dans leur fabrication.

Certes, comme par exemple dans le cas de la RFA, de telles mesures devraient être compatibles avec la réglementation communautaire, ce qui n'est pas avéré dans le cas de normes nationales plus contraignantes que les normes communautaires dans le domaine de l'environnement.

Mais, dans le cas où des normes de ce type ne pourraient être acceptées au niveau international, ce serait l'image générale des entreprises sinon l'image de marque et le positionnement marketing des produits qui seraient alors mis en cause.

5.4.3. Les solutions techniques et leur avenir

En raison des difficultés à rassembler des informations précises sur les usages de CFC en tant que solvant dans l'industrie française, il est naturellement difficile de déterminer quelles solutions techniques ont été mises en place pour diminuer leur utilisation.

Le domaine des solvants est un domaine où la mise en oeuvre simultanée des trois options technologiques est particulièrement nécessaire.

5.4.3.1. Confinement, récupération et recyclage

Le premier progrès réalisable dans le domaine des solvants est la généralisation des machines de nettoyage automatiques, hermétiques et comprenant un dispositif de condensation, de récupération, de filtration et de recyclage physique. Ces machines représentent, d'après M. J. BOUYGUES ⁽²⁶⁾, un investissement de 100 à 500.000 F, variable selon la taille des pièces à traiter. Elles supposent en aval l'existence d'une possibilité de recyclage chimique approfondi destiné à purifier le solvant CFC-113.

D'autres machines peuvent être envisagées, avec un dispositif de purification intégré qui ne se justifie alors que si les quantités de pièces à traiter sont importantes.

Il semble que le marché de ce type d'équipement soit considéré comme prometteur par l'industrie japonaise.

Une difficulté dans ce type de solution provient du fait que les spécifications techniques des équipements sont liées aux

spécifications du CFC-113. Des produits différents, plus inflammables et plus explosifs ne pourraient convenir sans adaptation technique des équipements.

Une coopération triangulaire entre les producteurs de CFC et de substituts HCFC ou HFC, les industries mécaniques et les utilisateurs finaux est à l'évidence nécessaire.

5.4.3.2. Produits de remplacement, technologies alternatives et substituts HCFC et HFC

Les produits de remplacement et les technologies alternatives semblent constituer la voie la plus immédiatement empruntable. Viendraient ensuite des substituts HCFC, voire des HFC à échéance plus éloignée ⁽²⁾ :

- méthylchloroforme : intéressant pour l'industrie électronique mais probablement réglementé dans un avenir proche,
- trichloréthylène : utile pour le nettoyage des métaux et nettoyage à sec mais toxique,
- Mélanges CFC-113 + autres substances : cette solution est déjà proposée par certains producteurs (ils ont, comme avantage, de permettre une utilisation plus longue des stocks existants de CFC-113 si celui-ci venait à être interdit, mais, comme inconvénient, de constituer une solution transitoire) ; exemple SMT (CFC-113 + dichloréthylène + méthanol) et MCA (CFC-113 + trichlorométhylène) de DUPONT,
- eau + détergent : cette solution semble étudiée dans l'industrie informatique et est opérationnelle,
- eau + hydrocarbure (dont terpène) : solution opérationnelle ou proche de l'être (AT & T et Petrofirm - États-Unis),
- Mélanges HCFC-141b, méthanol et nitrométhane "Genesolv 2000" d'Allied Signal ; mélanges à base de HCFC-141b d'ATOCHEM,
- Mélanges HCFC-123 et 141b : en cours de tests, commercialisés dès que les tests de toxicité seront terminés avec une issue favorable (mélanges KCD de DUPONT),
- HCFC-225ca et 225cb : mélanges proposés par Asahi Glass (Japon) pour certains types d'usages.

Dans certains cas, un renforcement des propriétés de solvabilité devra être obtenu par la mise en oeuvre de procédés physiques comme les ultra-sons. L'utilisation des mélanges aqueux doit nécessairement s'accompagner du traitement des effluents avant leur rejet dans les réseaux de collecte.

5.5. HALONS

5.5.1. Données de consommation

Le tableau suivant présente les chiffres de production et d'utilisation des halons, ainsi que le montant cumulé des stocks.

Tableau 60 : Production et utilisation des halons en 1986 dans le monde ⁽¹⁹⁾

	1301	1211	2402	Total
• Production (tonnes)	10.000	14.000	1.000	25.000
• Utilisation en % :				
- conservation sur les sites	70	80	85	-
- tests, entraînements	11	6	2	-
- fuites au remplissage, déclenchements injustifiés, fuites sur site	12	4	3	-
- extinction des feux	7	10	10	-
• Montant cumulé des stocks (tonnes)	= 51.000	= 91.000	-	-

Le halon 1301 est utilisé préférentiellement dans les installations fixes d'extinction automatique. Le halon 1211 est, quant à lui, utilisé surtout dans les extincteurs mobiles.

Les utilisations des halons par type d'application sont présentées dans le tableau 61.

Le halon 2402 est quant à lui utilisé principalement dans des extincteurs portables. L'absence de données fiables ne permet pas de connaître avec précision les secteurs d'activité concernés.

ICI serait le premier producteur mondial de halon 1211 avec 25 % du marché. On trouve également dans les principales firmes

Tableau 61 : Répartition de l'utilisation des halons dans le monde par type d'usages en % (19)

	Halon 1301 en % du total	Halon 1211 en % du total
Équipements électroniques et informatiques	65	35
Transport (avions, bateaux, autres équipements de transport)	12	25
Usages institutionnels, commerciaux, industriels dont bibliothèques musées	10	40
Pipelines, plate-formes pétrolières, raffineries, usines chimiques	10	-
Divers	3	-
Total	100	100

ATOCHEM, Great Lake Chemicals spécialisées dans ces produits, DUPONT qui aurait 10 % du marché mondial et Kalichimie.

La consommation française de halon 1301 s'est élevée à 530 tonnes en 1986, pour des stocks cumulés sur site de 6.000 tonnes environ à la même date. Les données correspondantes pour le halon 1211 étaient à la même date de 250 tonnes et de 8.000 tonnes respectivement.

Le secteur est concentré, à la fois pour la production et la mise en oeuvre.

ATOCHEM dispose d'une position très forte dans ce domaine également. Sa production de halons 1301 et 1211 est de 4.000 tonnes. ATOCHEM détient la quasi-totalité du marché français et exportait environ 3.500 tonnes de halons en 1986.

5.5.2. La mise en oeuvre du Protocole de Montréal

Une convention a été signée le 7 février 1989 par le Secrétariat d'Etat à l'Environnement, le Ministère de l'Industrie et le Ministère de l'Intérieur, avec les différentes parties intéressées par la mise en oeuvre des halons :

- Fédération Française du Matériel d'Incendie (FFMI)
- Groupement des Installateurs Fabricants de Systèmes d'Extinction Fixes
- Syndicat Général des Fabricants d'Extinction Fixes et Mobiles.

L'objectif principal de la Convention est d'utiliser au mieux les quantités de halons produits ou stockés.

Les organisations signataires, le Secrétariat d'Etat à l'Environnement, les compagnies d'assurance regroupées au sein de l'APSAD (Assemblée Plénière des Sociétés d'Assurance-Dommage) ont par ailleurs créé le Comité Technique Français Halons-Environnement (CTFHE) qui regroupe également des représentants des utilisateurs, des assurés, des producteurs et des laboratoires.

Les objectifs des travaux du CTFHE sont les suivants :

- l'information des utilisateurs sur les modalités d'application du Protocole de Montréal,
- la mise au point de dispositions techniques visant à limiter les rejets de halons vers l'atmosphère.

5.5.3. Les solutions techniques

Aucun substitut aux actuels halons n'existe pour le moment. La taille insuffisante du marché par rapport à celui des CFC fait que les recherches -au demeurant très difficiles- dans ce domaine semblent peu nombreuses. Seul Great Lakes Chemicals a annoncé des travaux de ce domaine.

En conséquence, la voie des économies liées à l'utilisation semble la seule possible, à court terme.

A cet égard, le CTFHE préconise les mesures suivantes :

- mieux choisir l'agent extincteur (ne pas recourir systématiquement aux halons),
- mieux concevoir et réaliser les installations,
- ne plus pratiquer systématiquement l'essai réel d'émission,
- améliorer la qualité de la maintenance,
- former et sensibiliser les utilisateurs finals,

- rationaliser les exercices d'entraînement,
- récupérer les fluides lors des modifications d'installation ou de la mise au rebut d'extincteurs.

Dans le prolongement de ces recommandations, il paraît nécessaire de promouvoir, voire de rendre obligatoire une qualification d'installateur et de vérificateur, telle que celle octroyée par l'APSAD pour les extincteurs mobiles.

Un certificat de conformité pourrait également être mis en place pour les installations fixes.

La limitation des rejets de halons à court-moyen terme dépend en définitive d'une amélioration -au demeurant possible- du confinement des installations, d'une meilleure formation des installateurs et des vérificateurs ainsi que d'une récupération et d'un recyclage efficace des halons mis au rebut. L'agencement des locaux à protéger (matériaux et distribution) et une préconisation plus parcimonieuse contribueraient également à diminuer les rejets de halons.

La question d'une définition des usages essentiels auxquels seraient réservés les halons reste néanmoins posée. Le fait que certains pays, comme la RFA, s'apprêtent à explorer cette voie, devrait conduire à ne pas l'exclure d'emblée, en dépit de toutes ses difficultés.

5.6. CONCLUSIONS

Les progrès réalisés dans la réduction des utilisations des CFC depuis l'entrée en vigueur du Protocole de Montréal sont réels. Ils sont certes inégalement répartis selon les secteurs d'utilisation, mais ils semblent autoriser une accélération du processus.

Les aérosoliers ont, semble-t-il, définitivement réglé le problème, à deux nuances près toutefois. La première est qu'il reste un noyau dur, celui des usages dits essentiels et en particulier médicaux, dont l'existence même peut autoriser insidieusement une lente reprise du recours aux CFC dans d'autres secteurs. La deuxième est que les aérosoliers seront sans doute candidats pour utiliser les futurs HCFC et HFC -à condition qu'une stabilité leur soit garantie pour leur autorisation- dans la mesure où les propriétés des produits de remplacement sont largement inférieures à celles des CFC/HCFC/HFC sur les plans de l'inflammabilité et l'explosivité.

La réfrigération a, quant à elle, effectué des avancées mais celles-ci portent seulement pour l'instant sur les mousses d'isolation. Le changement de fluide est plus complexe ; il exige des avancées

technologiques sur les compresseurs et les huiles et bien sûr une conclusion heureuse des tests de toxicité.

Une difficulté doit toutefois être soulignée : les HCFC et les HFC de la substitution ne pourront prendre la place des CFC dans les installations existantes. Il importe donc de restreindre dès que possible l'utilisation des CFC aux installations existantes d'une part, et d'autre part de pousser les recherches pour faire commencer, dès que possible, la production de nouvelles installations sur des bases technologiques nouvelles. Par ailleurs, pour les installations existantes, il convient d'améliorer les comportements des usagers et des professionnels dans le sens d'un accroissement des précautions prises dans la manipulation des CFC. Enfin, pour la mise au rebut des installations en service, il convient de prendre toutes les précautions possibles pour récupérer et recycler les CFC utilisés.

Le secteur des mousses semble être, quant à lui, en mesure de résoudre rapidement les problèmes posés par l'élimination des CFC, à condition que les substituts HCFC soient commercialisés le plus rapidement possible, compte tenu des tests de toxicologie.

La faisabilité de l'élimination des CFC dans les utilisations de dégraissage ou de nettoyage est elle aussi quasi assurée dans un proche avenir, pour l'ensemble des applications.

Reste le problème des halons qui n'ont pas de remplaçants actuellement et pour lesquels il faut généraliser les précautions d'emploi (essais avec d'autres fluides, détection des fuites, élimination des déclenchements intempestifs). Il faut également mettre en place des méthodes et des filières de destruction non polluantes des halons.

Au total, l'élimination des CFC est à la portée de l'industrie. A une condition expresse toutefois : celle d'une coopération étroite entre tous les acteurs des différentes filières : producteurs de CFC et de substituts, firmes chimiques, fabricants de matériel, utilisateurs.

C'est cette coopération qu'il convient de renforcer en France, de manière à faire de l'industrie française une industrie en pointe dans ce combat, pour la qualité de notre environnement et la force de nos positions commerciales.

D'une manière générale, il apparaît que les pays industrialisés ont ainsi apporté un concours dans l'ensemble efficace à la mise en oeuvre du dispositif de Montréal qui cependant semble aujourd'hui insuffisant.

B - UN DISPOSITIF QUI N'EST CEPENDANT PAS ENTIÈREMENT SATISFAISANT

Le Protocole de Montréal, d'une part, ne semble plus, à l'heure actuelle, suffisamment rigoureux et, d'autre part, n'a pas recueilli une adhésion assez large.

1. UNE LIMITATION PAS ASSEZ RIGOUREUSE DES ÉMISSIONS DE COMPOSÉS CHLORÉS

Négocié en 1987 et entré en vigueur le 1er janvier 1989, le Protocole de Montréal paraît refléter un certain manque d'ambition, en ce qui concerne la protection de la couche d'ozone. Il pêche aussi par les lacunes de son champ d'application et par l'insuffisance des restrictions d'émissions qu'il prévoit.

1.1. LE REFLET D'UN DÉFAUT D'AMBITION CONCERNANT LA PROTECTION DE L'OZONE

D'après les simulations effectuées à l'époque, l'objectif visé avant le début des négociations de Montréal en 1987, semblait être seulement d'arrêter la diminution de la couche d'ozone. La décision prise de réduire de moitié les émissions de CFC et de geler la production des halons devait suffire ainsi à parvenir à ce résultat, selon le modèle de WUEBLES et CONNEL (30) utilisé par l'EPA (Agence fédérale américaine de protection de l'environnement). D'autres modèles, comme celui de HOFFMAN, utilisés par les associations américaines regroupées au sein du National Resource Development Council, estimaient cependant qu'une diminution de 85 %, et non pas seulement de 50 %, des émissions de CFC était nécessaire, pour stabiliser leur concentration dans la stratosphère, compte tenu des stocks de ces substances déjà accumulés.

Le préambule du Protocole de Montréal reflète ce défaut d'ambition, dans la mesure où il semble indiquer que les mesures prévues doivent tendre uniquement à «protéger la couche d'ozone contre le risque d'appauvrissement». Il est vrai qu'il est proclamé plus loin que l'objectif final est d'éliminer les substances qui détruisent l'ozone, mais ce but doit être atteint seulement «en fonction de l'évolution des connaissances scientifiques et compte tenu de considérations techniques et économiques».

La communauté internationale ne se contente plus aujourd'hui de viser une stabilisation de la couche d'ozone. Son ambition est de ramener, le plus rapidement possible, la concentration de chlore dans l'atmosphère au niveau (2 milliardièmes) qui était le sien avant l'apparition du trou d'ozone de l'Antarctique. Cela devrait permettre une régénération de l'ozone.

1.2. LES LACUNES DU CHAMP D'APPLICATION DU PROTOCOLE

Bien qu'il réglemente - comme on l'a vu - les émissions des composés chlorés a priori les plus nocifs (d'après le volume produit, la durée de vie et le potentiel de destruction de l'ozone), le Protocole de Montréal omet cependant de s'en prendre à d'autres produits suspects.

Il s'agit notamment (voir plus loin) :

- du **méthylchloroforme** (CH_3CCl_3) dont la durée de vie n'est que de six ans. Son potentiel de destruction de l'ozone est seulement de 0,1 mais il est produit en quantité importante (500 000 tonnes par an) et serait responsable de 13 % de la concentration de chlore atmosphérique (estimation pour 1985) ;

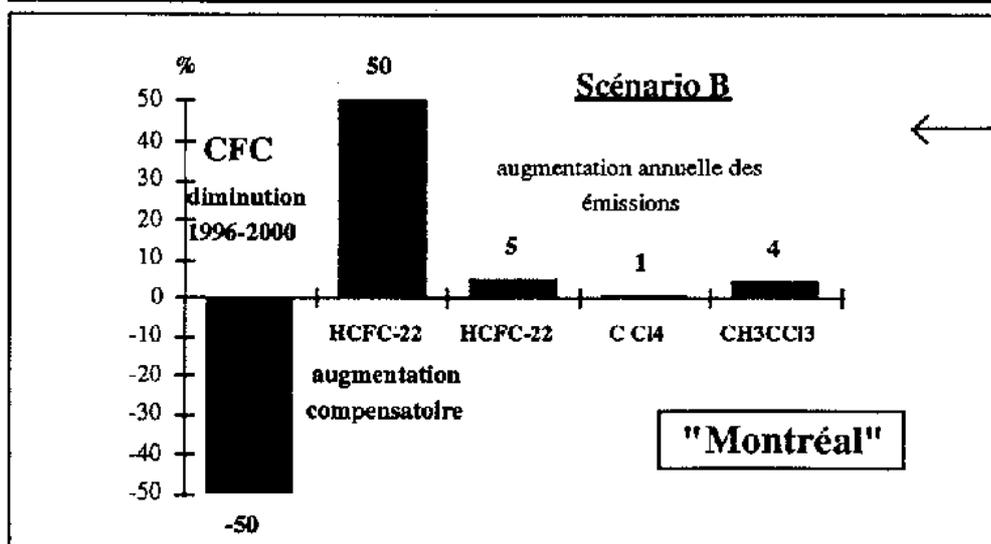
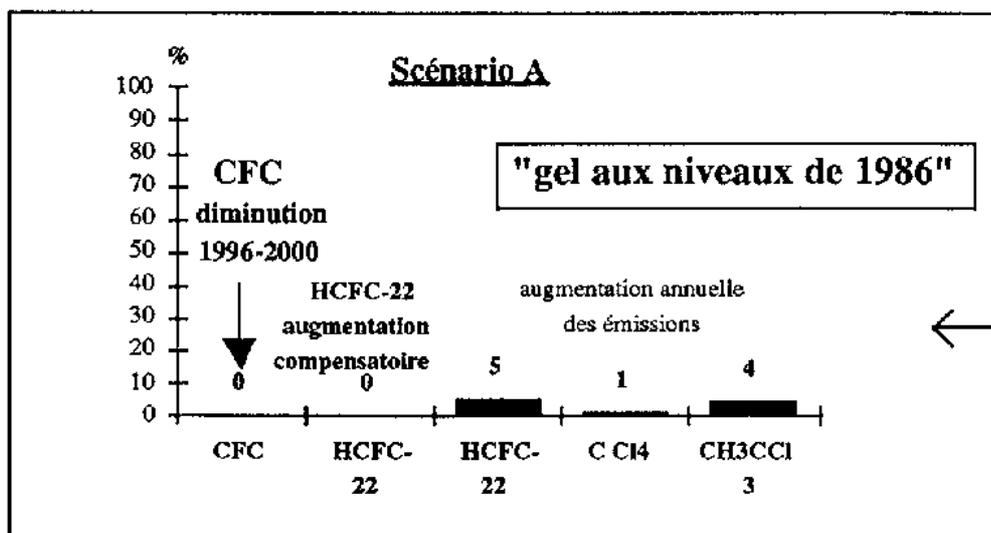
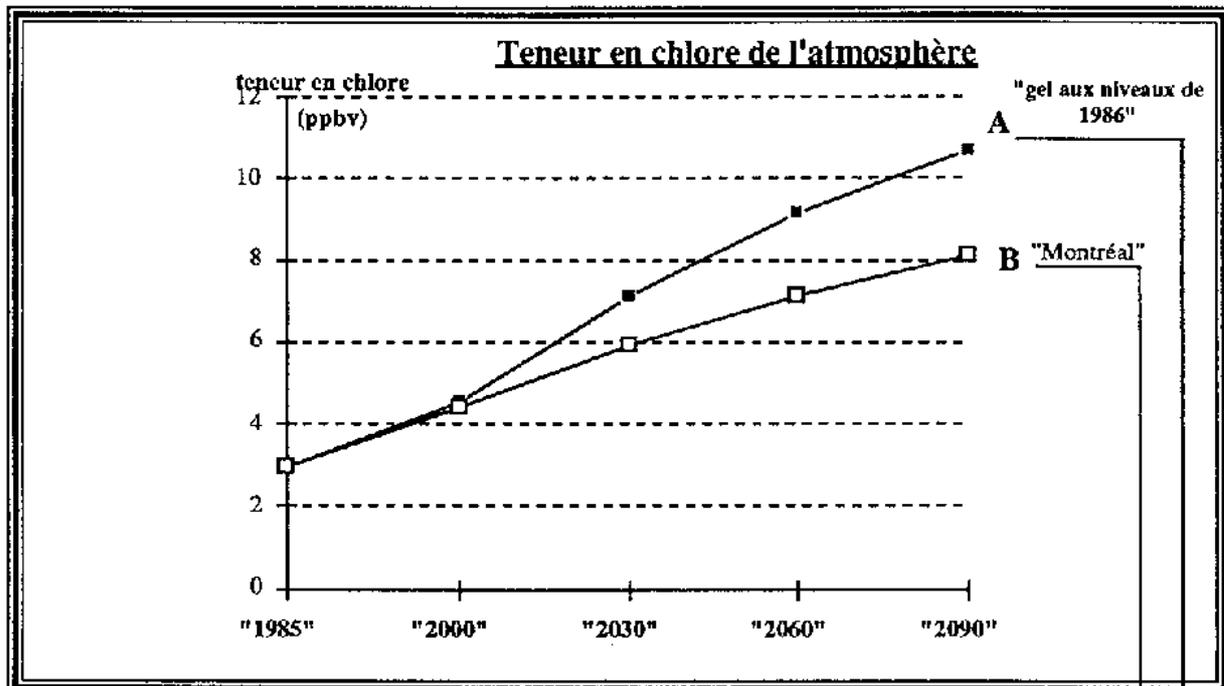
- l'absence du **tétrachlorure de carbone** (CCl_4) parmi les substances réglementées par le Protocole paraît encore plus regrettable : sa durée de vie (cinquante ans), son potentiel de destruction de l'ozone (de 1,0 à 1,2) et sa production actuelle (800 000 tonnes) sont, en effet, considérables. Son destin est cependant étroitement lié à celui des CFC réglementés, à la fabrication desquels il sert de matière première. Toutefois, il connaît également d'autres usages (fabrication de pesticides, de solvants, de caoutchoucs et de teintures synthétiques, d'agents de nettoyage à sec et de fumigation pour le traitement des céréales).

1.3. LE CARACTÈRE INSUFFISANT DES RESTRICTIONS PRÉVUES

Dans son rapport pour l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (1), M. G. MÉGIE compare les charges en chlore de l'atmosphère observées ou obtenues à diverses dates (1985, 2000, 2030, 2060, 2090), en fonction de différents scénarios d'évolution des émissions de CFC, halons, HCFC-22, tétrachlorure de carbone, méthylchloroforme, tels qu'ils ont été élaborés pour le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (rapport PNUE/ONM).

Les résultats de deux de ces scénarios (A et B) sont présentés dans la série de graphiques 15 à 18.

Graphiques 16 à 18 : Influence des mesures du Protocole de Montréal sur la teneur en chlore de l'atmosphère



Les scénarios A et B ont en premier lieu en commun les hypothèses suivantes concernant l'évolution des gaz- sources à effet de serre :

CH₄ : augmentation de la concentration de +0,9 % / an,
N₂O : augmentation de la concentration de + 0,25 % / an,
CO₂ : augmentation de la concentration de + 0,4 % / an.

Les scénarios A et B se distinguent, par ailleurs, l'un de l'autre par les hypothèses prises concernant les limitations des émissions de CFC, HCFC-22.

1.3.1. Le simple gel des émissions de CFC et de halons aux niveaux de 1986

Le scénario A correspond à la situation que l'on aurait observée en l'absence des objectifs de réduction fixés par le Protocole de Montréal, avec un simple gel des émissions de CFC au niveau des quantités de 1986. S'agissant du tétrachlorure de carbone (CCl₄) et du méthylchloroforme (CH₃CCl₃), les émissions sont supposées augmenter à leur rythme antérieur, soit respectivement + 1 % par an et + 4 % par an (en pptv / an), de même que le HCFC-22 (+5 % par an).

On constate alors que la teneur en chlore dans l'atmosphère passe de 3,0 ppbv en 1985, à 4,5 ppbv en l'an 2000, à 7,1 ppbv en 2030 et à 9,2 ppbv en 2060.

La teneur en brome quant à elle, passe de 13 pptv en 1985 (dont 10 pptv dus aux émissions naturelles de CH₃Br) à 31 pptv en 2060.

En utilisant un modèle complémentaire intégrant l'effet radiatif du CO₂ dans la stratosphère, on calcule que les variations de la colonne totale d'ozone sont les suivantes :

- de 0 à 1,5 % sous les tropiques ;
- de -4 % à -8 % dans les hautes latitudes en hiver.

La réduction de la concentration d'ozone à 40 km est alors de l'ordre de -25 à -50 % et conduit à une diminution de la température locale de 10 à 20 °C.

1.3.2. Les réductions fixées par le Protocole de Montréal

Le scénario B prend en compte une réduction des émissions de CFC égale à 50 % des niveaux de 1986, conformément aux objectifs du Protocole de Montréal.

Des hypothèses complémentaires sont nécessaires. Comme dans le scénario A, on suppose que les émissions de CCl_4 et de CH_3CCl_3 - non visés par le Protocole de Montréal - continuent d'augmenter au même rythme que par le passé. Par ailleurs, on prend comme hypothèse le fait que les émissions de HCFC-22 augmenteront de 50 % par rapport au niveau de 1986, dans la mesure où les industries, pour compenser les réductions de CFC, (notamment 11 et 12), utiliseront le HCFC-22 en plus grande quantité, par exemple dans la réfrigération.

Cette augmentation des émissions de HCFC-22 par compensation, est supposée s'ajouter à la tendance ancienne de croissance de 5 % par an.

Cet ensemble d'hypothèses correspond d'assez près au Protocole de Montréal et à ses conditions de mise en oeuvre.

La réduction de la quantité totale d'ozone représente alors 65 % de celle calculée en l'absence de toute réduction (scénario A). Mais il n'en demeure pas moins que la charge totale en chlore en 2060, atteint 7,2 ppbv et la charge en brome 22 pptv.

L'augmentation tendancielle de la charge en chlore n'est pas significativement infléchie selon ces simulations par les mesures du Protocole de Montréal.

Il est clair que de tels résultats sont inacceptables car ils comportent des risques certes difficiles à évaluer mais en tout état de cause beaucoup trop lourds pour notre environnement et même pour la santé humaine, voire pour la préservation de la vie sur la terre (cf. première partie de ce rapport : conséquences d'une augmentation du rayonnement ultraviolet au niveau du sol et de l'effet de serre).

Insuffisamment rigoureuses, les dispositions du Protocole de Montréal ne donnent pas non plus satisfaction en ce qui concerne les Pays en Voie de Développement, puisqu'elles ne permettent pas, en l'état, de recueillir leur indispensable adhésion.

2. LES RÉTICENCES REGRETTABLES DES PAYS EN VOIE DE DÉVELOPPEMENT

Il est d'autant plus regrettable que la majorité des Pays en Voie de Développement aient pour le moment refusé de souscrire au Protocole que leur adhésion est indispensable à la réalisation des objectifs de celui-ci.

2.1. LE CARACTÈRE CRUCIAL DE L'ADHÉSION DES PAYS DU SUD AU PROTOCOLE DE MONTRÉAL

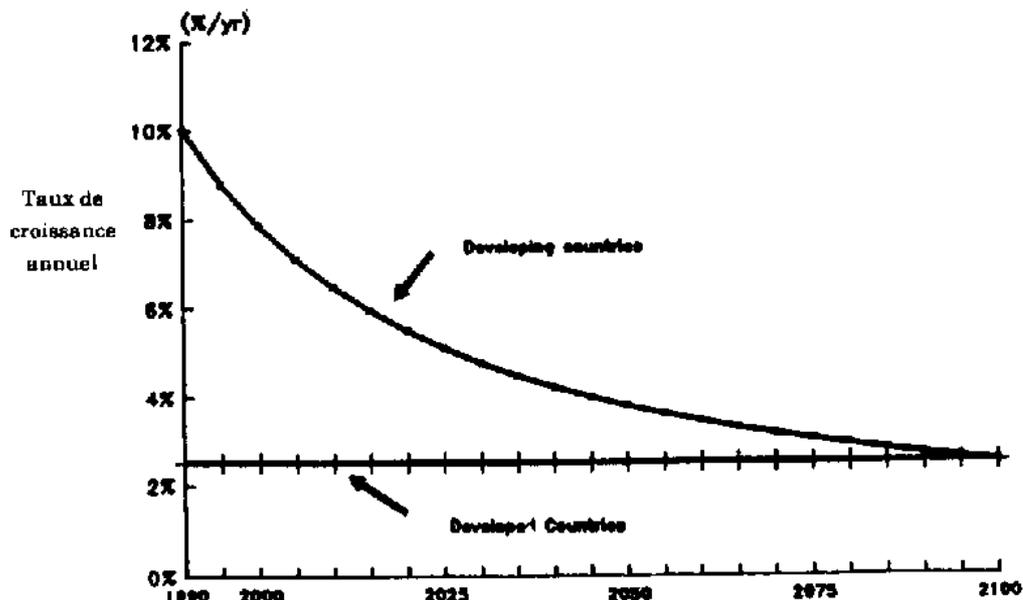
La participation des pays du Tiers Monde aux mesures internationales tendant à restreindre ou à supprimer l'usage des CFC est d'autant plus nécessaire que la tentation pour eux de produire ou de consommer ces substances ira croissante.

2.1.1. Des besoins croissants dans les secteurs d'utilisation actuelle des CFC

2.1.1.1. Des perspectives différenciées d'évolution de la demande

Le graphique 19, établi par les services d'études de la firme américaine DUPONT de Nemours, montre que le taux de croissance de la demande de biens et de services qui supposent actuellement l'utilisation de CFC, restera longtemps bien plus élevé dans les pays en développement (où il est voisin de 10 % en 1990) que dans les pays industrialisés (où il devrait se stabiliser aux alentours de + 2 %).

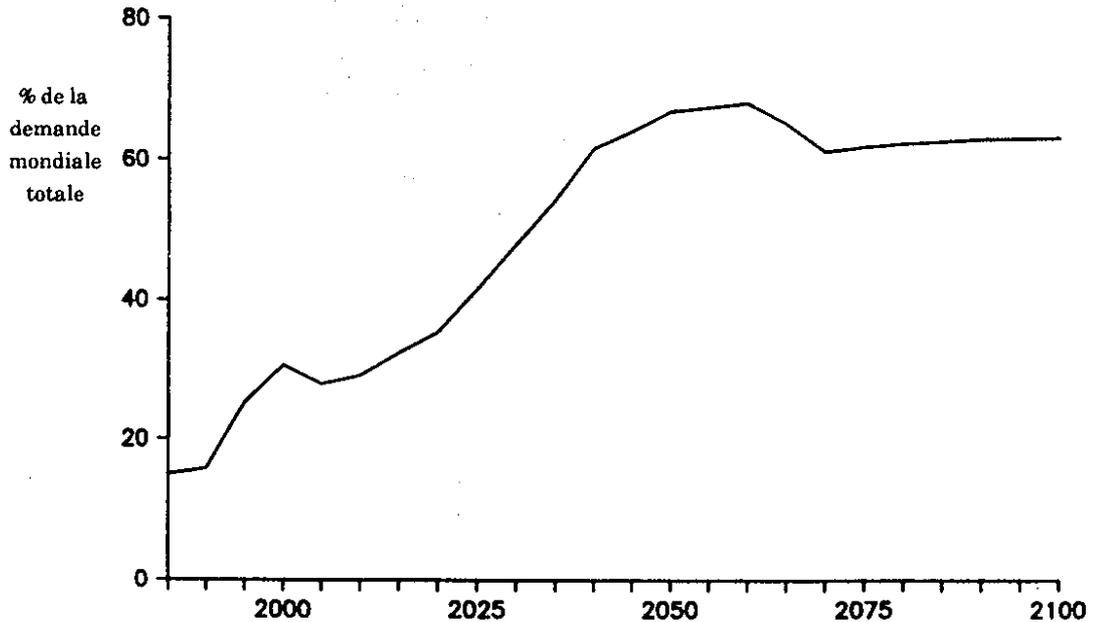
Graphique 19 : Prévisions de croissance de la demande de biens et de services qui supposent l'utilisation de CFC



(Source : Dupont de Nemours)

Le graphique 20, de la même source, montre que la part des pays en développement dans la consommation mondiale totale de fluorocarbures devrait, en conséquence, s'accroître considérablement.

Graphique 20 : Prévisions d'utilisation des fluorocarbures dans les pays en développement (9)

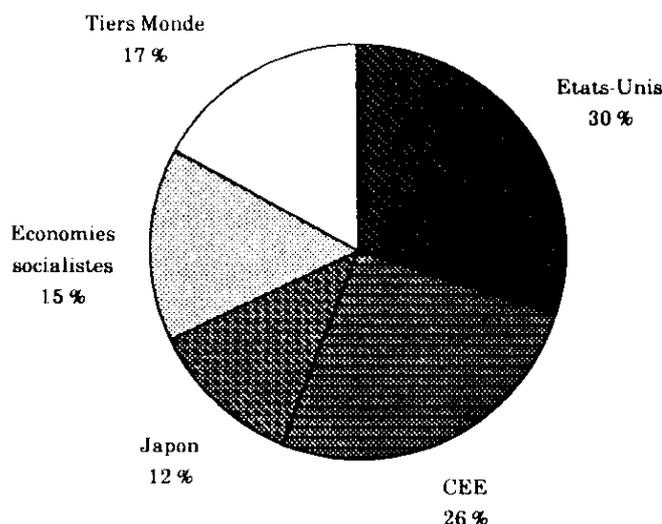


(Source : Dupont de Nemours)

La courbe ci-dessus correspond à la consommation totale de fluorocarbures (CFC + HCFC + HFC) des pays en développement. On a retenu l'hypothèse d'un bannissement des CFC (en l'an 2000 dans les pays industrialisés et en 2010 dans les pays en développement), puis des HCFC (entre 2030 et 2070).

Il apparaît ainsi que 70 % environ de la demande mondiale totale de fluorocarbures, en 2050, pourrait provenir des pays du Sud. Or, la consommation du Tiers Monde (140 000 tonnes en 1986) ne représente actuellement que 12 à 17 % de la consommation mondiale totale de CFC.

Graphique 21 : Consommation mondiale de CFC, répartition par grandes régions en 1986 (2)



C'est dans les pays en développement que la demande de CFC devrait rester la plus forte en l'an 2000. De 140 000 t actuellement, elle pourrait passer, selon une estimation du PNUE, à 330 000 t (soit une augmentation de 235 %).

D'autres évaluations font cependant état d'une consommation moins importante des pays du Sud à la fin du siècle (la fourchette de prévisions va en fait de 200 000 t à 400 000 t. Selon ATOCHEM, le supplément de demande de CFC émanant des pays du Tiers Monde en l'an 2000 varierait entre 80 000 et 100 000 t).

Le taux de croissance annuel moyen de la consommation de CFC par les pays du Tiers Monde est estimé à 6 %. Mais ce chiffre global recouvre des évolutions très différenciées.

On peut distinguer :

- la majorité des pays du Sud qui ne connaîtraient qu'une croissance de l'ordre de 1 % par an de leur consommation ;

- des pays intermédiaires dont le taux de croissance annuel serait de 7 % (Algérie, Argentine, Brésil, Corée du Sud, Libéria, Malaisie, Mexique, Panama, Tunisie et Venezuela) ;

- enfin, l'Inde et la Chine qui verraient leur consommation de CFC augmenter de 13 % par an.

L'objectif de l'Inde est de doubler, d'ici 1996, sa consommation de CFC qui, dans certains secteurs comme celui de l'emballage ou de l'air conditionné industriel connaît actuellement des taux de croissance annuelle de l'ordre de 20 à 25 %.

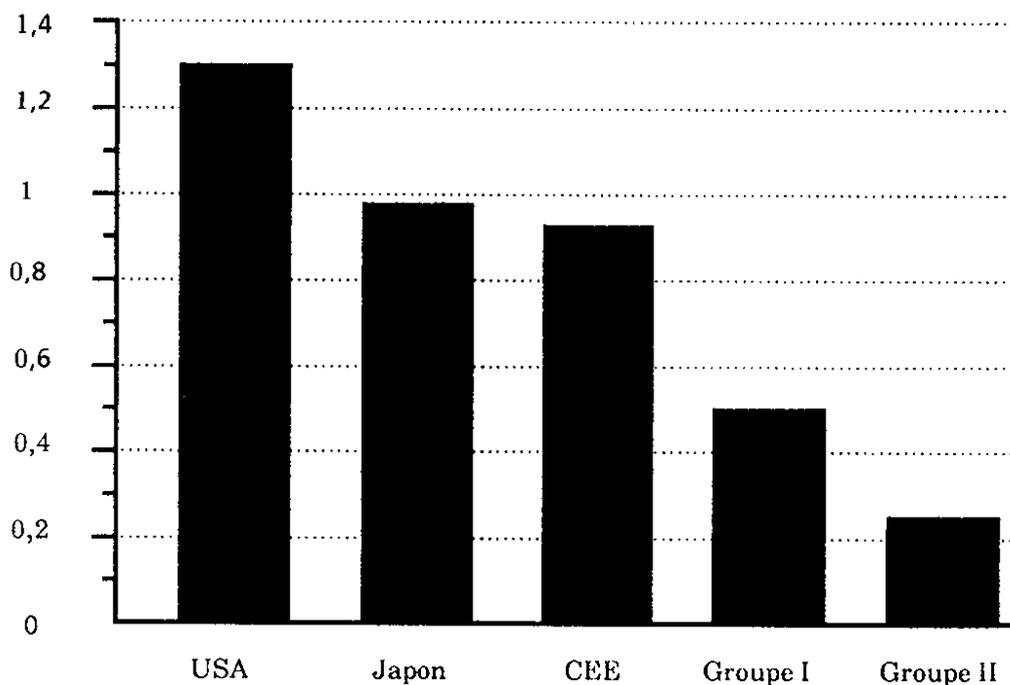
La consommation indienne totale pourrait ainsi passer de 10 000 t, actuellement, à 20 000 t en 1996 et 45 000 t en l'an 2000.

La consommation de CFC en Chine est également en plein essor (notamment dans le secteur des réfrigérateurs domestiques, voir plus loin).

La plupart des pays du tiers monde (et des Etats socialistes) ont une consommation par tête d'habitant inférieure à 300 grammes et parfois même à 100 grammes (cas de la Chine, de l'Inde et du Brésil).

Ces chiffres sont à comparer avec ceux concernant les Etats-Unis (entre 1,3 et 1,4 kilos par habitant) ou le Japon et la CEE (0,9 kg par habitant).

Graphique 22 : Consommation de CFC par tête d'habitant (2)



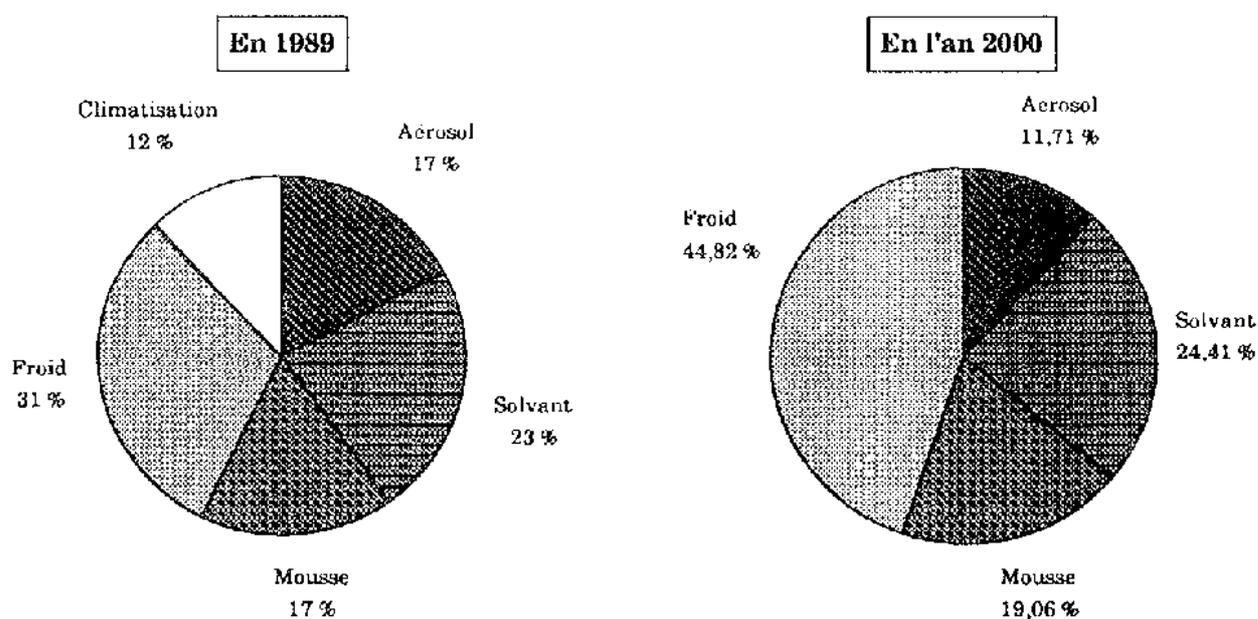
Groupe I (moins de 0,5 kg par habitant) : Bahrein, Norvège, Liechtenstein, Portugal, Barbades, Trinité, Arabie Saoudite.

Groupe II (moins de 0,3 kg par habitant) : tous les autres Etats.

L'Inde et la Chine étant cependant les deux Etats les plus peuplés de la terre (avec des populations qui dépassent, respectivement, 800 millions et un milliard d'habitants) toute augmentation, même modérée, de leur consommation par tête ne peut pas manquer d'exercer un certain impact sur la consommation mondiale totale de CFC.

Concernant la répartition par secteur des utilisations des CFC, la part relative du froid et de la climatisation, qui est la plus importante en 1989, devrait s'accroître d'ici à l'an 2000 comme le montrent les deux graphiques ci-après.

Graphiques 23 et 24 : Répartition de la consommation de CFC, dans les pays du tiers monde



Source : Mc Kinsey Analysis.

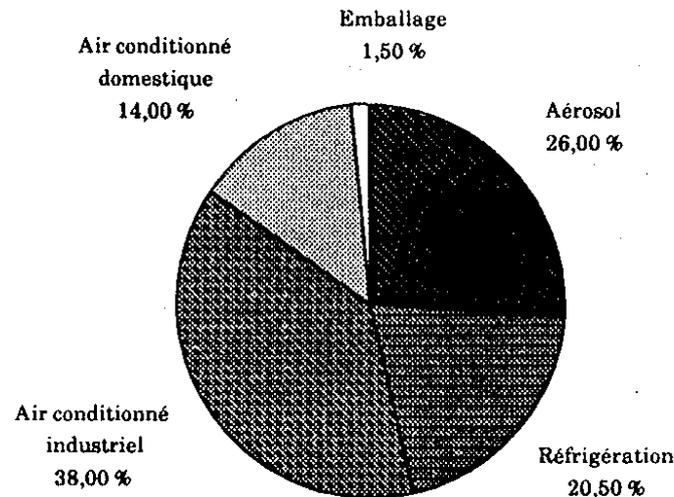
En se fixant comme objectif un réfrigérateur dans chaque foyer à la fin du siècle, la Chine s'est lancée dans une politique très active d'équipements dans ce domaine (le taux de croissance de cette industrie y serait de l'ordre de 30 % par an).

De son côté, l'Inde où n'existent pour le moment que 7 millions de réfrigérateurs domestiques, ambitionne d'atteindre le chiffre de 170 millions d'appareils en l'an 2000.

Le taux de croissance de l'utilisation de CFC et du matériel d'équipement pour la réfrigération y a donc été de 10 % par an entre 1986 et 1989.

L'air conditionné, domestique (14 % de la consommation de CFC en 1988) et surtout industriel (38 % de cette même consommation), occupe dans ce pays une place particulièrement importante, aux côtés de la réfrigération (20,5 %).

Graphique 25 : Répartition de la consommation de CFC, en Inde, en 1988



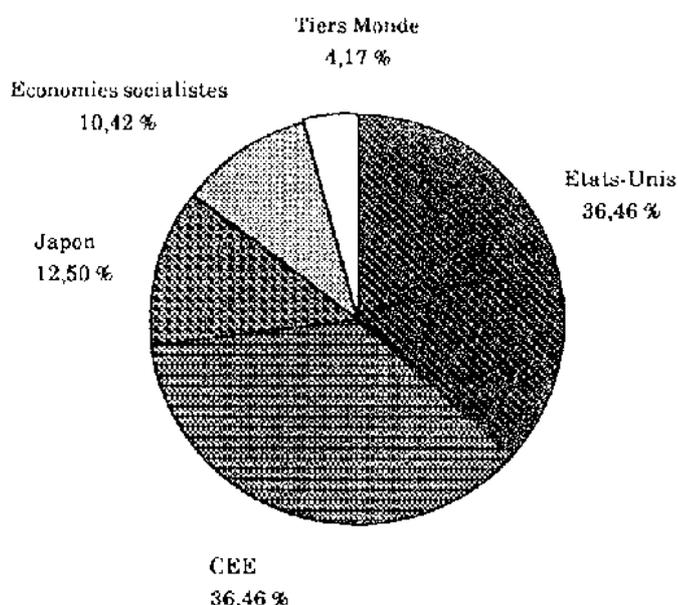
(Source : PNUE)

Au total, malgré la prépondérance des besoins liés à la réfrigération et à la climatisation, les autres utilisations de CFC (solvants, mousses, aérosols) ne sont pas négligeables et témoignent d'une diversification certaine de la demande des Pays en Développement.

2.1.1.2. Une production faible mais croissante

Alors que leur consommation représente, on l'a vu, entre 12 et 17 % de celle du monde entier, la production des Pays en Développement ne correspond qu'à un peu plus de 4 % de la production mondiale de CFC.

Graphique 26 : Répartition de la production mondiale de CFC, en 1984 (2)



Les pays du Sud importent donc actuellement entre les deux tiers et les trois quarts de la quantité de CFC qu'ils consomment.

En valeur absolue, la production des Pays en Développement était estimée, en 1984, à un peu plus de 50 000 tonnes, trois pays seulement ayant une capacité significative : la Chine, le Brésil (18 000 t chacun) et l'Inde (15 000 t).

Cependant, les experts qui ont travaillé pour l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (2) et (3), ainsi que les représentants de la firme DUPONT de Nemours rencontrés aux États-Unis par vos rapporteurs (17), font état de ce que d'autres pays du Tiers Monde, soit se sont équipés, depuis 1984, de sites industriels de production de CFC, soit en installent actuellement ou envisagent de le faire prochainement. DUPONT de Nemours et ALLIED SIGNAL ont ainsi implanté des filiales au Mexique (ATOCHEM étant déjà présent en Amérique latine, au Venezuela). Une unité de production de CFC-11 et 12 d'une capacité de 3 000 t a été créée, en 1988, en Argentine, par la compagnie FIASA.

La construction de nouvelles usines de production de CFC est envisagée en Asie du sud-est, durant l'année 1990 (tableau 62) :

Tableau 62 : Projets de construction de nouvelles unités de production de CFC, en 1990, en Asie du Sud-Est

Pays	Compagnies	Capacité	Produit
- Corée	ULSAN	7 000 t	CFC-113 ou HCFC-22
- Taïwan	FORMOSA PLASTICS	12 000 t	CFC-11, 12 et 113
		3 000 t	HCFC-22

L'Inde s'est équipée récemment de trois nouvelles unités de production de CFC-11 et 12 d'une capacité de 3 000 t en 1988 (compagnie Mettur Chemicals), de 4 000 t en mars 1989 (Shri Ram Fibers Limited), et de 7 000 t en avril 1989 (Industrial Oxygen Company Limited).

La Chine, elle, n'est pas tributaire de la technologie étrangère pour le développement de sa production de CFC. Il existe déjà trente producteurs de chlorofluorocarbures dans ce pays. Les cinq principaux d'entre eux envisagent tous d'augmenter leurs capacités de production. De 15 000 tonnes, en 1988, la production chinoise totale de CFC devrait ainsi passer à 40 000 tonnes, en 1995. La Chine pourrait avoir décuplé ses capacités en quinze ans pour devenir, en l'an 2000, avec un total de 130 000 t, le premier producteur mondial de CFC.

Les représentants de DUPONT de Nemours ont signalé également à vos rapporteurs que des pays du Moyen-Orient (Iran, Irak) ainsi que le Pakistan se montraient actuellement désireux d'acheter des licences leur permettant d'acquérir la technologie de fabrication des CFC.

2.1.2. Un refus qui compromettrait la réalisation des objectifs du Protocole

Il peut être tentant pour le Tiers Monde de ne pas se plier aux exigences du Protocole de Montréal, compte tenu :

- de la croissance dans les pays concernés de la demande de biens et services qui font appel aux CFC (voir plus haut) ;

- de la nécessité d'y amortir les installations récentes produisant ou utilisant ces substances ;

- surtout, enfin, du coût plus élevé et des conditions d'utilisation plus difficiles de leurs substituts.

La mesure dans laquelle un refus d'adhésion de leur part compromettrait la réalisation des objectifs du protocole, dépend de l'aptitude des pays du Sud à accroître leur production pour faire face à leurs besoins (en supposant que la loyauté des pays signataires ne leur permette pas de s'approvisionner ailleurs).

Le préambule du Protocole de Montréal, dans sa rédaction actuelle, proclame la nécessité de «protéger la couche d'ozone contre le risque d'appauvrissement» et, à cette fin, de «réglementer le volume mondial total des émissions qui l'appauvrissent, l'objectif final étant de les éliminer».

Il a déjà été montré dans ce rapport (voir plus haut) que le dispositif actuel du Protocole de Montréal ne suffit pas à éviter une aggravation de la charge totale en chlore de l'atmosphère et, partant, la poursuite de la destruction de l'ozone.

Le refus d'adhésion de la majorité des Pays en Développement rend, à l'évidence, ce dispositif encore moins satisfaisant.

Le Protocole prévoit actuellement une réduction de 50 % en l'an 2000 de la production et de l'utilisation des CFC réglementés par rapport aux niveaux de 1986.

Or, le maintien d'une production seulement égale ou supérieure à 20 % de la production actuelle des CFC conduit, selon différentes simulations effectuées par des modèles pour le compte du PNUE, à une augmentation et à une stabilisation à long terme de la charge en chlore de l'atmosphère incompatible avec la disparition du trou d'ozone dans l'Antarctique. «Cette constatation est particulièrement importante - souligne notre expert, M. MÉGIE, dans son commentaire des différents scénarios étudiés - si l'on considère le cas des Pays en Voie de Développement comme l'Inde et la Chine, qui n'ont pas ratifié le Protocole de Montréal, faute de pouvoir accéder rapidement à la technologie des substituts» (1).

Selon d'autres projections qui seront évoquées plus loin, une absence d'adhésion des pays en Développement serait susceptible de mettre en échec même un durcissement encore plus sensible du Protocole.

Conscient de l'importance que revêt leur accord pour le succès du Protocole, les pays du Sud estiment que leur situation particulière n'y est pas suffisamment prise en considération.

2.2. UNE PRISE EN COMPTE DE LEUR SITUATION PARTICULIÈRE JUGÉE INSUFFISANTE PAR LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

Le Protocole de Montréal, élaboré en septembre 1987, tient pourtant compte des problèmes spécifiques des pays du Tiers Monde, mais d'une façon qui peut sembler insuffisante.

2.2.1. Les mesures prévues par le Protocole en faveur du Tiers Monde

Le préambule du Protocole de Montréal se termine par un appel à la coopération internationale scientifique et technique, en matière de recherche et développement, afin de réglementer et de réduire les émissions de substances qui appauvrissent la couche d'ozone.

Cet effort doit être accompli - est-il précisé - «en tenant compte notamment des besoins des Pays en Développement».

L'article 9 du Protocole détermine le contenu de ces activités de recherche-développement et d'échanges de renseignements qui doivent porter «compte tenu -est-il à nouveau souligné - des besoins des Pays en Développement», sur les économies de substances réglementées et leur destruction, les solutions tendant à leurs substituer de nouveaux produits et, enfin, les différentes stratégies de réglementation possible.

Il est question, à l'article suivant, d'une assistance technique destinée à faciliter l'adhésion des Pays en Développement au Protocole, sujet qui doit être évoqué (et qui l'a été effectivement à Helsinki) par les Parties, lors de la première réunion suivant l'entrée en vigueur du Protocole.

Mais l'article le plus important, introduit dans le texte considéré - à l'initiative de la France - est l'article 5 qui traite exclusivement de la situation particulière des Pays en Développement.

Cet article comporte trois paragraphes :

- Le premier accorde aux pays concernés un sursis de dix ans, avant qu'ils ne se voient appliquer les mesures de réglementation du Protocole, à condition que leur niveau de consommation par habitant demeure inférieur ou égal à 0,3 kg. On notera que ce plafond, s'il était atteint par tous les pays du Sud maîtrisant la technologie de fabrication des CFC, correspondrait à une production d'environ 6 millions de tonnes, plusieurs fois égale à la production mondiale actuelle de 1,2 million de tonnes. Cependant, comme le souligne un de nos experts, M. VIVIEN (3), la production par habitant de la Chine, par exemple, ne dépasserait pas 150 grammes en 1997, même avec un taux de croissance annuel de 15 % par an. «Pour se conformer au Protocole de Montréal, poursuit M. VIVIEN, la Chine devrait ensuite diviser à terme ce ratio par deux, soit donc redescendre à une production par tête de 75 grammes ; cela représenterait certes une augmentation de 50 % par rapport à la situation de 1987, mais serait encore huit fois inférieur au chiffre américain».

- Les deux derniers paragraphes de l'article 5 engagent les pays industrialisés à faciliter l'accès des Pays en Développement à des substances et à des techniques non nuisibles à l'environnement en leur octroyant, à cette fin, par voie bilatérale ou multilatérale, diverses formes d'aide (subventions, crédits, garanties...).

Distinguant consommation d'un côté et production de l'autre, l'article 2, relatif aux mesures de réglementation, autorise les Parties à dépasser, d'un certain pourcentage, les limites de production fixées par le Protocole, pour répondre aux besoins intérieurs fondamentaux des Pays en Développement (voir tableau 63).

Tableau 63 : Calendrier de réduction des émissions de CFC et de halons fixé par le Protocole de Montréal

Dates (1)	Niveau de consommation (2)	Niveau de production (2) et (3)
I - CFC réglementés à compter du 1/8/89	1986	1986 + 10 %
à compter du 1/7/93	80 % de 1986	80 % de 1986 + 10 %
au 30/6/99	50 % de 1986	50 % de 1986 + 15 %
II - Halons à compter du 1/2/92	1986	1986 + 10 %

(1) + 10 ans pour les pays en développement dont la consommation par habitant est inférieure à 0,3 kg.

(2) Pour les pays susvisés, le niveau de référence est soit 0,3 kg par habitant, soit la consommation moyenne entre 1986 et 1997 (on prend le chiffre le moins élevé des deux).

(3) Dépassements autorisés pour répondre aux besoins intérieurs fondamentaux des PVD et à des fins de rationalisation industrielle entre les parties.

Malgré ces dispositions apparemment favorables aux Pays en Développement, et en particulier la référence à leurs besoins intérieurs fondamentaux, ces derniers ne jugent pas satisfaisant le Protocole de Montréal.

2.2.2. Les motifs d'insatisfaction des pays du Sud

Les sujets de mécontentement des Pays en Développement concernent la présence dans le Protocole de clauses qu'ils jugent discriminatoires à leur encontre ainsi que l'absence dans celui-ci de précisions relatives au contenu et surtout au financement des transferts de technologie que suppose le renoncement aux CFC.

2.2.2.1. Des dispositions jugées discriminatoires

La première des dispositions jugées discriminantes par les pays du Sud est celle qui traite de la prise des décisions concernant la révision du Protocole.

Il est précisé, en effet, au c) du paragraphe 9 de l'article 2, que la majorité des deux tiers des parties présentes et participant au vote, qui prend les décisions en l'absence du consensus recherché, doit représenter 50 % au moins de la consommation totale par les Parties des substances réglementées.

La deuxième clause qui peut paraître inéquitable est celle qui interdit aux seuls Pays en Développement d'exporter des substances réglementées (CFC ou halons) à destination d'Etats non signataires à compter du 1er janvier 1993 (art.4 paragraphe 2). Les autres restrictions prévues par cet article relatif à la réglementation des échanges commerciaux avec les Etats non parties au Protocole, concernent, en effet, en priorité, les importations de substances réglementées ou des produits contenant ces substances ou fabriqués avec leur aide.

S'agissant des exportations de substances réglementées, les pays industrialisés doivent seulement s'abstenir de les favoriser par des subventions ou d'autres formes d'aides (article 4, paragraphe 6). Ils s'engagent cependant, par ailleurs, à décourager l'exportation, non pas des substances elles-mêmes, mais des techniques de production ou d'utilisation correspondantes.

Une telle discrimination est défavorable à des pays comme l'Inde qui malgré la faiblesse du volume de sa production (15 000 t) a

une capacité exportatrice nette (de l'ordre de 5 000 t) du fait que sa consommation (10 000 t) est encore plus réduite.

Il faut reconnaître, cependant, que ce problème de la réglementation des échanges commerciaux avec les Etats non parties au Protocole est particulièrement délicat à traiter.

Une trop grande rigueur concernant les exportations des pays industrialisés inciterait les pays du Sud, qui doivent notamment amortir leurs installations existantes, à pourvoir eux-mêmes à leurs propres besoins. Il en résulterait la création d'un marché pour les pays producteurs non signataires qui seraient ainsi incités à ne pas adhérer au Protocole et à développer leur fabrication de substances réglementées.

La dernière disposition du Protocole que les pays du Tiers Monde estiment discriminatoire concerne les conditions de dénonciation du Protocole (article 19). Il peut leur sembler, en effet, vexatoire que le délai avant l'expiration duquel le protocole ne peut pas être dénoncé soit de quatre ans, en ce qui les concerne, (à compter de leur signature) et d'un an seulement (suivant la réception par le dépositaire) pour les autres pays.

Le deuxième reproche majeur que les pays du Sud adressent au Protocole de Montréal est l'insuffisance de ses dispositions relatives aux transferts de technologie.

2.2.2.2. Les lacunes du Protocole concernant les transferts de technologie

Le Protocole de Montréal ne méconnaît pas la nécessité de transférer aux Pays en Développement les technologies qui permettent de limiter ou de supprimer les émissions de CFC. Il reconnaît, en outre, que des aides doivent être accordées à cette fin aux pays concernés.

La façon dont ces problèmes sont abordés par le Protocole peut sembler cependant très vague et peu contraignante.

- Concernant tout d'abord, le contenu des transferts de technologie, l'article 5 se contente d'indiquer qu'il s'agit de «l'accès à des substances et à des techniques de substitution non nuisibles à l'environnement».

L'article 9, un peu plus précis, évoque une collaboration entre les Parties, en matière de recherche et développement, portant sur :

- les différents moyens de réduire les émissions de substances réglementées (confinement, récupération, recyclage et destruction, etc.) ;

- les produits de substitution.

Enfin, l'article 10 prévoit seulement «une assistance technique destinée à faciliter l'adhésion au présent Protocole et son application, compte tenu notamment des besoins en développement».

S'il est donc question de collaboration, d'assistance technique, voire de faciliter l'accès à des substances et à des techniques de substitution, le terme de "transfert de technologie", en revanche, n'est jamais employé par le Protocole.

Les dispositions relatives au financement éventuel d'un tel transfert sont encore plus allusives et succinctes.

Le paragraphe 3 de l'article 5, précité, se contente, en effet, d'affirmer que «Les Parties s'engagent à faciliter, par voies bilatérales ou multilatérales, l'octroi de subventions, d'aides, de crédits, de garanties ou de programmes d'assurance aux Parties qui sont des Pays en Développement afin qu'elles puissent recourir à d'autres techniques et à des produits de substitution».

Les motifs d'insatisfaction qui viennent d'être rappelés expliquent le refus d'adhésion au Protocole de pays représentant la majorité de la population mondiale.

2.2.3. L'absence de participation de pays représentant la majorité de la population mondiale

Le Protocole de Montréal est entré en vigueur le 1er janvier 1989, dans les conditions prévues par l'article 16 (qui exigeait le dépôt, avant cette date, de onze instruments de ratification ou d'acceptation par des Etats ou des organisations représentant les deux tiers de la consommation mondiale).

Soixante-quatre pays représentant plus de 90 % de la production mondiale de CFC l'ont à ce jour signé et cinquante-trois Parlements l'ont ratifié.

On constate la présence, parmi les signataires, de certains Etats du Tiers Monde (l'Indonésie, l'Egypte, le Maroc, le Sénégal, le Congo,

les Philippines...), dont certains pays producteurs (le Mexique, l'Argentine, le Venezuela).

Cependant, l'absence d'adhésion des principaux fabricants de CFC du Tiers Monde (Chine, Brésil, Inde, Corée, Taïwan...) et des deux pays du Sud les plus peuplés (l'Inde et le Chine) se fait remarquer encore davantage.

Au total, ce sont ainsi les deux tiers environ de la population mondiale qui ne sont pas encore associés aux mesures tendant à préserver la couche d'ozone.

Cette situation est d'autant plus regrettable, on l'a vu, que :

- la croissance de la demande par ces pays de biens et des services qui supposent actuellement l'utilisation de CFC est très rapide ;
- leur production, face à ces besoins, peut atteindre des montants non négligeables (130 000 t en l'an 2000 pour la Chine ; 45 000 t pour l'Inde...).
- il suffit du maintien de 20 % de la production actuelle de CFC pour que le trou d'ozone antarctique ne puisse pas être comblé.

Les pays du Sud ne sont pourtant pas foncièrement hostiles aux mesures proposées par le Protocole de Montréal. Au contraire, ils ne sont même pas opposés, au fond, à un durcissement de celui-ci (42). Le discours que les pays en développement adressent aux pays industrialisés ne consiste pas à leur dire : « laissez-nous polluer autant que vous l'avez fait avant nous et après nous verrons... »

Il pourrait plutôt se résumer en une demande du type : « Donnez-nous les moyens de poursuivre notre développement économique sans nuire à l'environnement ».

Il importe autant de répondre à cet appel que de durcir le Protocole de Montréal.

IV - LE PROTOCOLE DOIT ÊTRE DURCI ET RÉCEVOIR L'ADHÉSION DES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

A - UN DURCISSEMENT DU PROTOCOLE DE MONTRÉAL EST NÉCESSAIRE

L'article 6 du Protocole de Montréal prévoit que les Parties doivent évaluer l'efficacité des mesures de réglementation en vigueur, au moins tous les quatre ans, à partir de 1990.

L'article 2 précise que des mesures plus rigoureuses peuvent alors être prescrites. Les Parties peuvent notamment décider de compléter la liste des substances réglementées.

La première réunion qui se tiendra à cet effet aura lieu à Londres du 27 au 29 juin 1990.

Cette réunion plénière a été préparée par de nombreux groupes de travail qui ont tenu session en 1989 et 1990 :

- groupes d'experts sur les incidences financières du Protocole et les problèmes juridiques que soulève son application ;

- groupes à composition non limitée des parties sur les problèmes Nord-Sud (transferts de technologie, aide financière), et sur les propositions d'amendements au protocole, etc.

Ces réunions préparatoires révèlent un consensus des Parties sur la nécessité d'un renforcement du Protocole. Un durcissement de celui-ci n'est donc pas seulement écologiquement souhaitable, il est aussi politiquement inéluctable au niveau international.

- Un élargissement du champ d'application des accords de Montréal est envisagé ;

- Des mesures plus restrictives paraissent inévitables.

- Mais le cas des substituts de la première génération (HCFC) mérite réflexion.

1. L'ÉLARGISSEMENT DU CHAMP D'APPLICATION DE L'ACCORD

Le protocole révisé devrait viser non seulement les CFC-11, 12, 113, 114 et 115 et les halons 1211, 1301 et 2402 mais aussi :

- les CFC et halons non encore réglementés ;
- le tétrachlorure de carbone ;
- le méthylchloroforme ;
- et peut-être les HCFC qui, à défaut de voir leurs émissions limitées, pourraient être surveillés et autorisés seulement à titre provisoire.

1.1. L'INCLUSION DES CFC ET HALONS NON RÉGLEMENTÉS

Le groupe de travail à composition non limitée des parties, chargé de préparer des projets d'amendement au Protocole, a proposé la création d'articles additionnels tendant à limiter les émissions, qui ne l'étaient pas encore, de CFC et de halons (1).

A cette fin, une annexe B, nouvelle, comportant une liste additionnelle de substances contrôlées, serait rajoutée au Protocole.

Les CFC et les halons nouvellement réglementés en constitueraient les groupes I et II.

L'emploi de ces substances devrait être progressivement réduit puis interdit selon le calendrier suivant (différentes options restant possibles) :

Tableau 64 : Calendriers de suppression des CFC et halons non réglementés actuellement

	Nouveaux CFC	Nouveaux Halons
1. Année de référence	1986 ou 1989	idem
2. Première réduction :		
- année	1992, 1993 ou 1995	1992
- pourcentage	- 50 % ou - 20 %	0 (maintien au niveau de référence)
- marge PVD (1)	+ 5 %, + 10 % ou + 15 %	+ 5 %, + 10 % ou + 15 %
3. Deuxième réduction :		
- année	1995, 1997 ou 1998	1995
- pourcentage	- 85 % ou - 50 %	- 50 % ou - 85 %
- marge PVD (1)	+ 5 %, + 10 % ou + 15 %	+ 5 %, + 10 % ou + 15 %
4. Interdiction finale :		
- année	2000	1995 2000 ou 2005 (sauf usages essentiels)
- marge PVD (1)	+ 5, + 10 ou + 15 %	+ 5, + 10 ou + 15 %

(1) Augmentation de production autorisée pour satisfaire les besoins fondamentaux des pays en développement et à des fins de rationalisation industrielle

1.2. LE TÉTRACHLORURE DE CARBONE

Il a déjà été montré dans ce rapport que le tétrachlorure de carbone méritait particulièrement d'être réglementé par le Protocole, étant donné son potentiel de destruction de l'ozone, sa durée de vie et le volume de sa production.

Sa suppression, en plusieurs étapes, est envisagée, selon les différentes options suivantes :

Tableau 65 : Calendrier de suppression du tétrachlorure de carbone

1. Année de référence	1986 ou 1989
2. Stabilisation	retour en 1992 au niveau de référence
3. Première réduction - année - pourcentage	1993 ou 1995 - 50 % ou - 20 %
4. Deuxième réduction : - année - pourcentage	1995, 1997 ou 1998 - 85 % ou - 50 %
5. Interdiction finale - année	2000

N.B. : Des dépassements de 5, 10 ou 15 % des niveaux de production seraient autorisés au profit des PVD.

De nombreux pays ont déjà interdit le tétrachlorure de carbone, en raison de sa toxicité, en ce qui concerne les utilisations, autres que la fabrication de CFC, pour lesquelles des produits de substitution sont d'ores et déjà disponibles.

1.3. LE MÉTHYLCHLOROFORME

La nocivité du méthylchloroforme (ou trichloréthane) est moins évidente que celle du tétrachlorure de carbone, la durée de vie de ce composé est, en effet, plus brève (six ans au lieu de cinquante ans) et son potentiel de destruction de l'ozone est beaucoup moins élevé (0,12 au lieu de 1,2 au maximum).

Un des scénarios cités par M. MÉGIE, montre, d'ailleurs, qu'une utilisation continue du méthyl chloroforme jusqu'en 2030 n'entraîne pas d'augmentation de la valeur maximum de la charge en chlore dans l'atmosphère, et prolonge seulement de deux à trois ans le délai nécessaire pour revenir au seuil de 2 milliardièmes, préalable au trou d'ozone antarctique (le scénario de référence prévoit une suppression totale en l'an 2000 des émissions d'autres produits chlorés).

Le méthylchloroforme est un solvant à usages multiples largement utilisé. Des produits de remplacement existent pour trois de ses principales utilisations (solvants de nettoyage, produits adhésif, aérosols).

Mais le méthylchloroforme peut être lui-même substitué au CFC-113, plus dangereux pour l'ozone, en tant que solvant dans l'électronique.

C'est sans doute la raison pour laquelle des options plus divergentes, et parfois moins contraignantes, que dans le cas des autres produits, sont proposées par les différents pays, en ce qui concerne le calendrier de sa suppression progressive.

Tableau 66 : Calendrier de suppression du méthylchloroforme

1. Année de référence	1986 ou 1989
2. Stabilisation	1993 (retour au niveau de 1986 ou 1989)
3. Première réduction - année - pourcentage	soit à décider en 1994, soit à partir de 1994 ou 1995 soit à décider en 1994, soit : - 25 % à partir de 1994 - 50 % ou - 30 % à partir de 1993 - 50 % en l'an 2000
4. Deuxième réduction : - année - pourcentage	1995, 1997 ou 1998 - 85 % ou - 50 %
5. Interdiction finale - année	2000, 2010 ou 2050

N.B. : Mêmes marges de dépassement des limites de production que pour les autres substances en ce qui concerne les PVD.

Il apparaît ainsi que les pays qui ont une industrie électronique importante (le Japon, par exemple) sont enclins à suggérer, en ce qui concerne la réglementation du méthylchloroforme, soit de repousser les décisions à plus tard (en 1994), soit de retenir une date de suppression définitive beaucoup plus éloignée (2050 au lieu de 2000).

Il paraît souhaitable, non seulement d'inclure les nouveaux composés, qui viennent d'être évoqués, dans le champ d'application des accords de Montréal, mais aussi de se montrer plus restrictif à l'égard des substances déjà réglementées.

2. DES MESURES PLUS RESTRICTIVES PARAISSENT INÉVITABLES

Il a déjà été montré dans ce rapport (cf. III - B - 3) que le dispositif actuel du Protocole de Montréal n'empêcherait pas, d'après les modèles, la concentration de chlore dans l'atmosphère de continuer à croître jusqu'à des niveaux inacceptables (7,15 millièmes en 2060, 8,09 en 2090...).

Les résultats des scénarios du PNUE étudiés par M. MÉGIE (2), font apparaître :

- qu'il est nécessaire, pour revenir, avant la fin du XXI^e siècle, au seuil de 2 milliardièmes, préalable au trou d'ozone antarctique, de supprimer les émissions de tous les composés chlorés déjà cités (y compris les CFC actuellement réglementés) ;

- qu'un délai de cinq ans dans la date de suppression envisagée repousse de dix-huit ans l'année à laquelle ce seuil est rejoint.

2.1. CONCERNANT LES CFC

Le délai de cinq ans évoqué ci-dessus non seulement repousse de dix-huit ans la réalisation de l'objectif visé mais se traduit par une augmentation de 0,5 milliardième de la charge maximum en chlore, due pour 87 % aux seuls CFC.

Il importe donc, en ce qui concerne ces derniers, d'aller plus vite et plus loin que le Protocole actuel qui ne prévoit qu'une réduction de 50 % en l'an 2000.

C'est ce qui va, semble-t-il, résulter de la Conférence de Londres, mais différentes étapes sont proposées pour y parvenir :

Tableau 67 : Calendrier de réduction des émissions de CFC déjà réglementés

	Protocole actuel	Différentes suggestions pour Londres
1. Année de référence	1986	1986
2. Objectif final	- 50 % du niveau de 1986 au 30/6/1999	- 100 % du niveau de 1986 en l'an 2000
3. Étapes intermédiaires	<ul style="list-style-type: none"> • gel au niveau de 1986 en 1992 - 20 % au plus tard le 30/6/1994 	<ul style="list-style-type: none"> Proposition USA - 20 % en 1993 Proposition CEE - 50 % en 1992 - 85 % en 1995 Proposition de M. TOLBA - 20 % en 1993 - 85 % en 1997

Les principaux producteurs des pays industrialisés paraissent prêts - ainsi qu'il a été montré - à relever ce défi.

L'accélération de la suppression des CFC, qui demande aux producteurs d'importants efforts et l'intégration dans le Protocole de mesures relatives à l'interdiction en l'an 2000 du tétrachlorure de carbone, paraissent particulièrement justifiés.

Il ressort, en effet, des scénarios évoqués par M. MÉGIE (2) que :

- le facteur qui conditionne le plus le retour au seuil de 2 milliardièmes est la date d'élimination des constituants à durée de vie longue (CFC et CCl₄) ;

- il n'est pas possible de se contenter de demi-mesures : l'objectif des 2 milliardièmes n'est atteint qu'en 2175 (au lieu de 2073) pour une réduction de 90 % de la production de l'ensemble des composés chlorés (y compris le HCFC-22) et ne l'est jamais dans le cas d'une réduction de 80 %.

Les mesures prises concernant les halons ne sont pas non plus superflues bien qu'il reste à distinguer de façon plus précise leur contribution à la destruction de l'ozone de celle des sources naturelles de brome.

2.2. CONCERNANT LES HALONS

Les "halogènes" sont des éléments aux propriétés voisines : le fluor (F), le chlore (Cl), le brome (Br) et l'iode (I), capables, au sens étymologique du terme, de générer des sels (fluorures, chlorures, bromures).

Le mot "halons" vient, lui, de la contraction de deux mots anglais : HALogenated hydrocarbONS. Il s'agit d'hydrocarbures halogénés, c'est-à-dire d'hydrocarbures dans lesquels les atomes d'hydrogène ont TOUS été remplacés par des halogènes :

- le fluor, le brome et le chlore, dans le cas du halon 1211 (CF₂ClBr) ;
- le fluor et le brome seulement, dans le cas du halon 1301 (CF₃Br).

La différence avec les CFC, qui sont aussi des composés halogénés (totalement ou partiellement), est que ceux-ci sont toujours des constituants chlorés et ne comprennent pas de brome alors que les halons sont toujours des constituants bromés (qui contiennent parfois aussi du chlore comme le halon 1211).

Les halons sont des agents extincteurs d'incendie très efficaces (sous l'action de la chaleur, leurs molécules se dissocient et génèrent des radicaux libres qui s'opposent au développement des réactions de la combustion). Le 1211 est utilisé essentiellement dans les extincteurs mobiles et le 1301 pour la protection totale de locaux étanches (centraux d'ordinateurs, par exemple).

Malheureusement, ainsi que le souligne notre expert, M. MÉGIE (2), «on peut estimer que l'efficacité de destruction de l'ozone par les constituants bromés est environ trente fois supérieure à celle des constituants chlorés» (même si de nombreuses incertitudes subsistent quant au rôle du brome dans les équilibres atmosphériques, notamment dans les régions polaires).

Aussi une augmentation de la charge en brome de l'atmosphère, correspondant à un gel des émissions des halons au niveau de 1990, est-elle censée avoir un effet équivalent à une augmentation d'un milliardième de la charge en chlore (bien que la production annuelle mondiale de halons ne soit que de 15 000 à 20 000 tonnes, dont 20 à 30 % seulement sont rejetés dans l'atmosphère).

Il n'existe pas actuellement de produits chimiques de substitution aux caractéristiques équivalentes à celles des halons. Cependant, d'autres moyens adéquats de lutte contre l'incendie sont disponibles pour beaucoup d'utilisations (gicleurs d'eau, extincteurs à

gaz carbonique). Des mesures de prévention des incendies peuvent, par ailleurs être prises (détection, zones à coupe-feu, isolation des câbles et des fils, etc.).

Les autres produits auxquels il est ainsi possible de recourir (sels, poudres d'ammoniac, CO₂, eau + adjuvants) n'ont incontestablement pas la même efficacité, aussi l'utilisation de halons paraît-elle indispensable pour protéger, notamment, les installations dans lesquelles le matériel ne peut pas être séparé du personnel (sous-marins, avions, plateformes "off shore", etc.).

Les halons peuvent, d'autre part, être économisés : 14 % de la consommation du halon 1211 en 1986 (extincteurs mobiles) correspondaient, en effet, à des fuites ou à des exercices d'entraînement du personnel et 21 % de celle du halon 1301 (systèmes d'extinction automatique), la même année, était liée également à des fuites ou à des déclenchements injustifiés.

Il est possible d'éviter ces gaspillages ainsi que ceux qui résultent des essais réels d'émission à la réception des installations, grâce à des mesures de contrôle ou à la formation du personnel (installateurs ou exploitants).

C'est pourquoi, un durcissement du Protocole de Montréal est aussi envisagé en ce qui concerne les halons.

Tableau 68 : Calendrier de suppression des halons réglementés

	Dispositif actuel du Protocole de Montréal	Renforcement envisagé à Londres
Année de référence :	1986	1986 ou 1989
Objectif ultime :	gel au niveau de 1986 à partir du 1/2/1992	- 100 % en 1995 (production) 2000 ou 2005 (consommation) sauf usages essentiels
Étapes intermédiaires :		- 50 % en 1995 - 10 % à - 50 % en 2000

L'URSS se démarque des autres pays en proposant une réduction de 10 à 50 % seulement de la consommation de halons en l'an 2000 car elle doit équiper ses centrales nucléaires et ses sous-

marins atomiques d'équipement de protection contre l'incendie fonctionnant au halon 1301.

La définition des usages essentiels pour lesquels des exemptions seront permises ne sera pas facile. Il serait cependant préférable, pour faciliter le contrôle du respect des engagements souscrits, qu'une telle définition soit inscrite dans le Protocole plutôt que laissée à la libre appréciation des Parties.

Dans les réunions préparatoires de la Conférence de Londres deux groupes de pays se distinguent :

- ceux qui, tout en étant dans l'ensemble assez proches du point de vue majoritaire, adoptent des positions retardatrices en ce qui concerne certains produits particulièrement sensibles pour eux (le méthyl chloroforme pour le Japon, le halon 1301 pour l'URSS) ;

- les "maximalistes" (pays nordiques, Australie, Nouvelle-Zélande, Canada...) qui prennent presque systématiquement les positions les plus restrictives. Ces pays se signalent notamment, par leur attitude, très dure, vis-à-vis des HCFC, substituts de première génération des CFC qui contiennent du chlore et peuvent contribuer, de façon parfois non négligeable, à l'effet de serre.

Le cas du HCFC mérite pourtant réflexion dans la mesure où ce sont des produits, beaucoup moins nuisibles à l'environnement que les CFC, pour le développement desquels l'industrie a déjà beaucoup investi, et dont il paraît souvent difficile de se passer.

3. LE CAS DES SUBSTITUTS DE PREMIÈRE GÉNÉRATION (HCFC) MÉRITE RÉFLEXION

Si l'arrêt de l'augmentation de la charge en chlore de l'atmosphère paraît être lié à une suppression des émissions de composés chimiques chlorés à durée de vie longue, cette solution ne tient pas compte des besoins incompressibles des marchés et du jeu des forces productives dans le monde.

En réalité, en l'état actuel des nécessités de la consommation, notamment alimentaire, et des techniques, l'arrêt pur et simple des émissions de chlore à durée de vie longue supposerait un arrêt total de l'utilisation de tous les composés chlorés eux-mêmes à durée de vie longue.

Ceci veut dire un bannissement pur et simple des CFC mais aussi des HCFC.

Ce bannissement ne paraît ni justifié sur un plan scientifique ni opportun sur le plan de l'efficacité.

3.1. LES HCFC, UN PROGRÈS IMPORTANT POUR L'OZONE ET L'EFFET DE SERRE

Les qualités comparées des HCFC par rapport aux CFC, vis-à-vis de la protection de la couche d'ozone et de la limitation de l'effet de serre, ont été détaillées à plusieurs reprises dans les développements précédents.

Le tableau suivant résume ces avantages.

Tableau 69 : Pouvoirs destructeurs de l'ozone et contribution à l'effet de serre des HCFC comparés aux CFC

Produits	Durée de vie (années)	ODP (1)	GWP (2)
CFC-11	60	1	1
CFC-12	120	1	2,8
CFC-113	90	0,8	1,4
CFC-114	200	1	3,7
CFC-115	400	0,6	3,6
HCFC-22	15,3	0,05	0,34
HCFC-123	1,6	0,017	0,017
HCFC-124	6,6	0,020	0,92
HCFC-141b	7,8	0,10	0,087
HCFC-142b	19,1	0,05	0,34

Références B (9) et (11)

(1) ODP : pouvoir destructeur de l'ozone

(2) GWP : contribution à l'effet de serre.

Il est clair que les incertitudes concernant les ODP et les GWP - grandeurs liées comme on l'a vu aux hypothèses des modèles qui servent à leur calcul - ne sont pas, quels que soient les modèles utilisés et quels que soient les auteurs, de nature à remettre en cause l'avantage, tant vis-à-vis de la protection de la couche d'ozone que vis-à-vis d'une moindre participation à l'effet de serre, que représente le remplacement des CFC par les HCFC. En outre, la faiblesse de la valeur des ODP des HCFC est telle qu'elle ne saurait être remise en cause par les limites de la précision des méthodes utilisées pour leur détermination.

La solution du recours aux HCFC représente un progrès important. Ce progrès sera maximisé par la mise en oeuvre simultanée d'un meilleur confinement et le recours à des produits de

remplacement, comme cela commence à se faire dans la pratique et comme cela est systématiquement recommandé dans ce rapport.

Mais d'autres raisons militent en faveur de l'utilisation des HCFC : celles d'une approche réaliste en termes industriels et économiques.

3.2. LES HCFC SONT INDISPENSABLES POUR L'EFFICACITÉ DU PROCESSUS DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS CHLORÉES.

Le point critique de la protection de la couche d'ozone est celui de la réduction la plus rapide possible des émissions de CFC.

Si différentes méthodes doivent et peuvent être suivies pour atteindre cet objectif, l'utilisation des HCFC constitue, on l'a vu, une voie indispensable.

La question est donc de favoriser le passage rapide et généralisé aux HCFC.

Ainsi qu'il a été vu plus haut, deux éléments sont essentiels.

Le premier élément est que les unités de production de HCFC seront nécessairement des installations nouvelles, distinctes de celles qui, actuellement ou potentiellement, servent à la production de CFC. Une durée d'utilisation minimale de ces installations nouvelles c'est-à-dire entre vingt et quarante ans, est nécessaire pour que les industriels puissent engager les investissements correspondants sur les bases d'une rentabilité suffisante.

Le deuxième élément clé est la croissance des besoins des Pays en Voie de Développement en équipements de réfrigération, aussi bien domestiques qu'industriels et commerciaux. Ceci implique que ces pays devront pouvoir satisfaire leurs besoins d'approvisionnement en fluides de réfrigération, en mousses d'isolation et en technologies d'aval compatibles avec les HCFC.

Ainsi, il apparaît que non seulement, les HCFC ne doivent pas faire l'objet de restrictions d'utilisation dans l'immédiat mais qu'une pérennité doit leur être garantie.

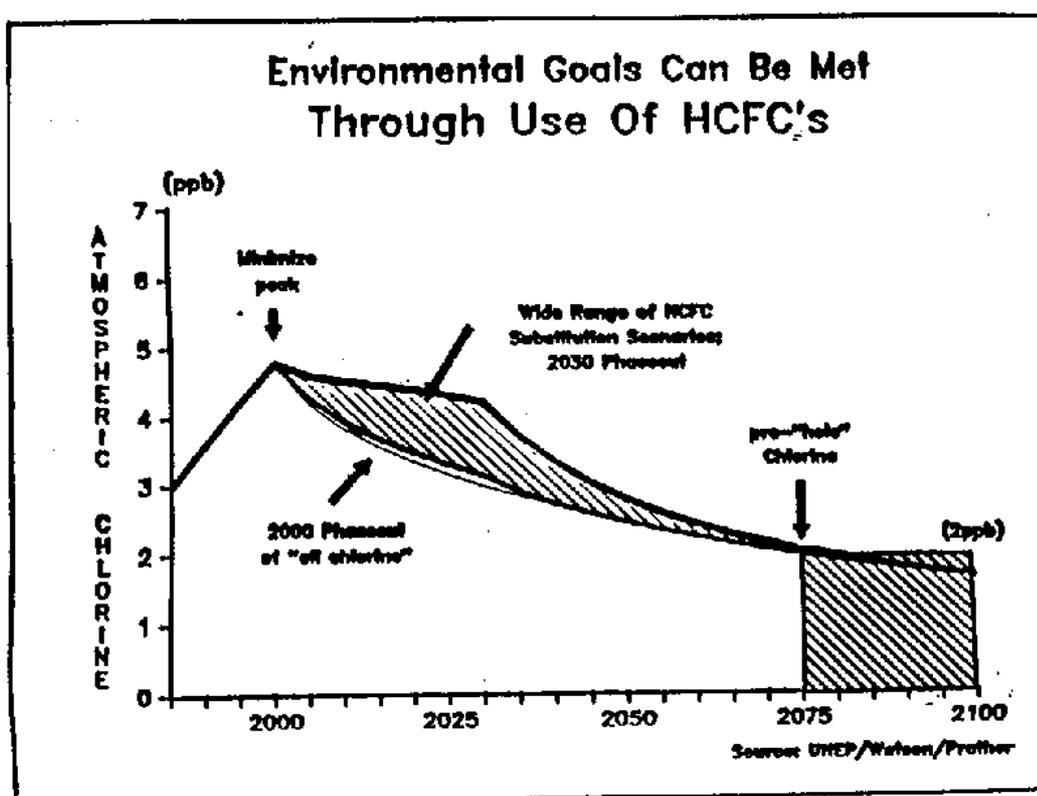
Faute de quoi, les industriels producteurs actuels de CFC, fabricants de produits utilisant actuellement les CFC ne pourraient, tant dans les pays industrialisés que dans les Pays en Voie de développement, s'engager dans les mutations nécessaires.

Et l'on verrait alors la production de CFC non pas diminuer mais reprendre au niveau mondial, de sorte que les émissions de

produits chlorés à durée de vie longue et au total la teneur en chlore de l'atmosphère continueraient de croître, ce qui est évidemment à l'inverse de l'objectif recherché.

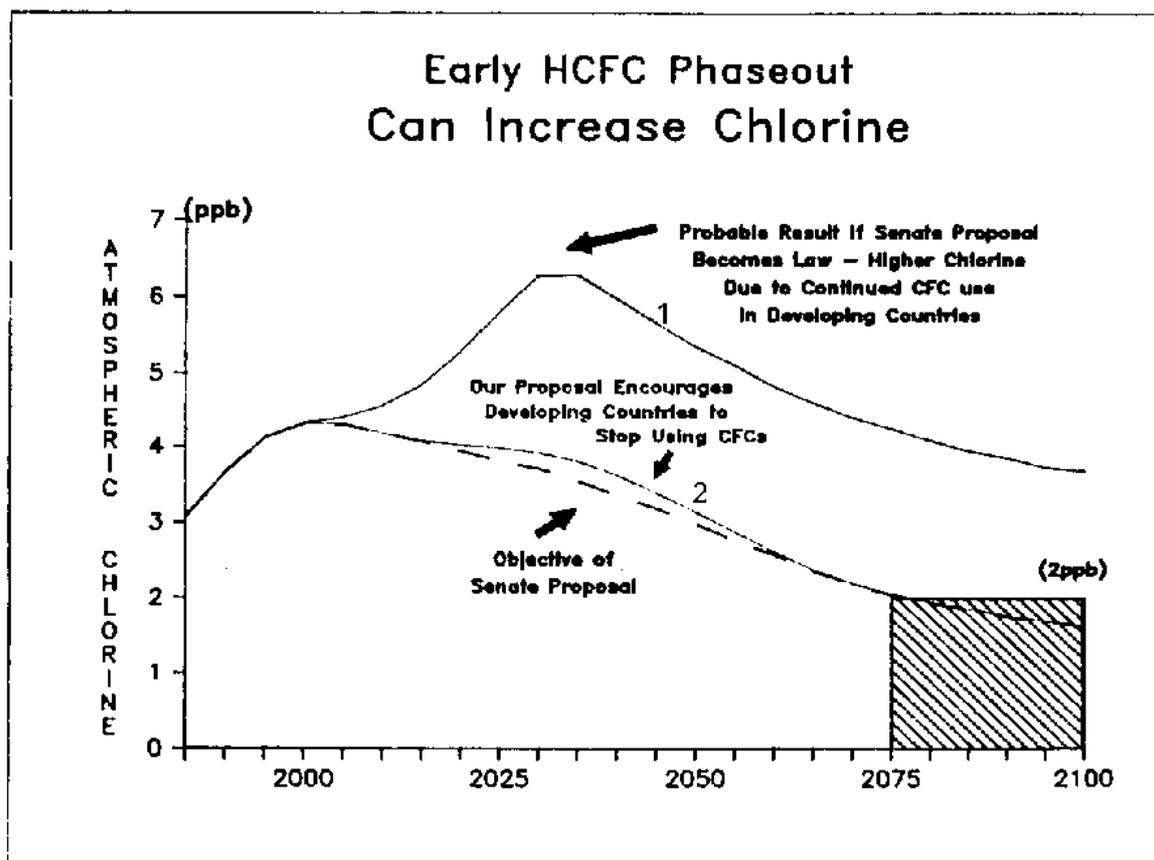
Le graphique 27 élaboré par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement, montre bien l'impact favorable sur la charge en chlore de l'atmosphère qu'aurait une introduction rapide des HCFC et leur utilisation jusqu'en 2030, assortie d'une interdiction en l'an 2000 des CFC, du tétrachlorure de carbone et du méthylchloroforme.

Graphique 27 : Impact d'une autorisation jusqu'en 2030 des HCFC sur la charge en chlore de l'atmosphère



Pour illustrer les inconvénients d'une interdiction trop rapide des HCFC dans des équipements nouveaux, DUPONT a élaboré le graphique 28. Cette hypothèse correspond à une proposition faite par le Sénat des Etats-Unis, dans le cadre de la discussion du "Clean Air Act".

Graphique 28 : Impact sur la charge en chlore de l'atmosphère d'une durée de vie autorisée insuffisante (25 ans) pour les HCFC



Référence B (9)

La courbe 1 correspond aux effets attendus par DUPONT de la proposition sénatoriale, à savoir une interdiction, en 2015, de l'utilisation des HCFC dans des équipements nouveaux. La charge en chlore de l'atmosphère continuerait de croître jusqu'en 2030, éloignant de plus d'un demi-siècle le retour à la teneur de 2 ppbv considérée comme la norme à atteindre (situation précédant l'apparition du trou d'ozone dans l'Antarctique). La courbe 2 correspond à un report à 2030-2040 de l'interdiction d'utilisation des HCFC dans les nouveaux équipements. On constate, que dans cette hypothèse, le retour à 2 ppbv s'effectue en 2075.

Une autorisation suffisamment durable des HCFC apparaît donc comme un point critique pour la protection de la couche d'ozone.

B - LES CONDITIONS D'UNE ADHÉSION DES PAYS EN DÉVELOPPEMENT DOIVENT ÊTRE SATISFAITES

La principale condition mise par les pays du Sud à leur adhésion au Protocole de Montréal concerne la prise en charge du surcoût qui pourrait en résulter pour leurs économies. Il importe donc de tenter d'évaluer cette dépense supplémentaire.

1. L'ÉVALUATION DU COÛT, POUR LES PAYS DU SUD, D'UN RENONCEMENT AUX CFC

L'article 11 du Protocole de Montréal prévoyait que les Parties devaient se réunir dans l'année suivant l'entrée en vigueur de celui-ci afin, notamment, de passer en revue son application, d'examiner et de prendre les mesures qui pouvaient être nécessaires à la réalisation de ses objectifs.

C'est ce qui fut fait à Helsinki, en mai 1989.

L'une des décisions prises dans la capitale finlandaise fut de créer un groupe de travail à composition non limitée des parties chargé, entre autres, de définir les conditions auxquelles les Pays en Développement pourraient souscrire aux obligations du Protocole (4).

Des sessions du groupe de travail ainsi institué ont eu lieu récemment à Genève, du 26 février au 5 mars 1990, et du 9 au 11 mai 1990, pour définir plus particulièrement les modalités des mécanismes financiers et autres qui doivent rendre possible le respect des obligations du Protocole par les pays en développement.

Pour faciliter la réflexion à ce sujet, le PNUE a fait réaliser des études relatives aux incidences financières de l'application des dispositions du Protocole de Montréal pour les Pays en Développement.

Etant donné les problèmes rencontrés pour mener à bien ces travaux, leurs résultats ne permettent de cerner la réalité que de façon très approximative.

1.1. UNE APPROCHE DIFFICILE

Comme le notent tout d'abord les experts du PNUE dans une étude préliminaire sur les hypothèses et méthodes de calcul utilisés (5) «l'évaluation du surcoût des dépenses qu'entraînerait le remplacement des CFC est rendue difficile par les incertitudes dont

sont entachés les choix techniques et économiques qui pourront être faits».

L'absence de données précises, pays par pays, est également un handicap - une étude, assez approximative mais qui doit être affinée est disponible en ce qui concerne l'Inde. Des études sur le Brésil, la Chine et l'Égypte sont en cours et plus ou moins avancées. Le manque de données relatives aux autres pays se fait cruellement sentir.

L'hypothèse d'une baisse significative de rendement énergétique liée à l'emploi de produits de remplacement est controversée et sa comptabilisation fait aussi, en tout état de cause, l'objet de querelles d'experts (6).

D'autres incertitudes ont trait aux conditions futures d'approvisionnement, en CFC d'une part (compte tenu des restrictions apportées à leur production), et en substituts d'autre part (selon leur disponibilité et leur qualité initiales). Ainsi, les produits de remplacement des CFC, selon certaines hypothèses, ne seraient introduits dans les Pays en Développement qu'aux environs de l'an 2000 (on ignore d'ailleurs dans quelle mesure le prix des nouveaux produits baisserait au fur et à mesure qu'augmenterait leur production). D'ici là, le fonctionnement et l'installation d'industries consommatrices de CFC pourraient se trouver sérieusement perturbés (6).

M. MARKANDYA, consultant au cabinet d'études indien "Development Alternatives", souligne, par ailleurs, la difficulté d'évaluer les ressources nécessaires à la restructuration des industries utilisatrices.

«S'il est relativement aisé de calculer le surcroît de dépenses qu'entraînera l'emploi de techniques et de produits de remplacement plus coûteux - observent d'autres experts du même cabinet - il est plus difficile de calculer les coûts indirects de la conversion qui seront relativement élevés».

"Development Alternatives" conclut en insistant sur le fait que «les conditions dans lesquelles les Pays en Développement acquièrent généralement les techniques rendent leurs économies particulièrement sensibles aux changements imposés de l'extérieur».

Les experts indiens ajoutent que «l'imposition brutale d'une réglementation quelconque pourrait avoir des répercussions durables et multiples dont le coût pourrait être considérable» (6).

Toutes les difficultés méthodologiques et les incertitudes qui viennent d'être évoquées expliquent que les chiffres avancés, qui

peuvent du reste varier assez fortement, ne sont que des ordres de grandeur.

1.2. DES ESTIMATIONS APPROXIMATIVES

Dans une note de synthèse sur les incidences financières du Protocole de Montréal pour les Pays en Développement, le consultant indien précité, M. MARKANDYA, expert auprès du PNUE, a évalué à **1,8 milliard de dollars, pour la période 1990-2008**, le coût de l'emploi par ces pays de substances sans danger pour l'ozone. Ce total correspond à une **dépense annuelle moyenne d'environ 150 millions de dollars** (7).

Toutefois, la conversion industrielle nécessaire pourrait mobiliser des ressources budgétaires de l'ordre de 240 à 300 millions de dollars durant chacune des trois premières années de la période considérée.

Au surcroît de dépenses lié à l'emploi de produits de remplacement (1,8 milliard de dollars), qui représente le poste essentiel, s'ajoutent - selon M. MARKANDYA - les coûts relatifs :

- à l'amortissement du matériel de fabrication des CFC (155 millions de dollars) ;

- à l'adaptation des industries consommatrices (200 millions de dollars) ;

- enfin, à l'importation de produits de remplacement des CFC.

M. MARKANDYA a lui-même reconnu le caractère très approximatif et peut-être surestimé de ses évaluations.

Elles ne correspondent pourtant qu'au bas de la fourchette de **1,8 à 5 milliards de dollars** (8) dans laquelle le Directeur exécutif du PNUE, le Docteur TOLBA, situe, pour sa part, le coût total, sur dix à dix-huit ans, d'un renoncement des Pays en Développement aux CFC (cf. compte rendu de la session de Genève du 26 février au 5 mars 1990).

Une estimation encore plus élevée est avancée dans une étude de la société Mac Kinsey qui évalue, de son côté, à un **total compris entre 6 et 7 milliards de dollars pendant dix ans** (soit 600 à 700 millions par an), le coût global, pour les pays du Sud d'un abandon des CFC (9).

Le rapport Mac Kinsey distingue :

- des secteurs de substitution à faible coût (aérosols, solvants, réfrigération industrielle) dans lesquels les dépenses de conversion nécessaires seraient de l'ordre de 150 à 200 millions de dollars par an ;

- et des secteurs de substitution à coût élevé (essentiellement le reste du secteur de la réfrigération et celui de la climatisation, dans lequel le surcroît de dépenses transitionnel atteindrait 400 à 500 millions de dollars par an).

En ce qui concerne les estimations par pays, la Chine a annoncé que le remplacement des CFC lui coûterait entre 1 et 1,5 milliard de dollars.

L'Inde, de son côté, a fait réaliser une étude afin d'évaluer les conséquences pour son économie d'une adhésion au Protocole de Montréal (10).

Il en ressort que le surcoût lié au respect des exigences du Protocole varierait fortement suivant que la recharge des réfrigérateurs et climatiseurs domestiques en CFC serait autorisée ou non jusqu'en 2010.

Dans la négative, il en coûterait à l'économie indienne environ 1,2 milliard de dollars.

Dans l'affirmative, la dépense ne serait plus que de 120 millions de dollars, le consommateur se contentant de payer une facture d'électricité plus élevée sans avoir à remplacer prématurément ses équipements.

Il doit être observé cependant que cette étude, qui sera affinée dans un deuxième temps, ne prend en compte ni le coût d'éventuels transferts de technologie (acquisition de licences, etc.), ni l'impact de mesures d'économie ou de recyclage des CFC.

L'appréciation par les pays du Sud des résultats de la prochaine réunion de Londres et, partant, les chances qu'ils adhèrent au Protocole de Montréal révisé, dépendront des mécanismes prévus pour la prise en charge des dépenses qui viennent d'être évoquées.

2. LES CHANCES DE SUCCÈS DE LA RÉUNION DE LONDRES

D'importants progrès ont été enregistrés dans les réunions préparatoires de la Conférence de Londres qui se sont tenues dernièrement à Genève, mais des obstacles restent à surmonter, en ce

qui concerne notamment l'attitude des entreprises multinationales et celle des Etats-Unis.

2.1. LES PROGRÈS ENREGISTRÉS

Les revendications des pays du Tiers Monde ont été prises en considération de trois façons :

- il est proposé, tout d'abord, de supprimer les clauses du Protocole que ces pays jugent discriminatoires ;

- la définition du contenu des transferts de technologie a, d'autre part, été précisée ;

- enfin, des mécanismes de financement de ces transferts sont sérieusement envisagés.

2.1.1. Les propositions de suppression des clauses du Protocole jugées discriminatoires

Le groupe de travail à composition non limitée des parties, dont la création a été décidée à Helsinki, en mai 1989, a été chargé non seulement d'étudier les incidences financières pour les Pays en Développement d'un renoncement aux CFC mais aussi de rédiger des propositions concernant les ajustements et amendements à apporter au Protocole de Montréal.

Un document récapitulant les modifications que le groupe propose d'apporter au Protocole a recueilli l'approbation des représentants des Parties présentes à Genève du 8 au 14 mars 1990 (1).

Il est suggéré notamment, de supprimer toutes les dispositions, évoquées plus haut, que les pays du Sud jugent discriminatoires concernant :

- les règles de majorité relatives à la prise des décisions (il ne serait plus nécessaire que la majorité réunie corresponde à 50 % de la production mondiale de CFC ou bien il faudrait alors recueillir, en même temps, le consentement des deux tiers des Pays en Développement) ;

- les exportations de CFC par les pays du Sud (l'interdiction d'exporter des substances réglementées s'appliquerait à toutes les parties sans distinction) ;

- enfin, les règles de dénonciation du Protocole seraient identiques pour tous les Etats (toute demande dans ce sens ne serait recevable qu'au minimum un an après sa notification et à l'issue de quatre années de respect des obligations initialement acceptées).

Les besoins des Pays en Développement seraient, en outre, mentionnés dans des parties du texte où il n'y était pas fait référence. Le préambule du Protocole, par exemple, proclamerait que les substances qui appauvrissent l'ozone doivent être finalement éliminées en fonction de l'évolution des connaissances scientifiques et compte tenu non seulement de «considérations techniques et économiques» mais aussi «des besoins des Pays en Développement».

Enfin, le plafond de consommation en dessous duquel les Pays en Développement sont autorisés à surseoir de dix ans à l'application des règles du Protocole, pourrait être calculé en prenant comme référence non seulement une quantité de 0,3 kg par habitant ou la moyenne 1995-1997, mais aussi le double des niveaux de la période 1986-1990 ou 1986-1997. Cette proposition donnerait ainsi plus de souplesse aux pays du Sud dans la mise en oeuvre des exceptions aux restrictions quantitatives du Protocole qui leur sont consenties.

En outre, la définition du contenu des transferts de technologie dont ils doivent bénéficier serait affinée.

2.1.2. L'affinement de la définition du contenu des transferts de technologie

Un article 10 bis nouveau, relatif aux transferts de technologie en faveur des Pays en Développement, devrait être introduit dans le Protocole.

Il était question, initialement, que ce nouvel article traite à la fois du contenu des transferts et de leur mode de financement mais le Directeur exécutif du PNUE, M. TOLBA, propose que seuls les problèmes financiers y soient abordés, les transferts de technologie étant évoqués, pour leur part, dans l'article 5 qui serait modifié à cette fin (11).

Quoi qu'il en soit, le Protocole indiquerait donc que ces transferts doivent porter sur :

- les procédés et les produits indispensables au recyclage et aux économies de substances contrôlées ;

- les matières premières nécessaires à la fabrication de produits de remplacement ;

- l'utilisation des substituts en tant que produits intermédiaires ;

- enfin, leur utilisation finale.

Un sous-groupe de travail des Parties sur les coûts supplémentaires supportés par les pays du Sud en cas d'adhésion au Protocole a fourni, par ailleurs, une liste indicative détaillée des conséquences financières des transferts de technologie (12).

Cette liste permet de se faire une idée plus précise du contenu de ces transferts bien que le document dont elle est issue doive théoriquement se limiter à en examiner le financement.

Il apparaît que sont ainsi concernés :

- l'achat de brevets et le paiement de redevances rendus nécessaires par l'utilisation de nouvelles technologies ;
- le recyclage indispensable du personnel ;
- l'effort de recherche-développement suscité en conséquence ;
- la reconversion, dans la mesure du possible, des équipements existants au niveau tant de la production que de l'utilisation des CFC ;
- l'installation de nouvelles unités de production de substituts ;
- enfin, le remplacement éventuel du matériel de l'utilisateur.

Le coût de l'importation de produits de substitution figure également dans la liste susvisée. Un projet d'amendement à l'article 5 du Protocole prévoit que toute partie qui exporte, à leur insu, vers les pays du Sud, des produits contenant des CFC ou supposant leur utilisation, devra fournir, au même prix, des substituts.

Les dépenses correspondant aux coûts qui viennent d'être évoqués devraient être prises en charge par un mécanisme spécifique de financement.

2.1.3. L'esquisse d'un mécanisme de financement des transferts

La conférence internationale des chefs d'Etat et de gouvernement sur les problèmes d'environnement qui s'est tenue à La Haye, à l'initiative de la France, en mars 1989, a reconnu « l'existence et l'ampleur de dangers considérables tenant notamment au réchauffement de l'atmosphère et à la détérioration de la couche d'ozone ».

La déclaration finale de cette conférence a consacré le principe de l'octroi d'une aide juste et équitable, à titre de compensation, aux pays «sur lesquels les décisions prises en vue de protéger l'atmosphère feraient peser une contrainte anormale ou particulière, eu égard notamment à leur niveau de développement et à leur responsabilité effective dans la détérioration mise en évidence». La même déclaration précise ensuite que «des mécanismes devront être mis en place à cette fin».

Le principe ainsi reconnu a débouché sur la proposition, faite par M. BÉRÉGOVOY de créer au sein de la Banque mondiale une facilité additionnelle destinée à financer l'aide aux transferts de technologie en faveur des Pays en Développement.

Il s'agirait d'un fonds global pour l'environnement chargé de couvrir les dépenses relatives non seulement à la protection de la couche d'ozone mais aussi à la lutte contre le réchauffement du climat et la déforestation, au maintien de la diversité des espèces biologiques, et à la préservation des ressources en eau.

La France propose que ce fonds, géré par le comité de développement de la Banque mondiale, soit doté, pour une période de trois ans, de 2 milliards de DTS (droits de tirage spéciaux) (la participation française serait de 10 %, c'est-à-dire de 1 milliard de francs).

Dans une note diffusée à Genève, en mai 1990, le secrétariat du PNUE avance, pour sa part, le chiffre de 1 milliard de DTS, soit 1,2 milliard de dollars (13).

Lors des négociations officieuses qui s'étaient déroulées dans le cadre du PNUE, à Nairobi, en janvier 1990, la nécessité de créer un mécanisme de financement destiné à faciliter l'adhésion au Protocole de Montréal des Pays en Développement a été reconnue.

La question de savoir dans quelle mesure un tel mécanisme serait géré par les organisations internationales existantes (Banque mondiale, PNUE, ou PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement), a été largement débattue à Genève.

Plusieurs options étaient possibles :

- confier la gestion des crédits et la mise en oeuvre des programmes concernés à l'une de ces trois organisations, en créant, au besoin, au sein de celle-ci, un mécanisme spécial ;

- mettre en place une structure commune ou un dispositif de coopération les regroupant ;

- créer, enfin, un système plus ou moins indépendant.

Le PNUE pouvait se voir reprocher son manque d'expérience en matière de financement de programmes de développement, le PNUD, son incompétence sur les questions d'environnement, enfin, la Banque mondiale, la mauvaise réputation dont elle jouit auprès des Pays en Développement.

Finalement, les membres du groupe de travail sur les aspects financiers du Protocole de Montréal se sont mis d'accord (14) sur les points suivants :

- un mécanisme financier sera mis en place pour apporter aux Pays en Développement qui adhèrent au Protocole une aide financière et technique, incluant des transferts de technologie. Ce mécanisme sera alimenté par des contributions additionnelles et ne fera pas obstacle à l'attribution d'autres financements multilatéraux (Banque mondiale) ou bilatéraux.

- le mécanisme financier ainsi créé comprendra un Fonds multilatéral spécifique. Celui-ci sera chargé, d'une part, de couvrir, par des dons ou des prêts préférentiels, les coûts supplémentaires supportés par les Pays en Développement pour se conformer au Protocole, et jouera, d'autre part, un rôle de "centre d'échanges (il s'agit de promouvoir toutes les formes de coopération, de favoriser les échanges d'information, de faire procéder à des études et d'évaluer les projets).

Les parties contractantes ont clairement manifesté le désir que le Fonds soit placé sous leur autorité. Donneurs et receveurs seront équitablement représentés au sein du comité exécutif du Fonds qui définira des orientations opérationnelles, mises en oeuvre avec le concours de la Banque mondiale, du PNUD, du PNUE et des autres institutions compétentes.

S'il représente un progrès sensible dans la prise en considération des besoins spécifiques des pays en développement, cet accord laisse cependant en suspens de nombreuses questions (15).

2.2. LES OBSTACLES QUI RESTENT A SURMONTER

Pour mettre en oeuvre les transferts de technologie qui doivent permettre l'adhésion des pays du Sud au Protocole de Montréal, il reste encore :

- à en préciser le contenu et le mode de financement ;
- à y associer efficacement les grands groupes multinationaux ;
- enfin, à convaincre les Etats-Unis d'accepter le caractère additionnel des ressources correspondantes.

2.2.1. Le contenu et le mode de financement des transferts de technologie doit être précisé

Concernant le contenu des transferts de technologie en faveur des Pays en Développement, vos rapporteurs souhaiteraient que la délégation française demande :

- tout d'abord, que le terme "confinement" figure bien dans le texte du nouvel article 10 bis ;

- ensuite, que le PNUE fasse procéder à des études permettant, d'une part, d'apprécier la variété des options technologiques possibles et, d'autre part, de sélectionner les solutions les mieux adaptées aux besoins du Tiers Monde.

Le terme "confinement" est déjà employé par le Protocole dans le paragraphe 7 de l'article 4 relatif aux exportations de technologies vers des Etats non parties au Protocole.

Il ne figure pas, en revanche, dans les projets qui nous ont été communiqués ⁽¹¹⁾ concernant la rédaction du nouvel article 10 bis. Certes, la notion de confinement peut être recouverte par celle - qui est utilisée - d'économie des substances réglementées ("conservation" en anglais) ; mais il importe à notre avis de se référer nommément au confinement car il s'agit d'un objectif important au regard de la protection de la couche d'ozone (le confinement est particulièrement nécessaire en ce qui concerne l'utilisation des solvants).

Concernant les études de choix technologiques effectuées pour le compte du PNUE, elles pourraient avoir l'avantage de valoriser les travaux menés par des chercheurs français dans le domaine du froid (cf. plus haut les considérations sur les procédés à adsorption).

S'agissant du financement des transferts de technologie, il subsiste à la fois des imprécisions et des points de désaccord ⁽¹⁵⁾.

Les questions en suspens, devant être résolues à Londres, concernent en premier lieu les règles concrètes de fonctionnement du Fonds et le volume de ses ressources ainsi que l'origine et l'acheminement des flux financiers qui transiteront par le mécanisme de financement. L'articulation entre le mécanisme et le fonds semble, par ailleurs, devoir être précisée ainsi que les modalités de coopération entre ces institutions et les organisations internationales préexistantes (Banque mondiale, PNUE, PNUD).

Le flou de diverses dispositions du texte de compromis adopté à Genève reflète, en fait, le désir de ne pas trancher immédiatement certains désaccords.

Il en va ainsi, par exemple, des relations entre le mécanisme de financement et les autres organisations internationales et, d'autre part, des rôles respectifs du fonds multilatéral et du centre d'échanges.

La France, en effet, à la différence d'autres pays, souhaitait que la Banque mondiale joue un rôle majeur dans la gestion du fonds multilatéral. Or, celui-ci paraît devoir être placé directement sous l'autorité des Parties. Notre pays, dans ces conditions, insiste pour que le centre d'échanges relève du mécanisme dans son ensemble (ce qui permettrait à la Banque mondiale d'y exercer une influence déterminante) et non du seul fonds multilatéral.

Un autre sujet de discorde réside dans le fait que certains Pays en Développement exigent que tous les financements soient effectués sous forme de dons (à l'exclusion donc de tout prêt, même à des conditions préférentielles).

Enfin, une autre divergence de points de vue, majeure celle-là, a trait à la façon dont les Etats-Unis interprètent le caractère additionnel des contributions au mécanisme de financement des transferts de technologie.

Le Directeur exécutif du PNUE, M. TOLBA, a tout dernièrement proposé, dans une note du 28 mai 1990, de gérer le fonds multilatéral sous l'autorité du Comité exécutif (16).

Ce dernier élaborerait, avec la collaboration des agences de programme concernées, un plan triennal glissant qui définirait les actions à mener et les coûts à supporter et évaluerait les dépenses correspondantes.

Il s'agirait de financer à la fois :

- des études (pour apprécier la situation des Pays en Développement, évaluer leurs besoins...);
- des programmes de coopération (notamment pour faciliter l'accès à de nouvelles technologies...);
- les coûts supplémentaires résultant de l'application du Protocole de Montréal (réduction des émissions de substances nocives et passage aux substituts ou à des solutions alternatives...).

Chaque pays devrait - selon M. TOLBA - élaborer sa propre stratégie industrielle en vue de se conformer aux objectifs du Protocole.

2.2.2. Les groupes multinationaux doivent se prêter aux transferts de technologie prévus par le Protocole

A la clôture de la session du groupe de travail sur les aspects financiers du Protocole de Montréal, qui s'est tenue à Genève du 9 au 11 mai 1990, le directeur exécutif du PNUE, M. TOLBA, a lancé un appel à l'industrie pour qu'elle consente des transferts de technologie aux pays en développement sur une base préférentielle et non commerciale (11).

M. TOLBA estime que les deux problèmes connexes (8) qui doivent être étudiés en priorité en ce qui concerne le rôle des entreprises dans les transferts de technologie sont :

- l'accès, à des conditions abordables, des pays du Sud aux brevets et droits de propriété afférents aux substances chimiques et techniques de remplacement des CFC ;

- la question du savoir-faire nécessaire à l'utilisation des brevets, une fois ceux-ci obtenus.

Le Directeur exécutif du PNUE a obtenu que se tienne, durant ce mois de juin 1990, une réunion de l'OMPI (Organisation mondiale de la propriété intellectuelle) sur la question des brevets et droits de propriété.

Dans une étude récente de cet organisme, citée à Genève par M. TOLBA, il est observé que des procédures de cession obligatoire de licences peuvent être utilisées dans certains pays (par exemple, en Grande-Bretagne) lorsque la protection de la santé publique ou la défense nationale l'exigent (17). Le gouvernement, cependant ne s'arroge, dans ce cas, que le droit d'utiliser la licence mais n'en acquiert pas la propriété. Le titulaire de celle-ci a naturellement droit à une juste compensation. Une telle procédure ne peut évidemment être employée, pour le moment, qu'à l'intérieur d'un Etat.

M. TOLBA envisage pourtant sérieusement que les gouvernements des Etats parties au Protocole puissent s'attribuer un droit d'usage obligatoire de certaines licences, sous prétexte de protéger la santé des populations par la préservation de la couche d'ozone.

Il imagine sans doute que les licences ainsi acquises pourraient être ensuite cédées, moyennant compensation, aux Pays en Développement. Une telle proposition ne paraît guère réaliste ! Outre qu'elle ne semble pas conforme aux règles juridiques en vigueur, elle risque de décourager l'effort de recherche des groupes industriels relatif à la mise au point de substituts.

Les appels à l'industrie de M. TOLBA et les solutions qu'il envisage traduisent bien le divorce qui peut exister entre la logique des entreprises, soucieuses de rentabiliser leur effort de recherche-développement et leurs investissements industriels, et les organisations internationales préoccupées par la situation de l'environnement et des difficultés des pays du tiers monde.

Il importe cependant de garder présent à l'esprit que la consommation de fluorocarbures des Pays en Développement dépassera, à partir de 2030 environ, celle des pays industrialisés, selon les prévisions de DUPONT de Nemours. Les pays du Sud représentent donc, à long terme, un marché considérable pour les producteurs de substituts.

Si certains de ces derniers, comme ATOCHEM, sont prêts à implanter des filiales à 50 % dans le Tiers Monde, aucun d'entre eux ne semble résolu, pour le moment, à vendre sa technologie des substituts aux pays concernés.

Les représentants de la firme américaine DUPONT de Nemours, que nous avons rencontrés (19), insistent sur le fait que l'installation d'unités de production de substituts dans les pays du Sud ne serait pas, dans l'immédiat, un investissement rentable, étant donné :

- la faiblesse de leur consommation ;
- les coûts de production des substituts ;
- la complexité de leur processus de fabrication ;
- la difficulté de maîtriser tous les problèmes de sécurité que ce processus implique (la possibilité d'un "nouveau Bhopal" a même été envisagée par nos interlocuteurs durant nos entretiens. On pourrait cependant leur rétorquer que l'Inde et la Chine dominent, par exemple, des technologies aussi complexes que celles du lancement de satellites...).

DUPONT de Nemours fait valoir, en outre, que la priorité devrait être accordée à l'utilisation des substituts, en ce qui concerne les transferts de technologie aux Pays en Développement, plutôt qu'à leur production.

Or, la situation des pays du Sud producteurs de CFC semble être prise davantage en considération dans les documents du PNUE que celle des pays qui ne sont qu'utilisateurs. C'est du moins ce qui ressort d'une comparaison des listes de coûts supplémentaires à prendre en charge, en ce qui concerne la reconversion des installations de production existantes, d'une part, et l'utilisation finale de

produits de remplacement, d'autre part (la première liste est beaucoup plus exhaustive que la seconde !).

Une étude plus poussée des transferts de technologie que suppose le remplacement des CFC par les substituts, au stade de l'utilisation finale de ces produits, serait souhaitable, selon vos rapporteurs.

Il serait, par exemple, intéressant de vérifier si, comme nous l'ont dit des membres de l'association américaine "Alliance for a Responsible CFC Policy", qui regroupe producteurs et utilisateurs de fluides réfrigérants, un passage anticipé au HFC-134a peut être envisagé, y compris dans les pays du tiers monde, en ce qui concerne les réfrigérateurs domestiques (20).

S'il faut faire preuve de sollicitude à l'égard des utilisateurs de CFC qui souffriront le plus d'une raréfaction de ces produits, il est cependant naturel qu'une attention particulière soit accordée aux producteurs du Sud qui, seuls, peuvent mettre en échec les objectifs du Protocole.

Ceux-ci disposent d'un délai supplémentaire de dix ans pour s'y conformer, c'est le temps qui sera peut-être nécessaire pour que les produits de remplacement des CFC soient disponibles en quantité suffisante, à l'exportation comme dans leurs pays d'origine, une fois passé le cap des essais préalables à leur mise sur le marché et celui du lancement de leur fabrication industrielle.

Lorsque les investissements de recherche-développement correspondants auront été amortis, l'implantation de filiales dans les pays du Sud, voire l'achat de technologies par ces derniers aux producteurs du Nord, pourront être envisagés.

D'ici là, une priorité devrait être accordée aux transferts de technologie portant sur les économies et le recyclage ainsi que sur la préparation de la conversion aux substituts des industries d'aval.

Cette logique des pays industriels se heurte toutefois à l'impatience des pays du Sud producteurs de CFC.

Notre expert, M. VIVIEN, du Centre Économie Espace et Environnement de l'Université de Paris I, estime que «la négociation sur les transferts technologiques risque fort d'achopper car mettant aux prises deux types d'acteurs, Etats et entreprises, aux logiques différentes, la marge de manoeuvre entre les Etats du Nord et leurs producteurs de HCFC paraissant faible» (21).

Il lui semble, en revanche, plus facile de trouver un terrain d'entente entre Etats sur le problème des transferts financiers.

L'attitude des Etats-Unis remet cependant en cause cette assertion.

2.2.3. La parcimonie américaine

Les Etats-Unis ne se sont pas opposés au texte de compromis adopté, le 11 mai 1990, par le groupe de travail sur les aspects financiers du Protocole de Montréal (15).

Or, cet accord reconnaît le caractère **additionnel** des contributions qui doivent venir alimenter le mécanisme financier envisagé.

Pourtant les Etats-Unis avaient publiquement annoncé leur intention, quelque temps auparavant, de ne pas engager de dépenses supplémentaires à cet effet.

Cette contradiction apparente s'explique par une interprétation américaine du terme "additionnel" qui peut être qualifiée de jésuitique.

Les Etats-Unis admettent, en effet, que des ressources spécifiques doivent être dégagées pour aider les pays du Tiers Monde à renoncer à l'usage de substances qui détruisent l'ozone.

Mais il ne doit pas en résulter, selon eux, d'augmentation du montant global de l'aide publique au développement.

En quelque sorte, "additionnel" signifie pour eux plus d'argent, mais pris ailleurs ! (le mécanisme de financement des transferts de technologie devrait être, pour les Américains, intégré à la Banque mondiale et alimenté par les ressources propres de celle-ci).

Or, il a toujours été convenu, sans ambiguïté aucune, que les fonds du mécanisme de financement envisagé viendraient s'ajouter à l'aide au développement existante.

Dans son rapport, diffusé à Genève le 9 mars 1990, le groupe de travail du PNUE (18) sur les incidences financières du Protocole de Montréal a, en effet, déclaré que «le mécanisme de financement devait être considéré essentiellement comme un "filet de sécurité", destiné à couvrir les déficits des autres sources multilatérales et bilatérales» (lesquelles devraient être maintenues).

Les contributions des différents Etats au Fonds multilatéral spécifique pourraient être réparties en fonction :

- soit du barème des quote-parts de l'ONU ;
- soit du niveau de consommation des substances réglementées par les parties en 1986.

La part des Etats-Unis serait donc, selon la méthode retenue, de 25 ou 26 % du total.

On a vu que les estimations du surcoût annuel total résultant, pour les Pays en Développement, de leur adhésion au Protocole de Montréal, variaient entre 150 et 700 millions de dollars.

En retenant l'hypothèse moyenne d'un coût supplémentaire annuel total de 350 millions de dollars et en supposant que ce surcoût soit intégralement couvert par le Fonds multilatéral spécifique créé, il en résulterait pour les Etats-Unis une dépense inférieure à 90 millions de dollars par an.

En outre, les crédits inclus dans l'enveloppe globale des "facilités Bérégovoy" ne seraient pas alors tous épuisés (il s'agit d'un montant de 2 milliards de DTS, soit 2,4 milliards de dollars sur trois ans, ce qui correspond à 660 millions de DTS ou 800 millions de dollars par an, la contribution annuelle des Etats-Unis pouvant atteindre 200 millions de dollars dans l'hypothèse d'une application du barème des quote-parts de l'ONU).

Il resterait donc possible d'envisager le financement, dans le cadre des facilités précitées, des autres aides nécessaires à la protection de l'environnement (lutte contre le réchauffement des climats et la déforestation, préservation des ressources en eau et de la bio-diversité des espèces...).

Près de la moitié du montant total des crédits prévus aurait cependant été alors consommée et le restant pourrait, dans ces conditions, s'avérer insuffisant, s'agissant notamment de la lutte contre l'effet de serre qui peut nécessiter des dépenses considérables.

Vos rapporteurs pensent cependant qu'une approche pragmatique consistant à traiter cas par cas les problèmes d'environnement global doit être retenue.

Parmi toutes les menaces qui pèsent sur notre environnement, celles concernant la couche d'ozone ont fait l'objet des réactions les plus rapides et les plus vigoureuses de la communauté internationale.

L'adoption de mesures de protection de l'ozone sert en quelque sorte de banc d'essai à l'élaboration de mesures tendant à traiter les autres problèmes d'environnement global.

Il serait regrettable, dans ces conditions, que les Etats-Unis compromettent la réalisation des objectifs du Protocole de Montréal, en ne permettant pas aux pays du Sud d'y adhérer, pour des sommes dont le montant peut sembler dérisoire.

Une contribution annuelle américaine de 90 millions de dollars (ce pourrait être moins) au financement de transferts de technologie destinés à préserver l'ozone, ne représente qu'une goutte d'eau dans l'océan du déficit budgétaire des Etats-Unis (129,5 milliards de dollars en 1989). Cette dépense est également à comparer au coût des études américaines sur l'effet de serre (1 milliard de dollars en 1991). Elle pourrait être, en outre, couverte par la taxe sur la consommation des CFC que l'Amérique est en train de mettre en place.

Par ailleurs, la charge que supportent les entreprises des Etats-Unis pour se conformer aux lois fédérales sur la protection de l'environnement est évaluée à 80 milliards de dollars par an (22). Le "Clean Air Act" qui est en train d'être voté par le Congrès devrait coûter environ 22 milliards de dollars chaque année à la Nation américaine, selon certaines estimations (23).

«A quoi bon - serait-on tenté de dire à nos amis Américains - dépenser des milliards de dollars pour purifier votre atmosphère, si c'est pour que celle-ci soit polluée par les émissions des pays du Sud parce que vous leur aurez refusé une aide inférieure à 100 millions de dollars !»

Un refus des Etats-Unis de contribuer au financement des transferts de technologie que nécessite la participation du Tiers Monde à la préservation de l'ozone serait, en outre, désastreux pour leur image de marque auprès de ces pays et auprès des écologistes du monde entier.

Vos rapporteurs tiennent, toutefois, à souligner que l'attitude de l'administration BUSH est loin d'être approuvée par l'ensemble de la classe politique américaine et, notamment, par les organisateurs de la Conférence interparlementaire sur l'environnement global à laquelle ils ont participé en mai 1990.

Il est à espérer que l'Amérique entende la voix du bon sens car même si le Protocole de Montréal était considérablement durci, une absence d'adhésion des pays du Sud ne permettrait pas d'atteindre ses objectifs.

3. UN DURCISSEMENT DU PROTOCOLE RESPECTÉ PAR LES SEULS PAYS DÉVELOPPÉS NE PARVIENDRAIT PAS À SES FINS

Si un certain répit peut être accordé aux Pays en Développement dans l'application d'un Protocole rendu plus rigoureux, un refus d'adhésion de leur part empêcherait celui-ci d'atteindre ses objectifs. Il importe également que les pays du Sud participent, plus tard, à la deuxième étape du remplacement des CFC, consistant à ne plus utiliser que des substituts sans chlore (HFC).

3.1. UN RÉPIT PEUT ÊTRE ACCORDÉ AUX PAYS EN DÉVELOPPEMENT

Dans le rapport d'expertise (2) qu'il a effectué pour le compte de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, M. MÉGIE étudie plusieurs scénarios d'évolution de la charge en chlore de l'atmosphère, prenant en compte le remplacement des CFC par différents substituts (cf. article de Prather et Watson dans les numéros 344 et 729 de "Nature" de 1990, d'après un rapport du PNUE et de l'OMM).

Deux types de produits de substitution "moyens" ont été retenus dans les simulations :

- le premier, de type X, comparable au HCFC-22, a une durée de vie de quinze ans et un potentiel de charge en chlore de 0,10 ;

- le deuxième, de type Y, a une durée de vie de six ans (comparable à celle du HCFC-124) et un potentiel de charge en chlore de 0,04.

Le scénario de référence prévoit, en ce qui concerne les émissions de tous les composés organo-chlorés d'origine industrielle (y compris le tétrachlorure de carbone, le méthylchloroforme et le HCFC-22) :

- une croissance moyenne de 4 % par an de 1986 à 1990 ;

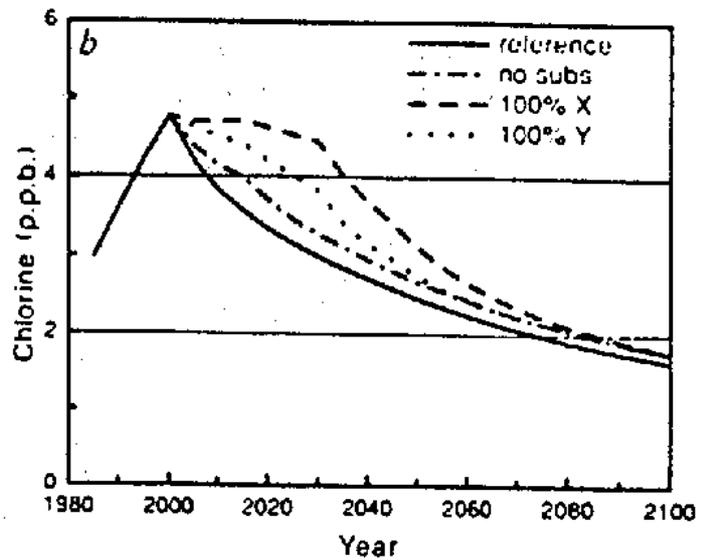
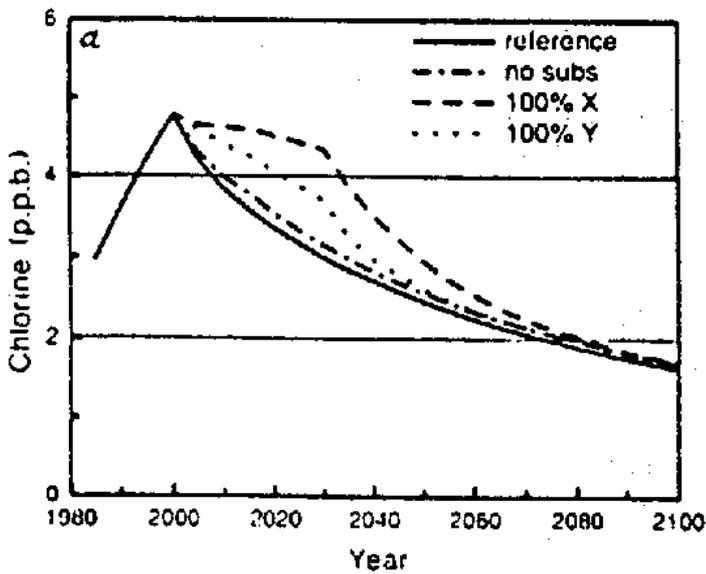
- un gel au niveau de 1990 jusqu'en l'an 2000 ;

- un arrêt complet à la fin de cette année 2000.

Il est envisagé, dans un des scénarios étudiés, que les émissions des composés chlorés soient seulement réduites de 80 à 90 % en l'an 2000, et que les 20 à 10 % restant (qui pourraient correspondre à la production du Tiers Monde) soient effectivement émis jusqu'en 2015. La substitution par les constituants X et Y prend en compte cette prolongation pour les fractions correspondantes des émissions. Au total, le délai de quinze ans ne repousse la date à laquelle est atteint le seuil critique de 2 ppbv que de six ans (réduction de 90 %) ou de onze ans (réduction de 80 %). Les niveaux de la charge totale en chlore sont,

par ailleurs, peu affectés en valeur absolue. La durée pendant laquelle cette charge reste voisine de 4 ppbv est cependant prolongée jusqu'en 2030-2040.

Graphiques 29 (a) et (b) :
Effet sur la charge totale en équivalent chlore
de l'utilisation des produits de substitution
pour une suppression retardée de 15 ans
de 10 % (a) et 20 % (b) des émissions des CFC



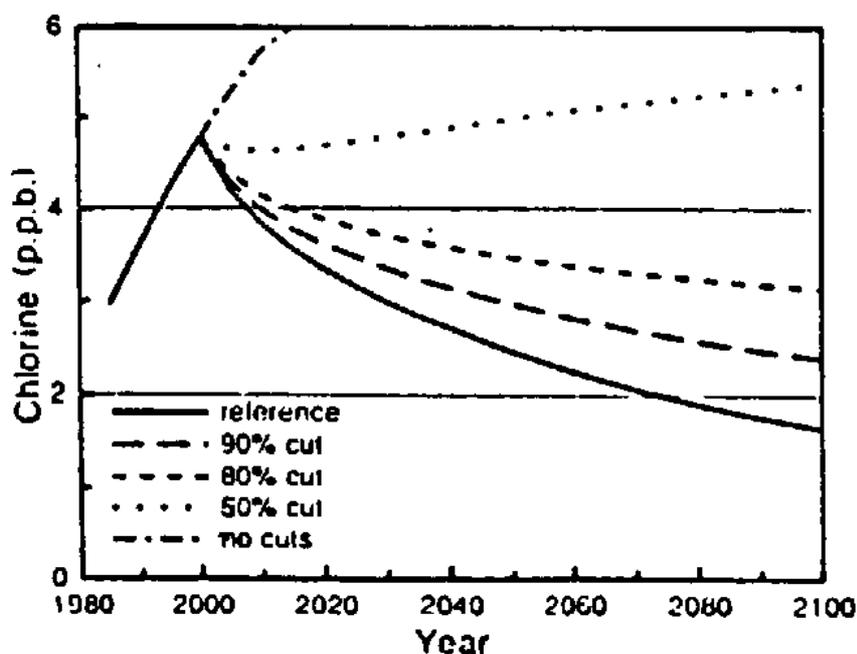
Si l'octroi aux Pays en Développement d'un sursis de quinze ans n'a pas de conséquence grave, en ce qui concerne le retour au niveau de charge en chlore de 2 ppbv préalable au trou d'ozone antarctique, il n'en va pas de même d'un refus d'adhésion définitif de ces pays.

3.2. UN REFUS D'ADHÉSION DÉFINITIF DES PAYS DU SUD AURAIT DES CONSÉQUENCES GRAVES

D'autres scénarios auxquels M. MÉGIE fait référence dans son rapport d'expertise (2), montrent que la préservation de la couche d'ozone ne permet pas de se contenter de demi-mesures, en ce qui concerne la réglementation des émissions de composés organo-chlorés. Le seuil de 2 ppbv n'est, en effet, atteint qu'en 2175 pour une réduction de 90 % (au lieu de 2073 dans le scénario de référence) et n'est jamais rejoint pour une réduction de 80 %.

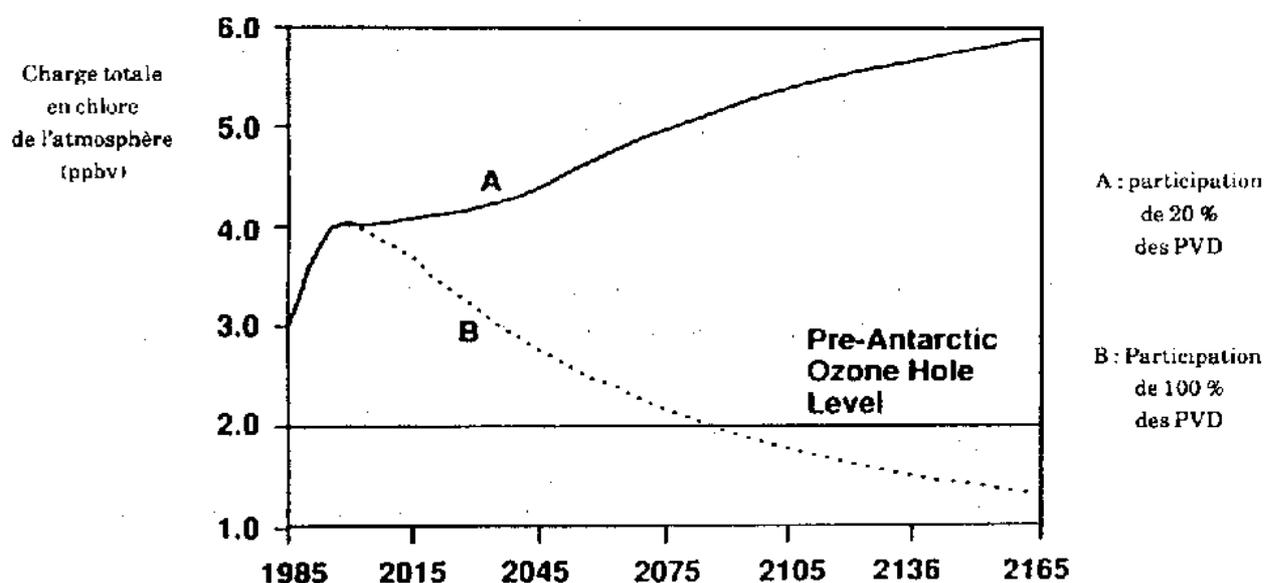
Cela montre bien que l'adhésion des pays du Sud au Protocole est nécessaire, car il suffirait que leur production atteigne, en 2000, 20 % de celle des pays industrialisés en 1985, pour que le trou d'ozone antarctique ne puisse jamais être comblé.

Graphique 30 : Effet sur la charge totale en équivalent chlore d'une réduction partielle des émissions des composés organo-chlorés



La courbe ci-dessous, extraite d'un rapport de l'Agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA), est encore plus éloquente, mais elle suppose que la demande potentielle des Pays en développement en produits chlorés soit satisfaite par l'offre, ce qui n'est guère évident dans la réalité (24).

Graphique 31 : Influence sur la charge en chlore de l'atmosphère d'une participation des Pays en Développement à l'arrêt des émissions de produits chlorés



La charge totale en chlore correspond ici à la somme pondérée de tous les composés halogénés dans la troposphère (CFC-11, 12, 113, 114, 115 - méthylchloroforme - tétrachlorure de carbone - HCFC-22). Elle exprime le rapport entre la quantité d'atomes de chlore et le nombre total de molécules d'air dans l'atmosphère.

Il a été considéré que l'utilisation des composés chlorés susvisés croîtrait :

- de 5 % par an, de 1989 à 2000 ;
- de 2,5 % par an, de 2001 jusqu'en 2050 ;
- de 0 % par la suite.

La demande totale des pays en développement en produits chlorés a été agrégée avant que soit évalué l'impact d'une adhésion partielle (de 20 %) ou d'un refus global de participation de leur part (100 %) aux mesures de restriction suivantes :

Tableau 70 : Hypothèses de restriction des émissions de composés chlorés retenue par l'EPA

Composés	Pays développés	Pays en Développement
CFC-11, 12, 113, 114, 115	supprimés en l'an 2000	supprimés en 2010
méthylchloroforme	idem	idem
tétrachlorure de carbone	idem	idem
HCFC-22	gel en 1991	gel en 2001

Des mesures de restriction, variées selon les produits et les régions, ont, en outre, été introduites dans ce scénario. Elles ne sont pas détaillées ici.

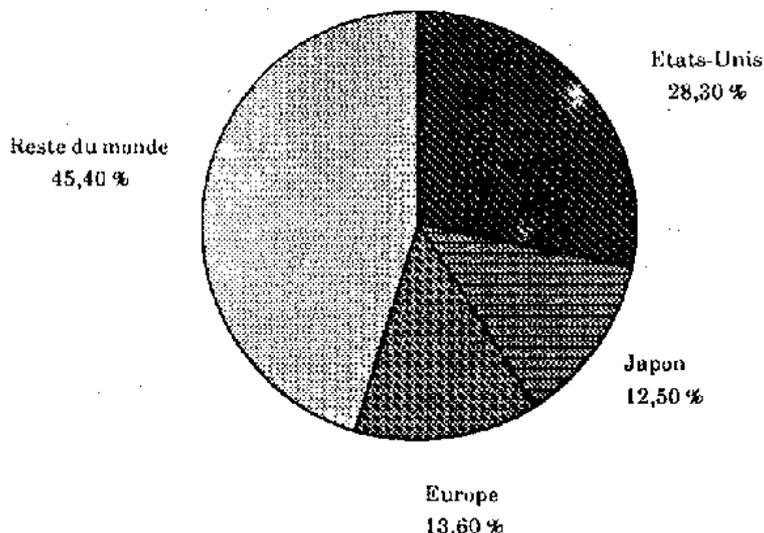
En supposant donc satisfaite, dans tous les cas, la demande des Pays en Développement en produits halogénés, il apparaît que leur adhésion aux mesures de restriction concernant ces produits est capitale.

Une participation à 100 % du Tiers Monde permet, en effet, une diminution de la charge en chlore de l'atmosphère et un passage au-dessous du seuil des 2 ppbv vers 2090. Une adhésion limitée à 20 % seulement conduit, en revanche, à la poursuite de l'augmentation de la teneur en chlore de l'atmosphère jusqu'à des niveaux élevés (près de 6 ppbv en 2165).

3.3. VERS UN PASSAGE DES PAYS EN DÉVELOPPEMENT DES HCFC AUX HFC, AU TERME D'UNE PÉRIODE DE TRANSITION SUFFISAMMENT LONGUE

D'après les services d'étude de DUPONT de Nemours, la demande de produits de remplacement des CFC (HFC et HCFC) devrait presque tripler entre 2000 et 2030 pour atteindre alors 2,2 millions de tonnes (21). La part du Tiers Monde et des économies socialistes serait alors presque équivalente (45,40 %) à celle des pays occidentaux et du Japon.

Graphique 32 : Répartition géographique de la demande future de HFA en l'an 2030



Source : Dupont de Nemours

A plus long terme, les Pays en Développement devraient même consommer davantage de fluorocarbures que les pays industrialisés.

Or, le potentiel de charge en chlore des HCFC n'est pas nul (0,14 pour le HCFC-22 et pour le 142b, 0,10 pour le 141b) même s'il est considérablement plus faible que celui des CFC.

L'un des scénarios précités, étudié par M. MÉGIE, montre du reste qu'une substitution totale aux CFC pendant trente ans d'un composé X, analogue au HCFC-22 (durée de vie de quinze ans et CLP de 0,10), conduit à maintenir dans l'atmosphère une charge en chlore élevée de 4 ppbv jusque vers 2035, ce qui n'est pas le cas avec un composé Y semblable au HCFC-124 (durée de vie de six ans et CLP de 0,04).

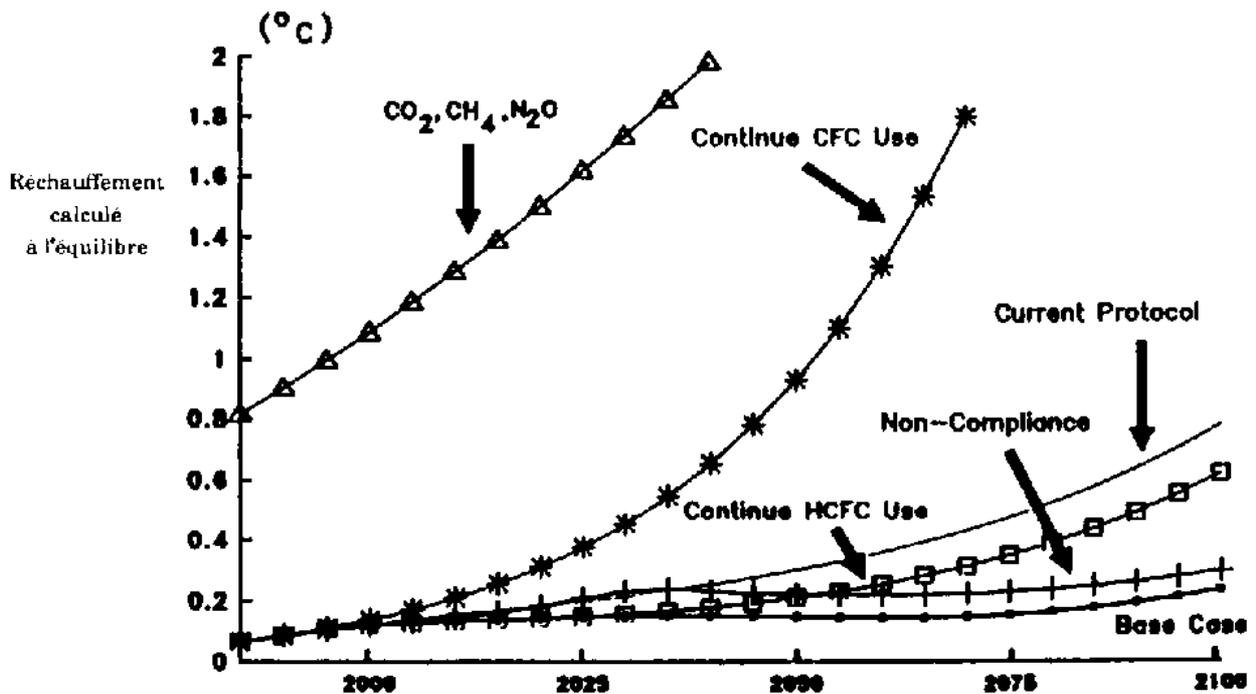
Certains HCFC ont, d'autre part, un potentiel d'effet de serre qui n'est pas négligeable (0,37 pour le HCFC-22 - 0,39 pour le 142b), bien que, là aussi, le danger soit beaucoup moins grave qu'avec les CFC.

Des incertitudes subsistent cependant, en ce qui concerne notamment la durée de vie de ces substituts, qui pourraient conduire à reconsidérer leurs effets.

Quoi qu'il en soit, il apparaît préférable, sur la base des estimations actuelles, que les Pays en Développement, comme les pays industrialisés, n'utilisent les HCFC que pendant une période transitoire (c'est du reste ce qui semble devoir être décidé prochainement à Londres).

Le graphique 33, émanant des services d'études de DUPONT de Nemours, illustre cette nécessité, au regard de l'effet de serre (25).

Graphique 33 : Étude de cas concernant l'effet de serre



Source : DUPONT de NEMOURS

- La courbe la plus basse ("Base case") correspond à une suppression des CFC vers l'an 2000 (2010 dans les PVD) et des HCFC entre 2030 et 2070 ;

- la courbe juste au-dessus ("Non-Compliance") traduit les effets d'une continuation de l'utilisation des CFC jusqu'en 2030 dans les PVD, les HCFC étant supprimés entre 2020 et 2050.

- Les deux courbes suivantes montrent les conséquences d'une croissance soutenue de la consommation de HCFC dans l'hypothèse soit d'une application du Protocole de Montréal actuel ("Current Protocol"), soit de la réglementation plus sévère des CFC envisagée dans le premier cas ("Base Case"), la contribution des HCFC à l'effet de serre dans cette seconde hypothèse (courbe avec des carrés) devient non négligeable à la fin du siècle prochain (de l'ordre de + 0,6 °C).

La courbe avec des astérisques ("Continue CFC Use") révèle avec quelle rapidité croîtrait la contribution au réchauffement global des CFC, si leurs émissions n'étaient pas réglementées.

Enfin, la courbe la plus haute illustre l'action des autres gaz à effet de serre (gaz carbonique CO₂, méthane CH₄ et protoxyde d'azote N₂O).

Ces considérations ne remettent toutefois absolument pas en cause les conclusions de ce rapport selon lesquelles la durée de vie accordée aux HCFC doit être suffisamment longue, pour que les industriels acceptent de les développer et les pays du Sud de les utiliser, s'agissant de produits beaucoup moins nuisibles à l'environnement que les CFC. C'est, en effet, seulement au-delà de 2030-2040 que la contribution propre des HCFC à l'effet de serre commencerait à devenir non négligeable, si leur demande continuait à croître de façon soutenue. Au demeurant, les substituts de deuxième génération que sont les HFC ont aussi un potentiel d'effet de serre parfois non négligeable (0,65 pour le HFC-125, par exemple), ce qui justifie la nécessité, déjà soulignée dans ce rapport, d'économiser non seulement les CFC mais aussi leurs substituts (HCFC puis HFC).

CONCLUSION

En conclusion, ce rapport s'est efforcé de montrer non seulement la gravité des problèmes mais aussi la difficulté de les résoudre. Dans la mesure où les CFC ne sont pas les seuls composés organo-halogénés qui attaquent l'ozone, le cas des constituants bromés (halons), réglementés par le Protocole de Montréal, et celui des autres composés chlorés qui doivent y être inclus (tétrachlorure de carbone, méthylchloroforme) ont été évoqués également.

Mais si les problèmes posés sont graves et délicats, ils n'en sont pas pour autant insolubles. Aussi vos rapporteurs ont-ils insisté, par ailleurs, sur la variété des options technologiques disponibles et sur l'étonnante capacité d'adaptation des producteurs et des utilisateurs. Celle-ci a néanmoins des limites et il faut tenir compte des contraintes de temps et d'argent de l'industrie (coûts et délais des essais toxicologiques et des études d'impact sur l'environnement, durée nécessaire à la recherche-développement et au lancement de la fabrication industrielle des nouveaux produits, ainsi qu'à l'amortissement indispensable des investissements correspondants).

Confondre vitesse et précipitation, comme nos partenaires allemands, sous la pression de leurs écologistes, sont parfois tentés de le faire, comporte deux risques :

- le premier risque, en cas d'abandon prématuré des HCFC et de transition accélérée vers les HFC est de ne pas permettre une maturation suffisante des technologies en aval. Il en résulterait des choix technologiques trop précoces qui pourraient rapidement se révéler inadéquats ;

- le deuxième risque, si on brûle les étapes, est que les Pays en Développement ne puissent pas suivre (il faut leur laisser le temps de s'adapter aux substituts de première génération, les HCFC, avant de leur imposer le passage aux HFC, produits de la génération suivante, sans quoi ils continueront tout simplement à produire des CFC).

Sans la participation des Pays en Développement, le durcissement du Protocole de Montréal ne serait qu'un coup d'épée dans l'eau. Or, deux obstacles restent à surmonter pour recueillir l'adhésion du Tiers Monde :

- la contribution des Etats-Unis au financement des transferts de technologie concernés ;

- la cession par les producteurs privés des pays industrialisés de leurs procédés de fabrication et du savoir-faire qui s'y rapporte.

Concernant le premier point, qui est le plus urgent, vos rapporteurs souhaitent vivement que l'administration BUSH ne prenne pas la responsabilité de faire échouer la Conférence de Londres, en refusant le versement d'une contribution dont le montant paraît dérisoire, eu égard à la richesse des Etats-Unis et en comparaison du total de leurs dépenses de protection de l'environnement.

Sur le deuxième point, la création de filiales dans les pays du Sud peut être une solution provisoire. Il faut naturellement attendre les résultats des études de toxicologie et d'impact sur l'environnement et la mise au point des procédés de fabrication industrielle et des techniques d'utilisation des nouveaux produits. Une fois amortis les investissements correspondants, des cessions de licence ou la constitution de "joint ventures" Nord-Sud pourraient être envisagées. Le sursis de dix ans accordés aux Pays en Développement pour se conformer au Protocole de Montréal pourrait permettre de laisser le temps faire son oeuvre dans ce domaine.

Qu'il soit permis d'insister, encore une fois, sur le fait que les transferts de technologies ne concernent pas seulement la production des substituts HCFC et HFC mais les industries d'aval utilisatrices : réfrigération, fabrication de mousses et industries recourant aux solvants en grandes quantités.

Etant donné la gravité des dangers encourus, il ne faut, en tout cas, pas attendre de disposer de preuves scientifiques irréfutables pour agir. Mieux vaut prendre le risque de mesures qui s'avèreraient exagérées ou superflues que celui de ne rien faire, dans le cas où les évolutions redoutées se produiraient. Ainsi que les experts de l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques nous l'ont fait comprendre, les incertitudes qui subsistent dans nos connaissances scientifiques sont, en effet, au total, plus inquiétantes que rassurantes.

RECOMMANDATIONS

I - Renforcer les moyens de la recherche scientifique sur la couche d'ozone

Un effort de recherche scientifique reste à faire pour élucider l'ensemble des mécanismes à l'oeuvre dans la destruction de la couche d'ozone, corrélés d'ailleurs avec ceux de l'effet de serre.

Des moyens de recherche supplémentaires par rapport à la situation actuelle doivent être affectés rapidement en France et en Europe. Ce renforcement contribuera non seulement à une meilleure connaissance des phénomènes mais aussi pourra rééquilibrer dans ce domaine les forces en présence (Europe et Etats-Unis), ce qui devrait permettre une discussion plus enrichissante entre les différentes équipes de recherche, peut-être une répartition des tâches et donc une plus grande efficacité de la recherche mondiale.

Parmi les nouveaux moyens recommandés, figurent les suivants :

1. Mettre en place un réseau opérationnel correctement étalonné, de surveillance du flux solaire ultra-violet, à différentes altitudes et en différentes régions du globe.
2. Améliorer les sondages de température dans la stratosphère.
3. Créer une "task-force internationale", organisation regroupant l'ensemble des expérimentateurs et des modélistes ainsi que les représentants des agences nationales et internationales, pour la confrontation des résultats de mesure et de simulation.
4. Dans le cadre de l'Agence spatiale européenne, en complément au projet UARS (Upper Atmosphere Research Satellite), concevoir, réaliser et lancer un satellite en orbite polaire, permettant de combler le hiatus entre la fin de l'expérience UARS et les projets de plate-forme polaire.
5. Renforcer les moyens de mesure depuis le sol et in-situ, en avion et en ballon ; notamment faire mettre en oeuvre par la Communauté Européenne un avion gros porteur affecté aux mesures, indispensable pour étudier les processus à l'échelle régionale.

6. Mettre en place rapidement le réseau NDSC (Network for Detection of Stratospheric Changes) et des moyens spatiaux correspondants.
7. Renforcer les moyens des équipes de recherche travaillant sur la chimie hétérogène.
8. Mettre en place, pour les équipes de recherche françaises, un réseau de communication informatique à très grand débit, permettant l'accès des différentes équipes françaises aux calculateurs vectoriels les plus performants.
9. Introduire, au sein des formations scientifiques de 3ème cycle, des programmes de formation donnant une vision globale de l'environnement et prenant en compte les différentes composantes physiques, chimiques et biologiques de celui-ci.
10. Accroître le nombre de postes dans le cadre du corps universitaire des Observatoires et Instituts de Physique du Globe.

II - Renforcer les moyens de la recherche et développement en France pour l'ensemble des industries concernées par l'élimination des CFC.

Compte-tenu des perspectives très importantes de marché et des bouleversements à attendre, représentées par la réfrigération, les mousses plastiques, les solvants, il importe de donner une plus grande impulsion aux recherches et aux développements en cours dans les laboratoires français, publics ou privés.

1. Augmenter les moyens de recherche affectés aux laboratoires de recherche publics travaillant sur les technologies alternatives en matière de froid (absorption, adsorption, absorption/adsorption).
2. Augmenter les moyens de recherche dans le domaine de la chimie des composés fluorés.
3. Augmenter les moyens de l'AFME pour le financement d'installations pilotes dans le domaine de la réfrigération, du conditionnement d'air et de la climatisation automobile.
4. Utiliser la procédure de crédits d'impôt pour les entreprises effectuant des travaux de recherche et de développement en matière de substituts des CFC, d'amélioration des techniques de confinement/récupération/recyclage/destruction et de produits de remplacement et de technologies alternatives.

III - Assurer la présence d'experts français dans les instances de coopération scientifique et de négociation sur les problèmes d'environnement

La présence des experts français dans les colloques scientifiques et dans les instances de négociation internationales est particulièrement insuffisante dans le domaine de l'environnement.

La qualité de l'information des scientifiques, leur compétitivité et la reconnaissance de leur valeur exigent une présence accrue sur la scène internationale.

1. Augmenter les effectifs des équipes des ministères des affaires étrangères, de l'économie et des finances et du secrétariat d'Etat à l'environnement, impliquées dans les négociations internationales sur l'ensemble des problèmes d'environnement et accroître la sensibilisation des administrations aux différentes données scientifiques et industrielles correspondantes.
2. Augmenter les moyens de publication et de participation des scientifiques français à des colloques étrangers.
3. Augmenter les moyens mis à la disposition des conseillers scientifiques des ambassades de France à l'étranger, pour suivre les problèmes d'environnement, en France et à l'étranger.
4. Créer un fonds destiné à permettre une présence systématique des technologues et des spécialistes de la recherche industrielle dans tous les colloques, réunions de concertation ou de négociation internationale, et en particulier au sein du Programme des Nations Unies pour le développement.

IV - Mettre en place des conditions de rentabilité suffisantes pour les investissements destinés à l'élimination des CFC

Compte-tenu du montant très important des investissements à pratiquer par les producteurs de CFC et par les industries d'aval pour mettre en place une industrie sans CFC, il est nécessaire d'aider à la création d'un environnement économique et fiscal favorable.

Il importe de créer une possibilité d'amortissement fiscal accéléré pour les investissements en unités de production dans les domaines suivants :

1. Production de HCFC, HFC.
2. Matériels de réfrigération et de conditionnement d'air, en particulier automobile, et de pompes à chaleur sans CFC.
3. Mousses sans CFC.
4. Solvants autres que CFC pour les industries électroniques, la mécanique de précision.
5. Matériels de récupération, de recyclage des CFC et de destruction non polluante des CFC.

V - Renforcer la mobilisation des acteurs de la réduction des CFC et accroître leur coopération

L'élimination des CFC est à la portée de l'industrie. A deux conditions expresses toutefois : une mobilisation et une coopération accrues.

La première condition est en effet celle d'une mobilisation accrue des industries d'aval qui doivent accélérer leurs recherches et mettre en oeuvre rapidement simultanément les trois options technologiques de manière à éliminer tous les CFC et ceci dans les délais les plus courts parmi ceux préconisés par les différents pays.

La deuxième condition est celle d'une coopération étroite entre tous les acteurs des différentes filières : producteurs de CFC et de substituts, firmes chimiques, fabricants de matériel, utilisateurs.

1. Faire créer, par les professions concernées et le secrétariat d'Etat à l'Environnement, une organisation rassemblant en France les producteurs de CFC et de substituts et l'ensemble des industries d'aval, sur le modèle de l'Alliance for Responsible CFC Policy existant aux Etats-Unis.
2. Aider un renforcement des organisations professionnelles du secteur du froid, lié à l'amélioration de leur coordination.

VI- Mettre en oeuvre une politique incitative de normes et de qualification

Une tendance fondamentale se profile à l'heure actuelle dans la compétition économique mondiale : **l'utilisation stratégique par les pays et les firmes des impératifs d'environnement**. Des pays comme les Etats-Unis et la RFA ont mis en place ou se préparent à mettre en place des réglementations extrêmement dures pour les CFC, réglementations qui iront sans doute plus loin que les normes de base du Protocole de Montréal révisé.

Par ailleurs, l'élimination des rejets de CFC passe par une participation de l'ensemble des industries concernées par les CFC à des efforts d'économies dans les utilisations de CFC et bientôt de HCFC et de HFC.

Il convient d'encourager la recherche de la performance et de la qualité dans tous les secteurs d'utilisation des CFC.

1. **Renforcer les moyens des organisations assurant la qualification des matériaux d'isolation** utilisés dans les industries du froid et du bâtiment.
2. **Créer des qualifications officielles pour les responsables techniques de la mise en oeuvre des CFC** dans les industries de la réfrigération, du conditionnement d'air et des pompes à chaleur.
3. **Renforcer les moyens des Ecoles généralistes ou spécialisées d'ingénieurs et de techniciens dans le domaine des sciences et techniques du froid**
4. **Mettre en place une qualification obligatoire sur le modèle de celle mise au point par l'APSAAD, pour les installateurs et vérificateurs des installations fixes d'extinction automatique et des extincteurs mobiles.**
5. **Créer un label d'étanchéité pour les installations de réfrigération et de conditionnement d'air commerciale et industrielles**
6. **Créer un label de qualification pour les entreprises du secteur de la réfrigération et du conditionnement d'air commercial et industriel.**
7. **Introduire une norme obligatoire concernant la présence de vannes de récupération dans les installations de réfrigération et de conditionnement d'air industrielles et commerciales.**

8. **Introduire une obligation de récupération des CFC usagés** pour les installations de réfrigération et de conditionnement d'air industrielles et commerciales.
9. **Limiter rapidement la production, l'importance et l'exportation du CFC-13, utilisé comme solvant.**
10. **Rendre obligatoire une déclaration d'utilisation des CFC comme solvants**
11. **Normaliser sur un plan technique les équipements de nettoyage industriel utilisant des CFC.**
12. **Harmoniser sur le plan européen les normes en matière de consommation de CFC ; rendre impossible l'introduction, dans un pays, de normes dépassant les normes communautaires.**

VII - Favoriser les transferts de technologies au profit des Pays en voie de développement

Le succès du Protocole de Montréal initial ou révisé dépend de la participation des Pays en Voie de Développement. Il importe de mettre en place des mesures la favorisant, mesures qui pourront au demeurant faciliter l'accès à ces marchés pour les industries françaises.

1. **Augmenter le nombre de postes offerts au titre de Volontaire du Service National en coopération ou dans les entreprises (VSNA/VSNE), aux appelés disposant d'une qualification dans le domaine du froid et les affecter dans les Pays en Voie de Développement.**
2. **Accorder des bourses d'études dans le domaine du froid à des étudiants des Pays en Voie de Développement, dans le domaine du froid.**
3. **Demander au Programme des Nations Unies pour l'Environnement de réaliser des études nouvelles sur l'adéquation des différentes options technologiques à la situation et aux impératifs des Pays en voie de développement.**
4. **Demander au Programme des Nations Unies sur l'Environnement de recommander systématiquement aux Pays en voie de Développement l'option du confinement et de mener les études nécessaires pour y parvenir.**

5. Prendre en compte les dépenses nécessaires des **industries d'aval** dans les estimations des coûts de l'élimination des CFC pour les Pays en voie de développement.
6. Mettre en place en France une détaxation supplémentaire des bénéficiaires des entreprises françaises réinvesties dans la **création de joint-ventures dans les Pays en voie de développement**, pour la production de HCFC, HFC et pour la création d'industries d'aval prenant en compte les impératifs de la réduction d'utilisation des CFC.
7. Mettre en place au niveau communautaire des **aides aux Pays en voie de développement**, pour l'achat de HCFC (hors le HCFC-22) et de HFC, et pour l'achat d'équipements de production des industries d'aval mettant en oeuvre des HCFC ou des HFC, ou fondées sur des technologies alternatives.
8. Revenir sur l'interdiction faite aux pays signataires du Protocole de Montréal d'exporter des CFC vers les pays non signataires parce qu'elle pourrait apparaître comme un encouragement à la construction d'usines de fabrication de produits interdits.
9. Faire pression sur les **Etats-Unis** afin qu'ils ne compromettent pas la mise en place du **mécanisme de financement** proposé par la France dans le cadre du GIEC. Le montant de leur contribution serait dérisoire en comparaison avec celui de leurs dépenses globales de protection de l'environnement.
10. Concernant la position des pays de la Communauté dans les négociations relatives à la révision du Protocole de Montréal, défendre le principe d'une **durée de vie raisonnable pour les substituts de transition (HCFC)** : confondre vitesse et précipitation pourrait conduire à faire des choix technologiques prématurés.

EXAMEN PAR LE CONSEIL SCIENTIFIQUE

Le présent rapport a été examiné par le Conseil scientifique de l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques le mardi 12 juin 1990.

M. LACOMBE a souhaité une plus étroite collaboration entre l'Office et l'Académie des Sciences qui - a-t-il rappelé - a toujours souligné les nombreuses incertitudes subsistant en ce qui concerne l'évolution de la couche d'ozone.

M. SAMUEL a fait état de la décision prise, le 17 janvier 1990, par la CEE au sujet de la mise en oeuvre du protocole de Montréal. Il a évoqué l'attitude des pays maximalistes, comme l'Australie et les Etats scandinaves, et celle de l'URSS. Il a observé que c'était surtout le HCFC-22 qui était en cause, dans l'éventualité d'un contrôle ou d'une surveillance des substituts.

Il a précisé que le délai de trois mois, mentionné dans le rapport, pour la durée de vie de l'ozone troposphérique était un maximum, celui-ci pouvant être détruit en vingt-quatre heures au-dessus des agglomérations, sous l'action du monoxyde d'azote.

Il a également souligné que l'inertie thermique des océans était susceptible seulement de retarder les conséquences indésirables de l'effet de serre.

Il a exprimé le souhait que des moyens supplémentaires soient donnés à la recherche française dans le domaine des sciences de l'environnement.

M. HAMBURGER s'est félicité de ce que le rapport s'attache à montrer les incertitudes qui demeurent concernant l'ozone et l'effet de serre. Mais il a estimé que, dans le doute, il était préférable d'agir, étant donné la gravité des dangers encourus.

Mme LANGEVIN a estimé que les sciences de l'atmosphère constituent un domaine dans lequel les évolutions sont plus rapides que les controverses. Il faut donc tenter d'anticiper les événements qui peuvent se produire avant que les discussions scientifiques sur les phénomènes en cours ne soient closes.

Il importe de rattraper le retard avec lequel les premières décisions ont été prises et de coordonner les efforts de recherche dispersés, mais on ne peut, pour autant, accélérer sans limite le rythme des mesures scientifiques qui permettent d'apprécier la gravité de la situation.

EXAMEN PAR LA DÉLÉGATION PARLEMENTAIRE

Les conclusions du présent rapport ont été approuvées par la délégation parlementaire dénommée Office Parlementaire d'évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques le mercredi 13 juin 1990.

A l'issue de l'exposé des rapporteurs, M. Pierre LAFFITTE, Sénateur, s'est félicité de ce que le rapport souligne les liens existant entre la destruction de l'ozone et l'effet de serre. Il a estimé que l'humanité prenait progressivement conscience du caractère planétaire des menaces pesant sur notre environnement. Il a souligné que les écologistes allemands ne devaient pas obliger les Européens à passer d'un seul coup aux HFC, sans transition par l'étape intermédiaire des HCFC.

Enfin, il a fait valoir qu'un financement des transferts de technologie, sous forme d'une aide à la localisation dans les pays en développement, des unités de production de substituts, profiterait aussi bien à nos concurrents qu'à ATOCHEM lui-même. Il pourrait, en outre, en résulter des pertes d'emplois dans les pays industrialisés.

REMERCIEMENTS

Vos rapporteurs tiennent à remercier tout particulièrement pour leur aide et leur accueil :

- M. Guy BRASSEUR, Chef de l'Atmospheric Chemistry Division, et Mlle Claire GRANIER, membre de cette division, au NCAR (National Center for Atmospheric Research) à Boulder, Colorado (USA) ;

- MM. Tony VOGELSBERG, Environmental Manager et Edward LUKOSIUS, Environmental Coordinator, le Docteur GLAS et M. KOHN, de la Compagnie DUPONT de NEMOURS, à Wilmington, Delaware (USA) ;

- M. TRONC, Directeur, Mme MORIN et Mme GUETTA, du service des Relations extérieures de la filiale française de cette même compagnie à paris ;

- M. Kevin FAY, Directeur d'Alliance for a Responsible CFC Policy à Washington ;

- M. Michel AUBRY, Conseiller scientifique, et Mme Michèle DURAND, Attachée scientifique à l'Ambassade de France à Washington ;

- MM. Albert GORE, Sénateur du Tennessee, organisateur de la Conférence interparlementaire sur l'environnement global qui s'est tenue à Washington du 29 avril au 2 mai 1990, John CHAFEE, Sénateur du Rhode Island, animateur du groupe de travail sur la destruction de l'ozone et John KERRY, Sénateur du Massachussets, animateur du groupe de travail sur la préservation de l'océan et des ressources en eau à cette même conférence ;

- M. Maurice VERHILLE, Conseiller en matière d'environnement à la division des produits fluorés et M. Jean-Bernard LARTIGUE, Directeur de la chimie fine et des spécialités à ATOCHEM ;

- M. Denis CLODIC, Responsable technique de l'Association des Ingénieurs en chauffage, conditionnement d'air et ventilation de France (AICVF) ;

- M. MEUNIER, Directeur adjoint du Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (CNRS).

PERSONNALITÉS RENCONTRÉES

I- PERSONNALITÉS GOUVERNEMENTALES, POLITIQUES OU ADMINISTRATIVES

A - FRANCE

M. Brice LALONDE, Secrétaire d'Etat auprès du Premier Ministre, chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs, 30 mai 1990.

M. Arthur RIEDACKER - Directeur de Recherche INRA, chargé de mission, Sous-Direction de la Recherche Scientifique et Technique, Ministère de la Coopération et du Développement, 29 mai 1990,

M. Pierre PISSALOUX, Affaires Internationales, Direction du Trésor, Ministère de l'Économie, des Finances et du Budget, 10 avril 1990.

Mme Delphine BORLONE, Direction des Affaires Politiques, Ministère des Affaires Etrangères, 18 mai 1990.

M. Pascal DESCHAMPS, chargé de la Mission Contrôle des Produits, Direction de l'Eau et de la Prévention des Pollutions et des Risques, Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre, chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques Technologiques et naturels majeurs, 22 mai 1990.

M. Olivier HERZ, chargé de la Sous-Direction de la Pollution de l'Air, Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre, chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques Technologiques et Naturels majeurs, 22 mai 1990.

Mme Patricia MAUGAIN, chargée des Organisations internationales à la Mission Environnement-Développement du Secrétariat d'Etat auprès du Premier ministre, chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs, 22 mai 1990.

B - ETATS-UNIS

• CONGRÈS DES ÉTATS-UNIS

M. John D. DINGELL, Représentant Démocrate du Michigan, Président de la Commission de l'Energie et du Commerce de la chambre des Représentants, Washington D.C., 26 avril 1990.

M. Edward KENNEDY, Sénateur du Massachussets, Président de l'Office of Technological Assessment, Washington D.C., 30 avril 1990.

• EPA

M. Stephen SEIDEL, Chief, Regulatory and Analysis Branch, Environmental Protection Agency (EPA), 27 avril 1990..

• OTA

M. John ANDELIN, Directeur-adjoint, Science Information and Natural Resources, Office of Technological Assessment, Washington, D.C., 1er mai 1990.

M. Robert NIBLOCK, Program Manager, Oceans and Environment Program, Office of Technological Assessment, Washington D.C., 1er mai 1990.

Mme R. BIERBAUM, Senior Analyst, Office of Technological Assessment, Washington D.C., 1er mai 1990.

M. Robert MORGAN, Conseiller, Professeur à la George Washington University, Office of Technological Assessment, Washington D.C., 1er mai 1990.

Mme Tara O'TOOLE, Senior Analyst, Office of Technological Assessment, Washington D.C., 1er mai 1990.

M. Nick SUNDT, Analyst, Office of Technological Assessment, Washington D.C., 1er mai 1990.

C - AUSTRALIE

Sénateur Robert Mc MULLAN, Sénat d'Australie, Canberra, Australie, 26 mars 1989.

M. Allan BROWN, Premier Secrétaire Adjoint pour les Affaires Juridiques, Ministère des Affaires Juridiques, Ministère des

Affaires Etrangères et du Commerce, Canberra, Australie, 26 mars 1990.

M. BLUNN, Premier Secrétaire, Ministère de l'Environnement, Canberra, Australie, 26 mars 1990.

M. Robert J. DUNN, Directeur, Chemicals Management, Department of the Arts, Sport, the Environment, Tourism & Territories, Canberra, Australie, 26 mars 1990.

M. Neil SHEPHEN, Directeur du Ministère de l'Environnement de Nouvelles Galles du Sud, Sydney, Australie, 27 mars 1990.

M. Rex MONCUR, Directeur, Australian Antarctic Division, Sydney, Australie, 27 mars 1990.

D - INDE

M. SARMA, Chef de la Délégation de l'Inde, aux négociations de Genève pour la révision du Protocole de Montréal, Programme des Nations-Unies pour l'Environnement, Genève, 8 mars 1990.

E - ORGANISATIONS INTERNATIONALES

Mme ALOISI de LARDEREL, Directeur du Département Industrie et Environnement, Programme des Nations-Unies pour l'Environnement, Paris, 23 mai 1990.

II - RECHERCHE SCIENTIFIQUE

A - FRANCE

M. Gérard MÉGIE, Directeur du Service d'Aéronomie, CNRS, avril-mai 1990.

M. Jean-Pierre POMMEREAU, Service d'Aéronomie, CNRS, avril-mai 1990.

M. Frank-Dominique VIVIEN, Centre Economie-Espace-Environnement, Université Paris I, avril-mai 1990.

M. MEUNIER, Directeur-Adjoint du Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (LIMSI), CNRS, 31 mai 1990.

M. B. SPINNER, Institut de Science et de Génie des Matériaux et Procédés, CNRS, 8 juin 1990.

M. Denis CLODIC, Responsable technique, Centre d'Energétique, Ecole Nationale Supérieure des mines de Paris, 23 mai 1990.

B - ETATS-UNIS

M. B. SERAFFIN, Directeur, National Centre for Atmospheric Research, Boulder, Etats-Unis, 25 avril 1990.

M. Guy BRASSEUR, Chef de la Atmospheric Chemistry Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Etats-Unis, 25 avril 1990.

Mlle Claire GRANIER, Atmospheric Chemistry Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Etats-Unis, 25 avril 1990.

M. Warren WASHINGTON, Chef de la Division Climate and Dynamics, National Center for Atmospheric Research Boulder, Etats-Unis, 25 avril 1990.

Mme Suzan SOLOMON, Research Chemist, National Ocean and Atmospheric Administration, Boulder, Etats-Unis, 23 avril 1990.

M. Richard STOLARSKI, Goddard Space Flight Center, NASA, 27 avril 1990.

III - ENTREPRISES PRODUISANT DES CFC, HCFC ET HFC.

A - FRANCE

M. Francis BAZILE, Directeur Général d'ATOCHEM, 17 mai 1990.

M. Jean-Bernard LARTIGUE, Directeur, Direction chimie Fine et des spécialités, ATOCHEM, 28 Avril et 17 mai 1990.

M. Maurice VERHILLE, Manager, Environment and Market Development, Fluoride Chemicals Department, ATOCHEM, 28 avril 1990.

M. Alexis GALLEY, Ingénieur, stagiaire du Corps des Mines, ATOCHEM DEUTSCHLAND GmbH, 31 mai 1990.

B - ÉTATS-UNIS

F.A. (Tony) VOGELSBERG, Jr. Environmental Manager, Freon Products Division, E.I. DU PONT DE NEMOURS & COMPANY (Inc.), Wilmington, 26 avril 1990.

Edward J. LUKOSIUS, Environmental Coordinatore, Ozone Section, Freon Products Division, E.I. DU PONT DE NEMOURS & COMPANY (Inc.), Wilmington DE, 26 avril 1990.

Dr. GLAS, Director, Business Manager, International Freon Products Division ; E.I. DU PONT DE NEMOURS & COMPANY (Inc.), Wilmington DE, 26 avril 1990.

M. Kevin FAY, Directeur, Alliance for Responsible CFC Policy, Washington D.C., 27 avril 1990.

M. James WOLF, American Standard, Inc., Washington D.C., 27 avril 1990.

Mme Kristine HALL, IBM Corporation,, Washington D.C., 27 avril 1990.

IV- INDUSTRIE DES AÉROSOLS

M. Michel DESRUET, Président du Comité Français des Aérosols, 3 avril 1990.

M. Philippe TOCQUEVILLE, Secrétaire du Comité Français des Aérosols, 3 avril 1990.

V- INDUSTRIES DU FROID

A - ORGANISATIONS INTERPROFESSIONNELLES

M. André GAC, Directeur de l'Institut International du Froid (IIF), 3 avril 1990.

M. Roland VILOTT, Président de l'Association Française du Froid, 4 avril 1990.

M. Claude BRIAN, Association Française du Froid, 4 avril 1990.

M. DESFORGES, Association Française du Froid, 4 avril 1990.

M. ROY, Association Française du Froid, 4 avril 1990.

B - ASSOCIATIONS D'INGÉNIEURS ET TECHNICIENS

M. BARBER, Vice-Président, Association des Ingénieurs et Techniciens du Froid (AITF), 3 avril 1990.

M. Vincent SERMAGE, Secrétaire Général de l'Association des Ingénieurs et Techniciens du Froid (AITF), 3 avril 1990.

M. Louis VOILLOT, Président de l'Association des Ingénieurs en Chauffage, Conditionnement d'Air et Ventilation de France (AICVF), 3 avril 1990.

M. Denis CLODIC, Responsable technique de l'Association des Ingénieurs en Chauffage, Conditionnement d'Air et Ventilation de France (AICVF), 3 avril 1990.

C - ORGANISATIONS PROFESSIONNELLES ET INDUSTRIELLES

M. Guy WROBEL, Président du Syndicat du Matériel Frigorifique (SMF), 3 avril 1990.

M. Jacques BRU, Responsable Stratégie Industrielle, SELNOR-TCE, 23 mai 1990.

M. BARON, Vice-Président délégué de la Chambre Syndicale Nationale des Entreprises du Froid, d'Équipement de Cuisines Professionnelles et du Conditionnement de l'Air (SNEFFCA), 4 avril 1990.

M. AUBERTY, Président du Syndicat Général et National du Froid (SGNF), 4 AVRIL 1990.

M. PALIZANO, Vice-Président du Syndicat Général et National du Froid (SGNF), 4 avril 1990.

M. de LA MAUVINIÈRE, Délégué Général du Syndicat Général et National du Froid (SGNF), 4 avril 1990.

M. PATIN, Vice-Président de l'Union Syndicale Nationale des Exploitations Frigorifiques, 3 avril 1990.

Mme MAGNÉ, Déléguée Générale de l'Union Syndicale Nationale des Exploitations Frigorifiques, 3 avril 1990.

M. Joël CONAN, Délégué Général du Syndicat National des Entreprises de Gestion d'Équipements Thermiques et de Climatisation (SNEC), 4 avril 1990.

VI- INDUSTRIES DES MOUSSES PLASTIQUES

M. Jacques ARTAUD, Vice-Président du Syndicat National des Plastiques Alvéolaires (SNPA), Administrateur-Directeur Général du Groupe RECTICEL.

Mme Françoise PONS, Déléguée Générale, Syndicat National des Plastiques Alvéolaires (SNPA).

M. Allal JINIOUI, Directeur du Développement Chimie, Groupe RECTICEL.

M. Hubert CREYF, Président du Groupe technique d'EUROPUR, Groupe RECTICEL.

M. Alain ZALMANSKI, Délégué Général, Syndicat Professionnel des Producteurs de Matières Plastiques (SNPPA).

M. Bernard SUPPLISSON, Account Manager, DOW France.

M. Michel MALLET, Responsable Développement Phénol-TDI, Rhône-Poulenc Chimie.

M. Robert TUTH, Secrétaire Délégué, Syndicat National de l'Isolation (SNI), 21 mai 1990.

M. Silvio PASA, Président du Syndicat National du Profilage des Produits Plats en Acier (SNPPA), Président-Directeur Général de MONOPANEL, 29 mai 1990.

M. Georges SOUBEYRAND, Délégué Général, Syndicat National du Profilage des Produits Plats en Acier (SNPPA), 29 mai 1990.

M. Gérard MOREAU, Ingénieur Principal, Responsable technique, Syndicat National du Profilage des Produits Plats en Acier (SNPPA), 29 mai 1990.

M. Philippe ANGOT, Ingénieur Principal, Chef de Production Division Profilée, HIRONVILLE S.A., 29 mai 1990.

M. Raymond GUASCO, Directeur du Développement International, Fédération des Industries des Equipements pour Véhicules (FIEV).

M. Tham VU KHAC, Responsable Chimie, Recherche et Développement, Bertrand Faure Automobile.

M. Jean BARGE, Directeur Recherche et Diversification, Equipements et Composants pour l'Industrie Automobile (ECIA).

M. Christophe LYONNET, Ingénieur de Recherche, Recherche et Diversification, Equipements et Composants pour l'Industrie Automobile (ECIA).

VII - UTILISATEURS DE SOLVANTS CFC

M. Jean BOUYGUES, Chef du Département Technique, Groupement des Industries Aéronautiques et Spatiales - Groupe des Equipements (GIFAS), 22 mai 1990.

Mme SCHOLTZ, Ingénieur, Syndicat des Industries de Tubes Electroniques et Semi-Conducteurs (SITELESC), 29 mai 1990.

VIII - INDUSTRIES DE LA PROTECTION CONTRE LES INCENDIES

M. Hervé BINEAU, Délégué Général Adjoint, Centre National de Prévention et de Protection (CNPP), 3 mai 1990.

M. Yvon MARTY, Vice-Président, Centre National de Prévention et de Protection (CNPP), 3 mai 1990.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A - CONCERNANT LE CONSTAT SCIENTIFIQUE (I)

- (1) G. MEGIE et J.-P. POMMEREAU - Service d'Aéronomie du CNRS, Rapport d'Expertise pour l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, mai 1990.
- (2) Annexe II du rapport final de la réunion de Nairobi du groupe de travail à composition non limitée des Parties au Protocole de Montréal (UNEP/OZL. Pro W.G. I(2)/4), 4 septembre 1989.
- (3) Frank-Dominique VIVIEN - Centre Economie Espace Environnement, Université Paris I, Rapport d'Expertise pour l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, mai 1990.
- (4) Appendice B du rapport de synthèse établi pour la réunion de Genève, du 13 au 17 novembre 1989, par le groupe de travail à composition non limitée des Parties au Protocole de Montréal en fusionnant les rapports de quatre groupes d'évaluation (UNEP/OZL Pro W.G. II (1)/4), 6 décembre 1989.
- (5) "La querelle de l'ozone" par Patrick AIMEDIEU. "La Recherche" N° 196 février 1988.
- (6) J.C. FARMAN et al., "Nature", Vol. 315, 207 de 1985.
- (7) Scientific Assessment of Stratospheric Ozone (PNUE/OMM), 21 août 1989.
- (8) "Les gaz à effet de serre" par Robin CLARKE (UNEP/GMS Environment Library N° 1), 1987.
- (9) "Assessment of Models for Prediction of changes in the Ozone Content of the Atmosphere" par Christoph BRÜHL et Reiner HENNING, Max Planck Institute, septembre 1989.
- (10) Interview de G. MÉGIE dans "Libération" du mardi 28 novembre 1989.
- (11) Alain SARASIN de l'Institut de recherche scientifique contre le cancer de Villejuif cité dans "Le Monde" du 11 janvier 1989.
- (12) "Geophysical Research Letter" de juillet 1989.

**B - CONCERNANT LES OPTIONS TECHNOLOGIQUES (II)
AINSI QUE LE PROTOCOLE DE MONTRÉAL ET SON
APPLICATION (III)**

1. Les options technologiques (II)

- (1) G. MEGIE et J.-P. POMMEREAU - Service d'Aéronomie du CNRS, Rapport d'Expertise pour l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, mai 1990.
- (2) Frank-Dominique VIVIEN - Centre Economie-Espace-Environnement, Université de Paris I, Rapport d'Expertise pour l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, mai 1990.
- (3) J.-P. DETRIE et B. QUELIN, Centre HEC-ISA et Hardy Developpement, Rapport d'Expertise pour l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, mai 1990.
- (4) ULLMAN'S "Encyclopaedia of Industrial Chemistry", VCH, Weinheim, RFA, 1988.
- (5) ATOCHEM, notice n°689 F, Paris, 1987.
- (6) Encyclopédie Internationale des Sciences et Techniques, sous la direction de R.G. MORVAN, Presses de la Cité, Paris, 1973.
- (7) Chemical Manufacturers Association, Fluorocarbon Program Panel, Octobre 1989.
- (8) ATOCHEM DEUTSCHLAND Gmbh, mai 1990.
- (9) Document DUPONT, avril 1990.
- (10) Document ATOCHEM, mai 1989.
- (11) "Scientific Assessment of Stratospheric Ozone" : 1989, Volume II, AFEAS Report, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, Report n° 20.
- (12) Audition des organisations représentatives des Professions du Froid, Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, avril 1990.
- (13) "Ozone, l'équilibre rompu", par G. MEGIE, Presses du CNRS, Paris, 1989.

- (14) Audition de Mme S. SOLOMON, NOAA, Boulder, Etats-Unis, avril 1990.
- (15) "Substitution des CFC : les acteurs de la réussite", Document ATOCHEM, Juin 1989.
- (16) "L'aspect socio-économique de la reconversion CFC-HCFC/HFC", Document ATOCHEM, avril 1990.
- (17) Audition des responsables de la Freon Products Division, E.I. DU PONT DE NEMOURS & Company (Inc.), Wilmington, Etats-Unis, avril 1990.
- (18) Audition de M. F. BAZILE, Directeur Général d'ATOCHEM, Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, mai 1990.
- (19) Technical Progress on Protecting the Ozone Layer, Technical Options Report : I : Aerosols ; II : Refrigeration Air conditioning and Heat Pumps ; III : Flexible and Rigid Foams ; IV: Electronics, Degreasing and Dry cleaning solvents ; V: Halons ; UNEP, Nairobi, June 1989.
- (20) Auditions de M. D. CLODIC - Responsable scientifique, Centre d'Energétique, Association pour la Recherche et le Développement des Méthodes et Processus Industriels (ARMINES), Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris -, Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, avril et mai 1990.
- (21) Entretien avec M. B. SPINNER - Professeur, Institut de Science et de Génie des Matériaux et Procédés (CNRS)-, Paris, juin 1990.
- (22) Audition de M.F. MEUNIER - Directeur-Adjoint du Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (LIMSI - CNRS) -, Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, mai 1990.
- (23) "Les pompes à chaleur chimiques, un atout d'avenir pour l'industrie française", entretien avec B. SPINNER, Forum Technologique, n° 3, 5 juin 1990.
- (24) "Le Froid solaire vient du charbon", par D.M. BENASTEAU, "L'Usine Nouvelle", 23 juillet 1987.
- (25) Audition de Mme R.M. BIERBAUM et de M. N.A.SUNDT - Office of Technological Assessment -, Washington D.C., avril 1990.

- (26) Audition de M. J. BOUYGUES - Délégué Général du groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales -, Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, mai 1990.
- (27) Audition de M. J. BRU - Responsable de la stratégie industrielle, SELNOR - Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, mai 1990.
- (28) Audition de MM. BINEAU et MARTY. Centre National de Prévention et de Protection (CNPP) - Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, mai 1990.
- (29) "Politique générale d'Entreprise", par STRATEGOR, InterEditions, Paris, 1988.

2. Le Protocole de Montréal et son application (III)

- (30) "La guerre de l'ozone", par J-F NOEL, J. THEYS et S. FAUCHEUX, Futuribles, n° 125, octobre 1988.
- (31) CFC Alliance Special Bulletin - Alliance for Responsible CFC Policy, Washington D.C., December 1989.
- (32) "Les Echos", 14 août 1989.
- (33) Entretien avec Mme Kristine L. HALL, IBM Corp. , Washington D.C., avril 1990.
- (34) Audition de M. DINGELL, Congressman, Washington D.C., avril 1990.
- (35) Audition de M. DESRUET - Président du Comité Français des Aérosols (CFA) et de M. TOCQUEVILLE, Secrétaire du CFA -, Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, avril 1990.
- (36) Audition de MM. WROBEL et TESSIER - Syndicat du Matériel Frigorifique -, Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, avril 1990.
- (37) Audition de M. BRIAN - Association Française du Froid - Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, avril 1990.

- (38) Audition de M. ARTAUD et de Mme PONS-SNPA- Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, mai 1990.
- (39) Audition de M. PASA, Président du SNPPA, Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, mai 1990.
- (40) Audition de M. TUTH - Syndicat National de l'Isolation -, Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, mai 1990.
- (41) Audition de Mme SCHOLTZ - SITELESC, FIEE -, Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, mai 1990.
- (42) Rencontre avec M. SARMA, Chef de la délégation indienne aux négociations pour la révision du Protocole de Montréal, Genève, 8 mars 1990.

C - CONCERNANT LE DURCISSEMENT DU PROTOCOLE DE MONTRÉAL ET LES CONDITIONS DE L'ADHÉSION DES PAYS EN DÉVELOPPEMENT (IV)

- (1) Rapport du sous-groupe de rédaction juridique sur les modifications découlant des propositions d'amendement au Protocole de Montréal, diffusé à l'occasion de la première partie de la troisième réunion du groupe de travail à composition non limitée des Parties à Genève du 8 au 14 mars 1990. (UNEP/OZL. Pro. WG III (1)/CRP 15), 14 mars 1990.
- (2) G. MÉGIE et J.-P. POMMEREAU, Service d'Aéronomie du CNRS. Rapport d'expertise pour l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Paris, mai 1990.
- (3) Brochure "Comment mieux utiliser les halons pour la sécurité incendie", éditée par le Comité technique français Halons-Environnement, avril 1990.
- (4) Rapport des Parties au Protocole de Montréal sur les travaux de leur première réunion tenue à Helsinki du 2 au 5 mai 1989 (UNEP/OZL. Pro. 1/5) 6 mai 1989.

- (5) "Etude des hypothèses et méthodes de calcul utilisées pour évaluer le coût du remplacement des substances qui raréfient l'ozone pour les pays en développement" par MM. H. PARGAL et A. KUMAR, Development Alternatives, Inde (UNEP/OZL WG II (2)/4, 30 janvier 1990).
- (6) "Points de convergence et de divergence entre deux études relatives aux incidences financières de l'application des dispositions du Protocole de Montréal pour les Pays en Développement" réalisées par Metroeconomica (Royaume-Uni) et Development Alternatives (Inde) (UNEP/OZL. Pro. WG II (2)/5, 30 janvier 1990).
- (7) Note de synthèse sur les incidences financières de l'application des dispositions du Protocole de Montréal pour les Pays en Développement (UNEP/OZL. Pro. WG II (2)/3 - 29 janvier 1990).
- (8) Rapport du groupe de travail à composition non limitée des Parties au Protocole de Montréal sur les travaux de la deuxième partie de sa deuxième réunion à Genève du 26 février au 5 mars 1990. (UNEP/OZL. Pro WG (2)/7, 5 mars 1990).
- (9) Mc KINSEY & Co "Protecting the global Environment : Funding Mechanisms" Noordwijk - The Netherlands, novembre 1989.
- (10) Etude sur le coût pour l'Inde de l'application du Protocole de Montréal par TOUCH & ROSS, Management Consultants et CREMER & WARNER, 22 février 1990.
- (11) Annexe III du compte rendu de la seconde partie de la troisième réunion à Genève du 9 au 11 mai 1990 du groupe de travail à composition non limitée des parties au Protocole de Montréal (UNEP/OZL. Pro. WG III (2)/3, 11 mai 1990).
- (12) Rapport du sous-groupe sur les coûts supplémentaires du groupe de travail à composition non limitée des Parties au Protocole de Montréal diffusé au cours de la deuxième partie de la troisième réunion de ce groupe à Genève du 9 au 11 mai 1990 (UNEP/OZL. Pro WG III (2)/1/CRP 1, 8 mai 1990).
- (13) Compte rendu op.cit. (11) du discours introductif de M. TOLBA à l'ouverture de la seconde partie de la troisième réunion à Genève du groupe de travail à composition non limitée des parties au protocole de Montréal (UNEP/OZL. Pro. WG III (2)/3 - 11 mai 1990 p. 2).
- (14) Annexe I du compte rendu op. cit. (11 et 13).

- (15) Télégramme Diplomatique DFRA, Genève 647 du 11 mai 1990.
- (16) Propositions du Directeur exécutif, en vue de la Conférence de Londres du 20 au 26 juin 1990, sur le mécanisme financier relatif à l'application du Protocole de Montréal (UNEP/OZL. Pro. WG IV/6 - 28 mai 1990).
- (17) Note du Directeur exécutif sur les transferts de technologie diffusée à l'occasion de la seconde partie de la troisième réunion à Genève, du 9 au 11 mai 1990, du groupe de travail à composition non limitée des parties au Protocole de Montréal (UNEP/OZL. Pro WG III (2)/2/Rév.1) 1er mai 1990.
- (18) Audition de M. F. BAZILE, Directeur Général d'ATOCHEM, par l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques. Paris, le 17 mai 1990.
- (19) Rencontre des responsables de la Freon Products Division, E.I. DUPONT de Nemours & Co (Inc.), à Wilmington, Etats-Unis, le 26 avril 1990.
- (20) Rencontre des responsables de "Alliance for a Responsible CFC Policy" à Washington, le 27 avril 1990.
- (21) Franck-Dominique VIVIEN, Centre Economie-Espace-Environnement, Université de Paris I. Rapport d'expertise pour l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques. Paris, mai 1990.
- (22) "Remarques sur la position américaine vis-à-vis de l'environnement" par Michel AUBRY, Conseiller pour la science et la technologie à l'Ambassade de France à Washington, 24 avril 1990.
- (23) Bulletin du Centre de Prospective et d'Études du Ministère de la Recherche et de la Technologie, N° 66, avril 1990.
- (24) EPA : "Developing Country Participation Scenarios", Avril 1990.
- (25) "Calculated Global Warming from CFCs, HCFCs and HFCs". Note par les Services d'études de DUPONT de Nemours, avril 1990.

ANNEXE

BILAN SCIENTIFIQUE SUR LES IMPLICATIONS DES CFC DANS LA
DEGRADATION DE LA COUCHE D'OZONE ET L'EFFET DE SERRE

PAR

GERARD MEGIE ET JEAN-PIERRE POMMEREAU

SERVICE D'AERONOMIE DU CNRS

VERRIERES LE 25 JUIN 1990

RAPPORT D'EXPERTISE CFC
PLAN

1. Résumé synthétique	304
2. Formation et équilibre de l'ozone.	313
- Equilibre naturel de la couche d'ozone	313
- Rôle des constituants minoritaires	316
- Transport	320
- Incertitudes	322
- Filtrage du rayonnement solaire	324
- Effet de serre additionnel	324
3. Evolution de la composition chimique de l'atmosphère	326
- Méthane	326
- Protoxyde d'azote	328
- Espèces Organo-halogénées; CFC	330
- Prévisions d'évolution	336
4. Les CFC facteur de déséquilibre de l'atmosphère	338
- Destruction de l'ozone en région polaire; chimie hétérogène	338
- Evaluation expérimentale des tendances de la couche d'ozone	354
5. Incertitudes sur les mécanismes	362
- Chimie hétérogène en région polaire et aux moyennes latitudes	362
- Dilution des trous d'ozone à l'échelle hémisphérique	365
- Echanges troposphère / stratosphère; durée de vie des espèces	366
6. Moyens d'étude et de surveillance	369
- Instruments de mesure de l'ozone depuis le sol	369
- Nouveaux instruments	372
- Lidar	372
- Sondeur micro-onde	373
- Spectromètre uv visible	374
- Spectromètre IR à transformée de Fourier	374
- Les réseaux	375

- Satellites	377
- Instruments embarqués sur avion	380
- Instruments embarqués sur ballons	381
- Modèles numériques de simulation	383
- Conclusions	385
7. Prédiction de l'évolution de la charge en chlore de la stratosphère et de son impact sur la couche d'ozone - Cas des constituants réglementés par le Protocole de Montréal ou déjà en usage.	386
- Définition des grandeurs utilisées pour l'évaluation de l'impact des constituants organo-halogénés sur la couche d'ozone	389
- Scenarii d'évolution de la charge en chlore et de l'impact sur la couche d'ozone pour les constituants organo-halogénés actuellement en usage	390
- Changements induits du rayonnement uv	393
- Effet de serre additionnel	394
8. Produits de substitution: Evolution de la charge en chlore de la stratosphère et impact sur la couche d'ozone et l'effet de serre additionnel	397
- Les produits de substitution	398
- Caractéristiques des produits de substitution en termes d'impact sur la couche d'ozone et de l'effet de serre additionnel	399
- Scenarii d'évolution de la charge en chlore de l'atmosphère prenant en compte les produits de substitution (HCFC, HFC)	401
- Conclusions	411
9. Réévaluation du Protocole de Montréal.	413
10. Renforcement des moyens de Recherche	417
11. Bibliographie	423

1. RESUME SYNTHETIQUE

Conséquence de l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en chlorofluorocarbures ou CFC, l'ozone stratosphérique est en voie de réduction. Les mêmes CFC participent à la croissance de l'effet de serre dont on sait la menace qu'il entraîne sur notre climat. Un premier accord international connu sous le nom de Protocole de Montréal et limitant l'emploi des CFC, a été signé par la majorité des pays à quelques exceptions notables près, en 1987. L'accord vient en révision tous les quatre ans, c'est à dire cette année. Doit-il être durci ? Doit il être étendu à d'autres produits ? Ce rapport a pour objectif de faire le point des informations scientifiques récentes disponibles qui permettent de formuler un point de vue fondé sur ces questions. On trouvera ci-après un résumé des principales conclusions de cette étude présenté sous forme d'argumentaire.

L'ozone un gaz essentiel au maintien de la vie sur la terre

L'ozone, bien que largement minoritaire dans l'atmosphère puisque son rapport de mélange n'excède pas 4 à 5 parties par million dans la stratosphère où il est le plus abondant, est un constituant indispensable au maintien de la vie sur la terre. Par ses propriétés absorbantes dans le domaine spectral ultraviolet, il protège la surface terrestre des rayons solaires les plus énergétiques qui s'ils parvenaient au niveau du sol, détruiraient rapidement toute forme de vie végétale et animale. De plus, l'énergie solaire absorbée par l'ozone entre 15 et 50 km d'altitude entraîne un réchauffement de l'atmosphère qui est à l'origine de la formation de la stratosphère, milieu d'une grande stabilité verticale où la température augmente avec l'altitude, par opposition à la troposphère situé en dessous où dominent les transports verticaux convectifs. Enfin comme le gaz carbonique et la vapeur d'eau, l'ozone est une molécule à effet de serre qui limite l'évasion du rayonnement tellurique infra-rouge vers l'espace et participe donc au maintien de conditions de température favorables au maintien de la vie sur la terre.

Un gaz à l'équilibre dans l'atmosphère

L'ozone est un constituant photochimiquement actif. Sa distribution verticale qui présente un maximum de concentration vers 20 à 25 km, est le résultat d'un équilibre entre une production permanente à haute altitude à partir de la photodissociation de la molécule d'oxygène O_2 par le rayonnement solaire, et une destruction tout aussi permanente par d'autres composés mineurs de la stratosphère, les oxydes d'azote ou NO_x , les radicaux hydrogénés ou HO_x et les espèces chlorées ou ClO_x . Les trois familles de radicaux susceptibles de détruire l'ozone, on pour origine la photodissociation ou l'oxydation dans la stratosphère d'espèces dites sources,

chimiquement stables à basse altitude, libérées au niveau du sol et transportées dans la stratosphère. Les espèces sources prépondérantes sont respectivement : le protoxyde d'azote N_2O issu de la réduction des nitrates par la matière organique dans les sols, le méthane CH_4 issu de la minéralisation de la matière organique dans les sols recouverts d'eau tels les marécages et les rizières et enfin le chlorure de méthyle CH_3Cl , issu de réactions entre les ions chlorures marins et les espèces soufrées produites par les algues dans les premières dizaines de mètres sous la surface des océans.

L'évolution récente de la composition de l'atmosphère

L'accroissement démographique et l'évolution des modes de vie de notre civilisation industrielle vient aujourd'hui à la fois à modifier le volume d'émission des espèces sources précédentes, dites naturelles et à en ajouter de nouvelles: les chlorofluorocarbures ou Fréons ou CFC, produits inexistant dans la nature. Les mesures directes dans l'atmosphère pour les dernières décennies et l'analyse des bulles de gaz piégées dans les carottages de glace pour les siècles passés, conduisent aux conclusions suivantes:

La concentration de protoxyde d'azote, source des radicaux NO_x mais également gaz à effet de serre, augmente dans l'atmosphère à la cadence de 0.25 % par an, essentiellement à cause du développement de l'emploi de engrais dans l'agriculture. Le méthane, source de radicaux hydrogénés dans la stratosphère et gaz à effet de serre, augmente aussi à la cadence de 0.9% par an par suite de l'accroissement de la surface de rizières, du nombre de ruminants dont la digestion est productrice de méthane, de l'exploitation du gaz naturel et des mines de charbon et de la multiplication des décharges de déchets. La concentration de chlorure de méthyle est stable (0.6 ppbv ou partie par milliard). Par contre la teneur en Fréon augmente en valeur moyenne toute espèces confondues à la cadence de 4% par an, depuis environ 50 ans.

Les conséquences sur l'équilibre de l'ozone et la destruction de l'ozone polaire

Dés le début des années 1970, l'attention des gouvernements avait été attirée sur les risques que pourrait entraîner pour l'équilibre de l'ozone, une émission importante d'oxydes d'azote par un flotte d'avions supersoniques évoluant directement dans la stratosphère. Les 2000 avions susceptibles d'entraîner un effet significatif n'ont jamais été construits et il n'a donc pas été possible de vérifier le bien fondé de cette hypothèse. Mais dans la ligne de cette première proposition, Rowland et Molina ont montré dès 1974, qu'un risque identique pourrait provenir d'un emploi croissant des chlorofluorocarbures, qui aurait pour effet d'augmenter la

teneur de la stratosphère en radicaux chlorés et par conséquent de détruire l'ozone. Les modèles de simulation permettaient de prédire une réduction de la concentration locale vers 40 km d'altitude à une cadence moyenne de l'ordre de 1% par an, variable suivant les estimations. Comme la quantité entre 35 et 45 km d'altitude ne représente que 10% de la colonne totale d'ozone, le risque d'une diminution significative et mesurable, n'est donc pas apparu immédiat. Les observations satellitaires récentes des instruments SAGE I et II semblent cependant confirmer cet effet, puisque une réduction de la concentration d'ozone de 3 ± 2 % entre 1981 et 1986, a été constatée aux latitudes moyennes vers 40 km d'altitude.

L'événement majeur qui s'est produit en 1985, a été la découverte par Farman et ses collaborateurs, de la réduction printanière de l'ozone en Antarctique à partir de 1979. Cet événement totalement imprévu, a eu pour conséquence la découverte de mécanismes nouveaux et extrêmement complexes de contrôle de l'équilibre de l'ozone, qui font intervenir des réactions chimiques hétérogènes entre gaz et particules de glace d'eau et d'acide nitrique et dont les finesses ne sont pas aujourd'hui toutes élucidées. Cependant et globalement, les mécanismes de destruction de l'ozone polaire ont pu être reproduits en laboratoire. On peut affirmer aujourd'hui que les composés responsables sont bien les chlores et à un moindre degré les bromes, issus de l'emploi croissant des chlorofluorocarbures. Toutes les autres hypothèses qui avaient pu être avancées (activité solaire, volcanisme, transport vertical) pour interpréter le phénomène, ont été rejetées sans appel. Les données d'observations continues en Antarctique depuis l'Année Géophysique Internationale en 1957, confirment qu'il s'agit d'un phénomène récent et qui ne cesse de s'amplifier depuis la première découverte. Bien que des épisodes de destruction d'ozone limités dans le temps, soit maintenant observés en Arctique, le fait que aucun trou stable et équivalent ne se forme dans ces régions est parfaitement interprété par les larges différences de circulation générale entre les deux hémisphères.

Tendance observées de l'évolution à long terme de l'ozone

Une évolution systématique de la quantité d'ozone peut-elle être déjà mise en évidence ? Bien que les premières mesures d'ozone total depuis le sol datent des années 1930, les données ne sont suffisamment homogènes pour tenter une analyse de dérive à long terme qu'à partir de l'année Géophysique Internationale en 1957. A partir de 1979, l'ozone est également systématiquement observé par l'instrument TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) embarqué à bord du satellite Nimbus 7. L'ensemble des données a été passé en revue en 1989 dans le cadre d'une étude conjointe du PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) et de l'OMM (Organisation Mondiale de Météorologie). Les conclusions de l'étude sont les suivantes:

Les observations depuis le sol, dont la densité n'est suffisante qu'aux moyennes latitudes de l'hémisphère nord et dont les données sont difficiles à exploiter durant les années 1960 à cause des essais nucléaires atmosphériques, montrent une diminution moyenne systématique et significative entre 1969 et 1986 durant les mois d'hiver, qui croît avec la latitude: 1.8% en 10 ans entre 30 et 39° N, 2.3% entre 40 et 52°N, 2.7% entre 53° et 64°N. En été, les variations observées ne sont statistiquement pas significative.

De leur côté, les observations satellitaires qui seules permettent d'explorer toutes les latitudes, montrent une diminution systématique globale de la colonne totale d'ozone de 2.5% en 11 ans, entre 1978 et 1987, entre 53°N et 53°S, avec un maximum dans l'hémisphère sud (2.9%) par rapport au nord (1.8%). La tendance observée varie en fonction de la latitude. Elle atteint un maximum de 10.6% entre 53 et 65° S.

Ces résultats, incompatibles avec les prévisions de réduction beaucoup plus lentes issues des modèles photochimiques classiques en phase gazeuse, démontrent qu'il y a effectivement diminution progressive de la colonne d'ozone et que le phénomène qui y contribue le plus est la destruction de l'ozone polaire.

Incertitudes sur les mécanismes et prévisions de diminution de l'ozone

La diminution progressive de la quantité d'ozone au cours de ces dernières années est établie, comme l'est sa cause: une destruction rapide en hiver et au printemps en région polaire, lié à l'accroissement de la concentration des composés chlorés issus de l'augmentation de la production de CFC industriels. L'évolution de l'ozone à moyen terme n'est cependant pas prévisible aujourd'hui, à cause des nombreuses incertitudes qui subsistent sur les mécanismes.

Les plus larges d'entre-elles concernent la chimie hétérogène, c'est à dire les réactions chimiques qui se produisent à la surface ou dans les cristaux de glace des nuages stratosphériques en région polaire, mais vraisemblablement également sur les particules d'aérosols à toutes latitudes. La chimie atmosphérique hétérogène est une nouvelle discipline qui découle directement de la découverte de la destruction de l'ozone polaire et bien que des progrès rapides soient obtenus dans les simulation de laboratoire, seul un nombre limité de réactions a pu être simulé, dans des conditions expérimentales qui ne reflètent pas toujours la réalité de l'atmosphère.

Un deuxième large domaine d'incertitude concerne les processus dynamiques, c'est à dire la manière dont l'air pauvre en ozone se dilue à l'échelle hémisphérique. Le trou d'ozone Antarctique est-il un phénomène confiné dans la dépression polaire qui ne diffuserait dans l'hémisphère sud qu'à la fin du printemps ou existerait-il une fuite qui entraînerait une réduction permanente d'ozone à l'échelle hémisphérique en hiver et au printemps ? Le refroidissement de

l'atmosphère par suite de l'absence relative d'ozone entraîne-t-il une modification de la circulation à grande échelle ?

Un troisième domaine concerne la façon dont les espèces sources qui sont toutes issues du niveau du sol sont transportées dans la stratosphère, c'est à dire les échanges entre la troposphère et la stratosphère. Suivant les idées les plus récentes, ces échanges pourraient se produire de façon privilégiée dans une région limitée du globe dans les grands amas convectifs de la région équatoriale au voisinage de la Micronésie également appelée Fontaine Stratosphérique. Ce fait, les constantes de temps de transport, les transformations chimiques et physiques que pourraient subir les espèces dans les nuages convectifs, demandent encore à être étudiés en détail dans un région difficile d'accès.

L'ensemble de ces incertitudes fait qu'aujourd'hui il n'est pas possible d'estimer le taux annuel moyen de diminution d'ozone que pourrait engendrer une augmentation donnée de charge de la stratosphère en chlore. Tout au plus peut-on donner un échelle qui fait référence au passé:

Charge en Chlore	Conséquences sur l'ozone stratosphérique
0.6 ppbv	Ere pré-industrielle
2.0 ppbv	1979, apparition des premiers signes de destruction en Antarctique;
3.2 ppbv	1987, colonne d'ozone réduite de 50% au printemps en Antarctique, destruction totale entre 12 et 22 km;
3.7 ppbv	1989, signes marqués d'une destruction en Arctique;
Au delà	Aucune référence. Les phénomènes ne sont pas linéaires, chaque année est une nouvelle expérience.

Effet de Serre additionnel

Bien que la température moyenne globale de l'atmosphère terrestre ait crue de 0.6°C par rapport à celle qui prévalait au début du siècle d'une part et que la teneur de cette atmosphère en gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O) soit en augmentation d'autre part, il n'est pas possible d'affirmer sans ambiguïté qu'une dérive climatique d'origine anthropogénique se soit déjà produite. Cependant les modèles de simulation bien qu'encore imparfaits, montrent que cette menace existe qui pourrait entraîner au cours du siècle prochain, un échauffement significatif de l'atmosphère et une montée du niveau des océans par suite de la dilatation des eaux.

Parmi l'ensemble des gaz à effet de serre, les CFC en 1990 représentent une contribution de 20% par rapport au pouvoir d'échauffement total. Les espèces les plus efficaces du point de vue de l'effet de serre sont celles dont les durées de vie sont les plus longues. Ce

sont également les plus nocives du point de vue de l'ozone. Toute mesure de restriction efficace vis à vis de l'une des menaces l'est également pour l'autre.

Prédiction de l'évolution de la charge en chlore

La charge en chlore de la stratosphère augmente. Elle représente sans pouvoir le quantifier, un risque clair de réduction de l'ozone. Un premier accord international, le Protocole de Montréal qui vise à terme à réduire cette charge en chlore, est intervenu en 1987. Comment va-t-elle évoluer au cours des prochaines années ?

Tous les chlorofluorocarbures ou CFC, ne participent pas de façon identique à l'augmentation de la charge en chlore. Leur contribution relative dépend du nombre d'atomes de chlore qu'ils contiennent, du volume produit et libéré dans l'atmosphère et de leur stabilité chimique et photochimique, c'est à dire de leur durée de vie face au temps de leur transport depuis le niveau du sol jusqu'à la stratosphère puis du temps qui sera nécessaire à leur dissociation complète dans la stratosphère elle-même.

En moyenne, le temps de transport dans la stratosphère est de 10 à 15 ans et le temps de résidence des CFC de longue durée de vie est de 100 ans. La charge en chlore que l'on observera dans 10 à 15 ans à haute altitude correspond à la quantité de CFC émise aujourd'hui. Elle ne peut donc qu'augmenter au cours des 10 à 15 prochaines années. Sa valeur maximum en 2000-2005 est estimée entre 4,5 et 5 ppbv.

Si l'émission des CFC était totalement interrompue en 1990, le retour de la charge en chlore à la valeur 1990, ne se produirait pas avant 2030 et le niveau 2 ppbv qui est celui de l'apparition d'un trou d'ozone en Antarctique, ne pourrait être retrouvé avant l'an 2080. Toute année supplémentaire dans la mise en application du bannissement représente un délai supplémentaire de 4 ans pour le retour à un état donné. Enfin si l'on maintenait une production de CFC seulement égale à 20% de celle d'aujourd'hui, on observerait à long terme une stabilisation de la charge en chlore à une valeur voisine de 3 ppbv, c'est à dire que l'on ne pourrait éliminer la présence du trou d'ozone Antarctique.

La contribution relative des différents espèces organo-halogénées naturelles et artificielles à la charge totale en chlore et leur durée de vie sont rappelées ci-dessous:

Espèce	Contribution relative (1990)	Durée de vie (ans)
CFC - 11	22 %	60
CFC - 12	25 %	120
CFC - 113	3%	90
CFC - 114	<1%	200
CFC - 115	<1%	400
HCFC - 22	3%	15.3
CCl4	13%	50
CH3CCl3	13%	6.3
Halon - 1301		100
Halon - 1211		15
Halon - 1202		1.5
Halon - 2402		6.2
CH3Cl (naturel)	20%	

Les 5 premières espèces sont les CFC considérés par les accord de Montréal.

HCFC-22 est un produit de durée de vie intermédiaire industriel considéré comme substitut, CCl4 le tétrachlorure de carbone et CH3CCl3 sont également industriels. Les trois espèces ne sont pas aujourd'hui contrôlées. Les halons participent également à la destruction de l'ozone par libération d'atomes de brome. Ils seraient 30 fois plus actifs mais également 100 fois moins abondant. Pour faciliter les estimations on peut considérer que 35 pptv (partie par trilliard) de brome serait équivalent à 1 ppbv de chlore. Les halons 1301, 1211 et 2402 sont pris en compte dans les accords de Montréal.

Produits de substitution

Devant les risques de réduction de la couche d'ozone et à moindre degré à court terme de contribution à l'accroissement de l'effet de serre, les industriels cherchent à mettre au point des méthodes et des produits de substitution pour chaque cas d'application. Du point de vue de

l'ozone, le meilleur substitut est celui qui ne contient ni chlore ni brome, mais parfois ceci n'est pas possible, au moins à court et moyen terme. La propriété fondamentale des produits de substitution qui les rend plus acceptables pour l'environnement, est leur durée de vie plus courte dans l'atmosphère. Ceci est le résultat de la présence dans la molécule d'un ou plusieurs atomes d'hydrogène qui à pour effet d'entraîner leur destruction par les radicaux hydroxyle OH toujours présents dans l'atmosphère. Les substituts des CFC sont alors des HCFC ou encore des HFC, ces derniers ne comprenant plus de chlore.

Bien qu'il existe encore des incertitudes notamment sur les produits de réaction entre les HCFC et le radical OH qui pourrait conduire dans certains cas à la formation d'espèces de plus longue durée de vie, la nocivité relative de ces produits vis à vis de l'ozone ou ODP (Ozone Depletion Potential) est à toute choses égales, inférieure à 15% de celle de CFC-11. En ce qui concerne l'effet de serre additionnel, bien que certaines molécules HCFC soient très absorbantes dans l'infra-rouge, leur faible durée de vie leur confère un pouvoir de d'échauffement ou GWP (Global Warming Potential) inférieur à ceux des CFC.

L'emploi des HCFC durant les années à venir et prioritairement des espèces de faible durée de vie et à condition que les volumes produits restent dans les limites des prévisions actuelles, est donc en attendant le transfert vers des produits non chlorés, une solution convenable pour réduire le risque de destruction de l'ozone par les CFC.

Réévaluation du Protocole de Montréal

Les CFC sont responsables de la lente réduction observée de l'ozone stratosphérique à l'échelle globale principalement par le processus de destruction en région polaire en hiver et au printemps. Bien que du fait des incertitudes sur le mécanismes aucune prévision fiable à moyen terme ne soit possible, la relation constatée entre l'augmentation de la charge de la haute atmosphère en chlore et l'accélération de la réduction de l'ozone en région polaire, exige un bannissement des espèces chlorées les plus nocives de ce point de vue.

Le premier objectif qui est d'atteindre un pallier dans la courbe d'évolution de la charge en chlore, rend nécessaire le bannissement général par tous les pays et aussi rapide que possible, des espèces chlorées et bromées de longue durée de vie: CFC 11, 12 113, 114, 115, Halons 1211, 1301 et 2402 déjà réglementés auxquels il faut ajouter le tétrachlorure de carbone CCl₄. Dans les limites de prévision de production actuelles et en ce qui concerne cet objectif, l'emploi des produits de substitution HCFC et HFC est acceptable.

Le deuxième objectif qui est d'atteindre à plus long terme un retour à l'état antérieur à la présence d'un trou d'ozone en Antarctique et également une réduction de la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre, ne pourra vraisemblablement être totalement atteint qu'en limitant à terme également l'emploi des espèces de moyenne durée de vie HCFC 22 et

CH3CCI3. Dans l'état de connaissances actuelles, la détermination d'une date précise pour l'arrêt total de l'emploi de ces dernier composés est très hypothétique.

Moyens d'étude et de surveillance

Les recherches sur le rôle des CFC dans la destruction de l'ozone et plus généralement sur l'environnement terrestre global et la mise au point de méthodes de prédictions fiables, représentent un des enjeux scientifique et socio-économique majeur des prochaines décennies. Pluridisciplinaires et internationales par nature, elles requièrent un développement des moyens d'observations, de modélisation, de formation et de recrutement.

Les observations continues, fiables et cohérentes sur une longue durée nécessaires à la mise en évidence de tendances seront obtenues depuis le sol par le déploiement et le maintien de stations scientifiques réparties en latitudes telles celles des réseaux Européens ou Internationaux (NDSC ou Network for Detection of Stratospheric Changes) auxquels la France peut contribuer activement: Observatoire de Haute Provence, stations de Dumont d'Urville et du Dôme C en Antarctique, station tropicale à définir.

Dans le domaine spatial qui seul permet une vision géographique globale, la France et l'Europe ont été jusqu'à présent totalement absentes de l'effort d'observations de la stratosphère. Des projets sont en cours d'évaluation et de définition. Leur réalisation doit être une priorité.

En ce qui concerne l'étude des mécanismes, la meilleure approche semble être la mise en oeuvre de campagnes coordonnées de mesure depuis le sol, en ballons, en avions et à partir de satellites, nécessairement internationales et auxquelles chaque pays doit contribuer prioritairement dans ses domaines d'excellence. Un bon exemple est la "Task Force" Européenne mise en place par les Communautés Européennes, qui prévoit une campagne d'étude de l'ozone polaire en Arctique en Hiver 1991-92. La France se doit d'y contribuer par des vols en ballons qu'elle est la seule à maîtriser en Europe et par la mise en oeuvre en avion et depuis le sol des instruments originaux qu'elle possède.

La communauté française dispose aujourd'hui d'un noyau d'équipes maîtrisant le développement de modèles de simulation multi-dimensionnels indispensables à l'interprétation des données et à la prévision à terme. La poursuite de cet effort implique une utilisation croissante de calculateurs vectoriels et la mise en place d'un réseau de communication à très grand débit dont le coût d'accès reste acceptable.

Enfin, le niveau de la contribution française aux recherches sur l'environnement ne pourra se développer que si les efforts précédents s'accompagnent d'une politique de recrutement et de formation des hommes, en particulier des ingénieurs et techniciens dont la réduction du nombre de postes au cours des dernières années se fait durement sentir dans une discipline où l'apport expérimental est l'une des conditions nécessaires au succès.

2. FORMATION ET EQUILIBRE DE L'OZONE - FILTRAGE DU RAYONNEMENT SOLAIRE ET EFFET DE SERRE

L'ozone, molécule composée de trois atomes d'oxygène (O₃), joue dans les équilibres de l'environnement terrestre un rôle fondamental. Bien que constituant minoritaire de l'atmosphère (environ un millionième du contenu total), l'ozone est l'unique absorbant du rayonnement solaire ultraviolet entre le sol et 80 km d'altitude. Il permet ainsi le maintien de la vie animale et végétale en éliminant les courtes longueurs d'onde susceptibles de détruire les cellules de la matière vivante et d'inhiber la photosynthèse. L'ozone est également responsable, avec le gaz carbonique et la vapeur d'eau, de l'équilibre radiatif et thermique de l'atmosphère terrestre et partant, des grands équilibres climatiques. Il conduit notamment à l'existence, aux altitudes supérieures (20-50 km), d'une région de grande stabilité vis-à-vis des échanges verticaux (stratosphère) située au-dessus d'une région (troposphère) où dominent convection et échanges d'énergie liés au cycle évaporation-condensation de la vapeur d'eau. Mais, à la différence du gaz carbonique qui reste essentiellement inerte à l'intérieur du réservoir atmosphérique, l'équilibre actuel de l'ozone résulte d'un très grand nombre d'interactions physico-chimiques mettant en jeu, outre le rayonnement solaire, de nombreux constituants très minoritaires de l'atmosphère représentant, pour certains, moins d'un milliardième de la concentration totale. Ceux-ci trouvent leur source dans des espèces produites au niveau du sol, soit naturellement (vapeur d'eau, gaz carbonique, méthane, hydrogène moléculaire, protoxyde d'azote), soit artificiellement (méthane, protoxyde d'azote, constituants organo-chlorés). Le fait qu'une même espèce puisse ainsi avoir deux origines différentes pose le problème de la compréhension et de la quantification de la composante naturelle qui devient un préalable à toute tentative d'évaluation des risques liés aux activités humaines. De ce fait, le champ d'investigation ne se limite pas à la seule composante atmosphérique du cycle de ces constituants mais doit englober les autres réservoirs naturels que sont la biosphère et les océans.

Equilibre naturel de la couche d'ozone

C'est en 1840 que Schoënbain à Bâle introduit pour la première fois le mot ozone (du grec ozein = sentir) pour caractériser une espèce chimique se formant dans diverses réactions et possédant une odeur très caractéristique que l'on retrouve lorsqu'on déclenche des étincelles électriques dans de l'air sec. Au cours du demi-siècle qui suit, la nature chimique de l'ozone est précisée notamment par de La Rive à Genève et Houzeau à Rouen. Les premières observations systématiques de la teneur en ozone dans l'air sont introduites en 1877 par Albert-Lévy à l'Observatoire du Parc Montsouris à Paris et constituent la première base de données

climatologiques sur l'ozone, mettant notamment en évidence un maximum de concentration au sol en été et un minimum en hiver. C'est lors de la première conférence internationale sur l'ozone organisée à Paris en 1929 à la suite des travaux des français Fabry et Buisson que le physicien anglais Chapman introduit la première théorie de l'équilibre de l'ozone dans l'atmosphère. Les recherches conduites au cours des cinquante années qui suivent, conduisent enfin à une compréhension quantitative du comportement de l'ozone et mettent en évidence la fragilité de cet équilibre, expliquant ainsi la potentialité d'une diminution de la couche d'ozone sous l'influence des activités humaines.

Distribution verticale de l'ozone dans la stratosphère

La répartition verticale de l'ozone dans l'atmosphère (figure 2.1) se caractérise par un maximum de concentration situé entre 25 et 30 km d'altitude, correspondant à des concentrations relatives en volume de l'ordre de 4 à 5 milliardièmes, ou ppmv (parties par million en volume). Dans la basse atmosphère - troposphère - cette concentration relative ne dépasse pas 50 milliardièmes, ou ppbv (parties par billions - au sens anglo-saxon de milliards - en volume). A la différence d'autres constituants atmosphériques comme l'azote, l'oxygène moléculaire, le gaz carbonique, le méthane, l'oxyde nitreux, l'ozone ne présente donc pas un profil vertical, caractérisé en termes de concentration absolue par une abondance maximum au niveau du sol et une décroissance uniforme avec l'altitude. Ceci traduit l'existence d'une source située dans la haute atmosphère et non au niveau du sol comme pour les autres constituants. En termes de concentration relative, le profil d'ozone traduit également une variation de plusieurs ordre de grandeur entre le sol et 60 km d'altitude alors que les concentrations relatives de l'azote (78%), de l'oxygène moléculaire (21%) et du gaz carbonique (345 ppmv) restent constantes dans le même domaine d'altitude. Cette invariance de rapports d'abondance des constituants minoritaires traduit d'une part leur absence de réactivité chimique et d'autre part un mélange homogène du gaz atmosphérique dans toute l'atmosphère jusqu'à 80 km d'altitude, et ce indépendamment de la masse des constituants considérés. Il s'agit là d'une donnée essentielle pour la compréhension des équilibres de la haute atmosphère puisque tout constituant, même de masse supérieure à la masse moyenne de l'atmosphère, peut à partir du sol diffuser vers les altitudes supérieures et parvenir ainsi jusque dans les régions supérieures de l'atmosphère.

Expliquer l'équilibre naturel de l'ozone implique alors d'explicitier les mécanismes de la haute atmosphère qui conduisent à l'existence d'un maximum de concentration dans la stratosphère (figure 2.2). Le processus initial est lié au rayonnement solaire. La dissociation de l'oxygène moléculaire, qui représente 21% en volume de la composition chimique de l'atmosphère, sous l'influence du rayonnement solaire de courte longueur d'onde conduit entre

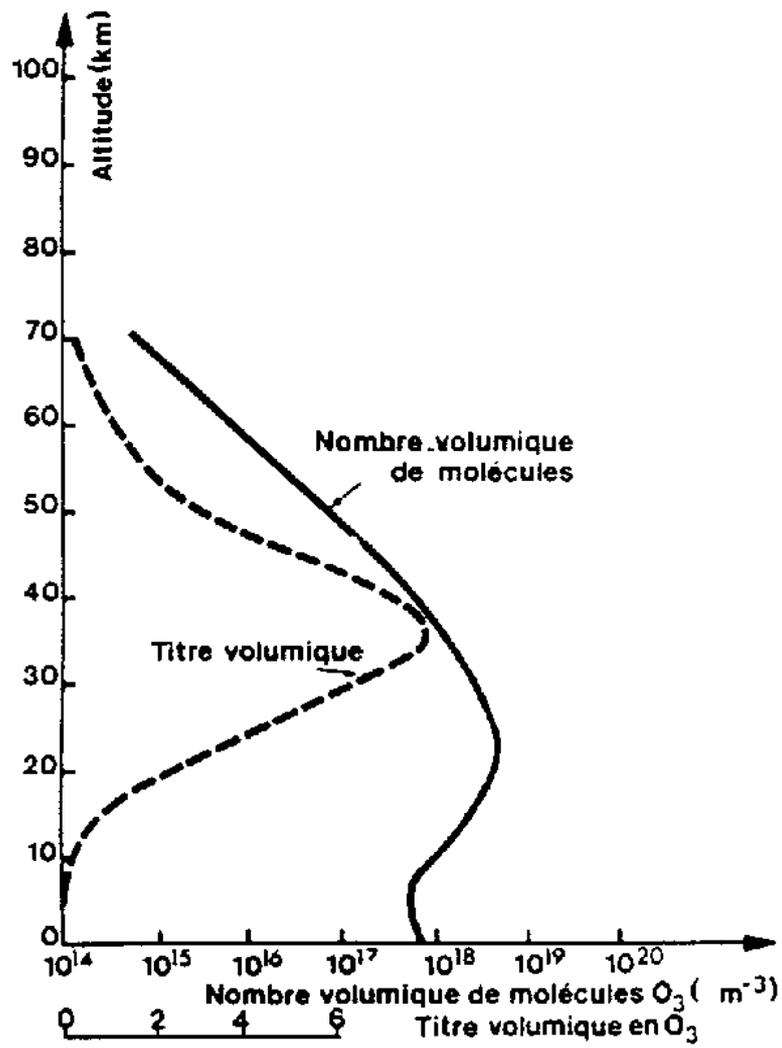
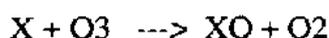


Figure 2.1 - Distribution verticale de l'ozone dans l'atmosphère exprimée en termes de concentration absolue (molécules. m^{-3}) et de concentration relative (ppm).

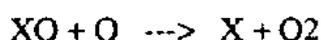
30 et 60 km d'altitude à la production d'atomes d'oxygène. Malgré l'intensité du rayonnement solaire disponible à haute altitude, ce processus est relativement lent puisqu'il faut plusieurs dizaines d'années pour remplir à partir de zéro le réservoir d'oxygène atomique O. Dès sa formation, l'atome d'oxygène se recombine avec une molécule O₂ pour former l'ozone O₃. La molécule O₃ a la propriété d'absorber le rayonnement dans le domaine de longueur d'onde compris entre 200 nm (nanomètre ou milliardième de mètre) et 320 nm, où précisément l'oxygène moléculaire O₂ n'absorbe plus. Cette interaction lumière-matière conduit à la dissociation de l'ozone en oxygène moléculaire O₂ et oxygène atomique. Il s'agit à nouveau d'une réaction rapide et les processus d'échange entre O₃ et O sont donc caractérisés par des constantes de temps extrêmement courtes qui, de jour, ne dépassent pas une heure. Il y a ainsi équivalence entre présence d'oxygène atomique et présence d'ozone dans tout le domaine d'altitude compris entre 20 et 80 km. Pour équilibrer le bilan de l'ozone dans la stratosphère, il est alors nécessaire de faire disparaître un de ces deux constituants ou les deux simultanément. La réaction de recombinaison directe entre O et O₃ est effectivement le processus primaire qui conduit à la disparition de ces composés oxygénés dits impairs, puisque contenant un nombre impair d'atomes d'oxygène. Mais cette réaction est lente et ne peut en fait expliquer qu'au maximum 20% de la destruction des oxygènes impairs. Il n'est donc pas possible d'expliquer l'équilibre de l'ozone à partir des seuls composés oxygénés contenus dans l'atmosphère. Il faut alors pour arriver à un bilan équilibré, compatible avec les concentrations d'oxygène impair actuellement observées dans la stratosphère, introduire d'autres constituants minoritaires dont le rôle dans l'équilibre de l'ozone repose sur le concept de catalyse chimique.

Les constituants minoritaires

Un constituant X est un catalyseur s'il contrôle ou induit une réaction, ou un cycle de réactions sans lui-même disparaître au cours de ces processus. Ainsi, dans le cas de l'ozone, le cycle essentiel est induit à partir de l'oxydation par l'ozone du constituant X qui conduit à la production de l'oxyde XO :



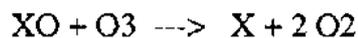
L'oxyde XO ainsi formé réagit alors avec l'oxygène atomique pour redonner le constituant X et une molécule d'oxygène



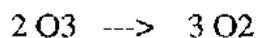
Le bilan net de ce cycle catalytique correspond alors à la réaction :



et aboutit ainsi à la destruction simultanée d'une molécule d'ozone et d'un atome d'oxygène pour reformer l'oxygène moléculaire, processus analogue à celui de la réaction directe $\text{O} + \text{O}_3$ déjà envisagé. Il est d'ailleurs possible d'envisager d'autres cycles catalytiques conduisant à des réactions équivalentes qui n'existent pas de façon directe. Ainsi l'oxyde XO peut à son tour réagir avec l'ozone suivant la réaction :



Le bilan net du cycle conduit alors à la destruction de deux molécules d'ozone :



L'important est que, dans chacun de ces cycles, le constituant X soit régénéré et puisse à nouveau réagir avec l'ozone, initiant un nouveau cycle de destruction. Le nombre de fois où un tel cycle catalytique peut se produire est appelé la longueur de la chaîne catalytique. Pour les constituants intervenant dans l'équilibre de l'ozone, ces longueurs de chaîne peuvent atteindre plusieurs milliers et l'on comprend alors que des constituants dont l'abondance relative se chiffre en ppbv puissent pour de telles longueurs de chaîne contrôler chimiquement un constituant comme l'ozone dont l'abondance relative de 4 à 5 millionièmes au maximum, est pourtant supérieure d'un facteur mille. Il est aujourd'hui démontré que de telles réactions se produisent naturellement dans la stratosphère, compensant ainsi la faible efficacité de la réaction directe $\text{O}_3 + \text{O}$.

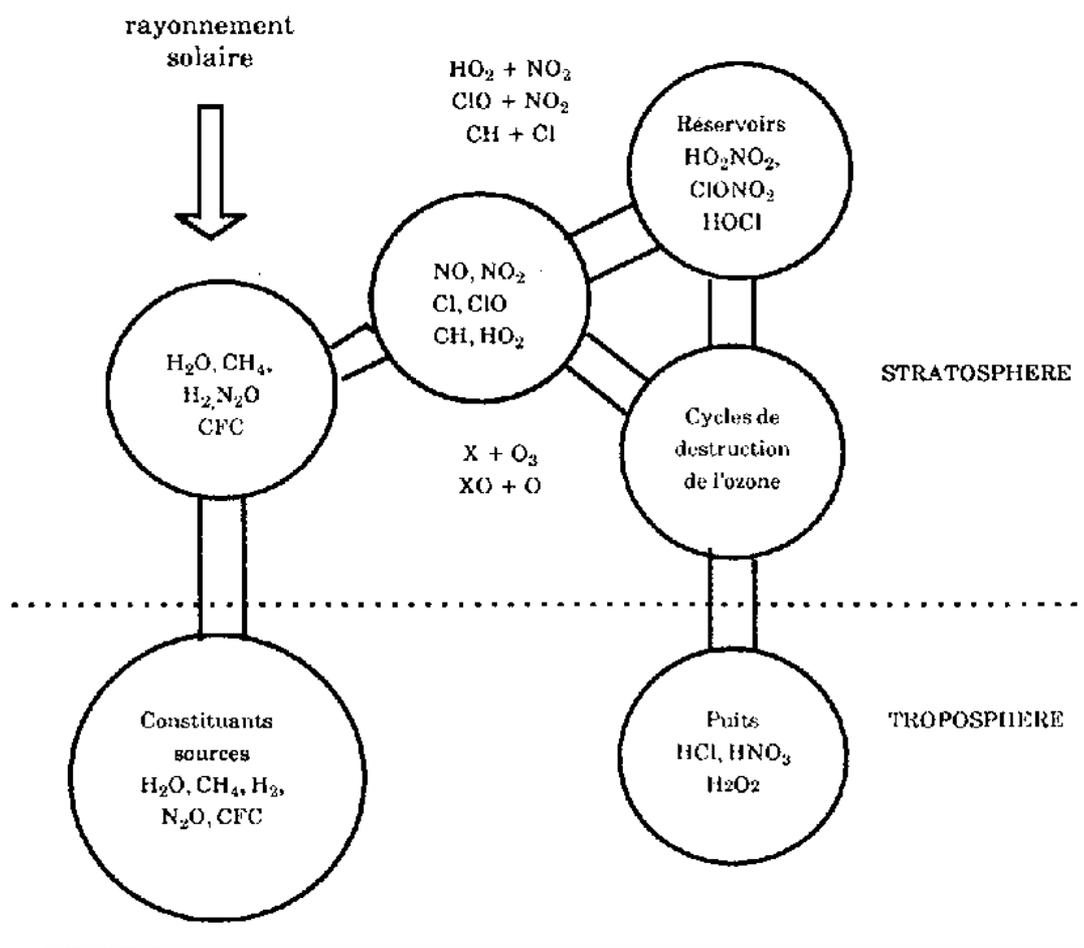
Trois "familles" de constituants minoritaires interviennent dans l'équilibre de l'ozone : les composés hydrogénés (HOX), azotés (NOX) et chlorés (CLOX). Pour comprendre par la suite comment les activités humaines perturbent cet équilibre, il est nécessaire tout d'abord de décrire le cycle de ces constituants dans l'atmosphère. Celui-ci correspond à un schéma classique qui met en évidence les interactions entre les différents réservoirs de l'environnement terrestre : des sources naturelles au niveau du sol (biosphère, océan), des interactions chimiques complexes dans l'atmosphère, un ou plusieurs "puits" assurant le bouclage du cycle (figure 2.2).

Les sources résultent de processus physiques (évaporation, dégazage des roches) ou biologiques (dénitrification, fermentation anaérobique...). Les gaz ainsi produits (vapeur d'eau, hydrogène, méthane, protoxyde d'azote, composés organo-chlorés) diffusent dans la basse

atmosphère avant d'atteindre, dans des temps de l'ordre de sept à dix ans, la stratosphère. Leur concentration relative est de l'ordre du millionième. Une remarque importante s'impose alors : la variable pertinente pour les équilibres de la haute atmosphère est en fait la quantité de ces constituants sources qui atteignent les régions supérieures de l'atmosphère. Ce flux d'entrée ne dépend donc pas uniquement de l'intensité de la source au sol mais du produit de cette intensité par le temps total pendant lequel ces espèces vont résider dans l'atmosphère. On conçoit bien en effet, que si deux espèces ont des sources d'égale intensité et que l'une ne subit aucune interaction dans la troposphère alors que l'autre est soluble dans l'eau ou détruite chimiquement, seule la première parviendra en quantité appréciable dans la stratosphère. Ce critère permet de distinguer les espèces susceptibles de constituer effectivement des sources de constituants stratosphériques. Une fois parvenues dans la stratosphère, les espèces sources vont être détruites sous l'action d'un rayonnement solaire intense soit directement par photodissociation, soit de façon indirecte sous l'action de constituants eux-mêmes produits par l'action du flux solaire.

Les constituants ainsi produits, dans des rapports d'abondance de l'ordre de quelques ppbv et même pour certains de quelques millièmes de milliardièmes, ou pptv (parties par trillions au sens anglo-saxon), sont chimiquement actifs. Ils interagissent très rapidement entre eux pour aboutir à un état d'équilibre qui se traduit par une différenciation importante de leur prépondérance relative en fonction de l'altitude et du cycle jour-nuit. Ainsi les composés hydrogénés (radical hydroxyle OH et radical hydroperoxyde HO₂) exercent leur influence au dessus de 45-50 km. Les composés azotés (oxyde azotique NO, peroxyde d'azote NO₂, trioxyde d'azote NO₃, pentoxyde d'azote N₂O₅) et chlorés (chlore atomique Cl, monoxyde de chlore ClO) sont prépondérants à plus basse altitude (25-50 km). En se recombinaient entre eux, ces différents constituants chimiquement actifs, dénommés espèces radicalaires ou radicaux libres, conduisent à la formation des espèces puits, qui sont essentiellement constituées par les formes acides : peroxyde d'hydrogène H₂O₂, acide nitrique HNO₃ et acide chlorhydrique HCl. Ces constituants ont la propriété d'être solubles dans l'eau et donc, lorsqu'ils traversent la tropopause, frontière entre la stratosphère et la troposphère, ils peuvent être éliminés par les pluies.

Une caractéristique essentielle des ces interactions chimiques dans la stratosphère est le couplage entre les différentes familles de constituants. Celui-ci est assuré par l'intermédiaire d'espèces dites "réservoir" qui résultent des réactions entre différents constituants de chaque famille : acide pernitrique HO₂NO₂ (ou HNO₄ - interaction HO_x - NO_x), nitrate de chlore ClONO₂ (ou ClNO₃ -interaction ClO_x - NO_x) et acide hypochloreux HOCl (interaction HO_x - ClO_x). Leur dénomination d'espèces réservoir tient au fait qu'elles permettent de stocker une partie des espèces réactives diminuant ainsi la capacité des espèces radicalaires à détruire



1. Espèces radicalaires :

- composés hydrogénés :

- OH radical hydroxyle
- HO₂ radical hydroperoxyde

- composés azotés :

- N₂O protoxyde d'azote ou oxyde azoteux ou hémioxyde d'azote
- NO oxyde azotique
- NO₂ peroxyde ou dioxyde d'azote
- NO₃ trioxyde d'azote
- N₂O₅ pentoxyde d'azote

- composés chlorés :

- Cl chlore atomique
- ClO monoxyde de chlore

2. Espèces puits :

- H₂O₂ peroxyde d'hydrogène
- HNO₃ acide nitrique
- HCl acide chlorhydrique

3. Espèces réservoirs :

- HO₂NO₂ acide pernitrique
- ClONO₂ nitrate de chlore
- HOCl acide hypochloreux

Figure 2.2 - Cycle des constituants hydrogénés, azotés et chlorés dans l'atmosphère.

l'ozone. Il est important également de noter que la capacité de "stockage" sous forme d'espèces réservoir dépend en fait de la concentration du constituant le moins abondant. Les réservoirs peuvent donc dans certains cas "déborder" et cesser de jouer leur rôle tampon. Ces phénomènes à seuil se traduisent par une non-linéarité du système chimique qui rend d'autant plus difficile les tentatives de prédiction de l'évolution à long terme de la stratosphère.

L'intervention des constituants minoritaires permet d'expliquer l'équilibre actuel de l'ozone. Les couples (OH, HO₂), (NO, NO₂) et (Cl, ClO) jouent le rôle du couple (X, XO) déjà explicité pour détruire l'ozone par l'intermédiaire de cycles catalytiques. Le rôle relatif de ces différents cycles dépend fortement de l'altitude et le bilan total de leur influence sur l'équilibre de l'ozone est représenté sur la figure 2.3. Les constituants azotés contrôlent cet équilibre dans la basse stratosphère et les constituants hydrogénés dans les régions supérieures, les constituants chlorés intervenant principalement dans la région 35-50 km pour environ 15 % actuellement. C'est donc dans cette région d'altitude qu'il faudra chercher la signature de l'effet éventuel de ces constituants sur la couche d'ozone.

Les processus de transport

Ce bilan ne concerne que l'abondance moyenne globale de l'ozone dans l'atmosphère. Mais ce constituant n'est réparti de façon homogène ni dans l'espace, ni dans le temps. L'étape suivante consiste donc à comprendre les variations observées dans la distribution spatiale et temporelle de l'ozone. Les observations effectuées en des stations situées à des latitudes différentes montrent que la quantité totale d'ozone, pendant toutes les saisons, augmente en allant de l'équateur vers le pôle avec un maximum à la fin de l'hiver et au printemps (figure 2.4). Or, la production en un point donné n'étant liée qu'à l'action du rayonnement solaire, on devrait observer un maximum en latitude à l'équateur, là où le flux solaire est le plus intense et un maximum saisonnier en été. Il est alors nécessaire d'introduire les processus de transport qui seuls peuvent expliquer cette redistribution de l'ozone à partir des régions de production.

Les mouvements dans un fluide ont, en général, pour but d'éliminer les inhomogénéités qui existent dans les répartitions des champs des variables thermodynamiques, pression et température. Dans l'atmosphère, l'existence de régions chaudes et froides induit, de l'équateur vers les pôles, un transport méridien que la rotation de la terre, en le déviant, transforme en circulation zonale des masses d'air. Dans la stratosphère, l'ozone en absorbant le rayonnement solaire, est le principal responsable de l'équilibre thermique.

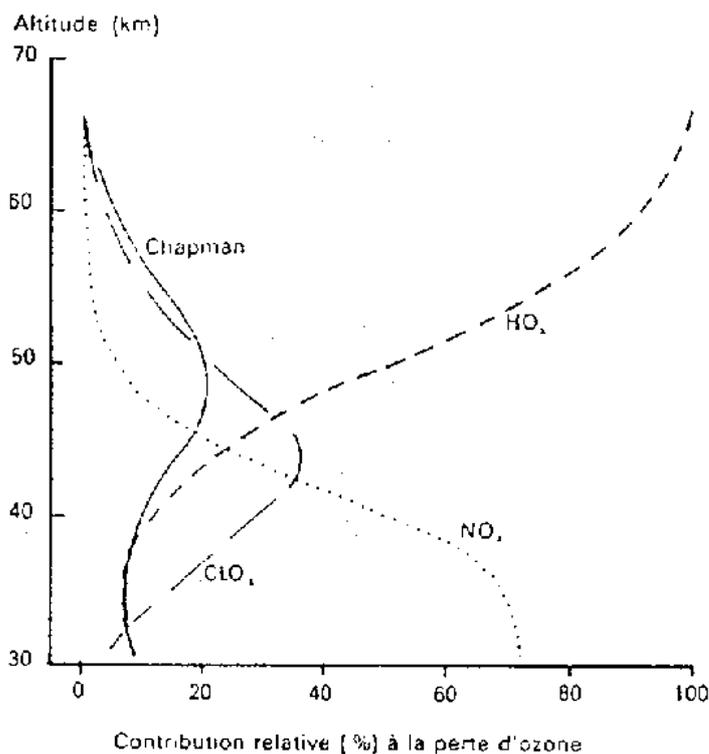


Figure 2.3 - Contribution relative des différentes familles de constituants (Ox, HOx, NOx, ClOx) à l'équilibre de la couche d'ozone.

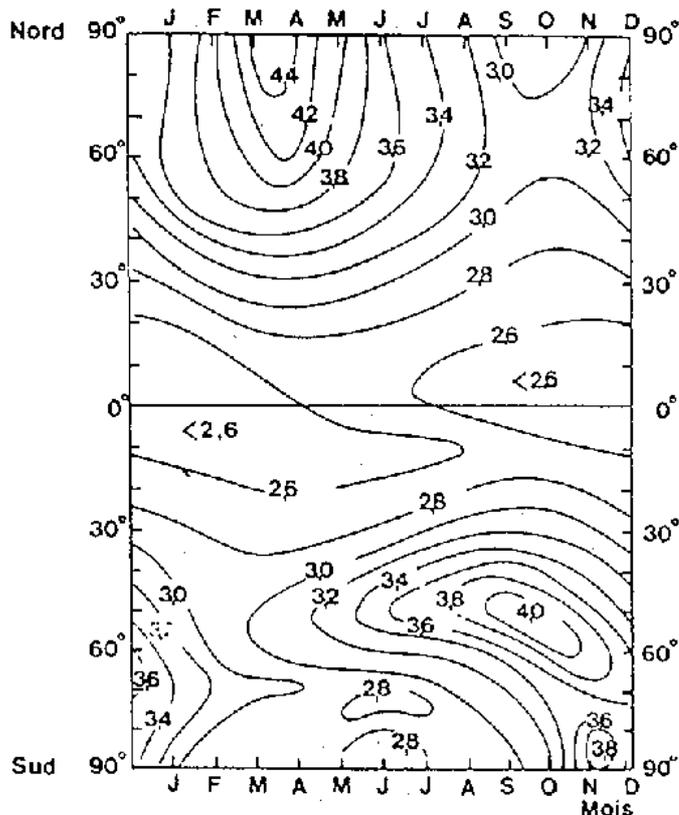


Figure 2.4 - Répartition méridienne de la quantité intégrée d'ozone exprimée en millimètres.

Toute disparité dans la distribution spatiale de l'ozone se traduit alors par la création de différences de température et donne donc naissance à un mouvement des masses d'air qui lui-même transporte l'ozone.

Le couplage entre les processus radiatifs, dynamiques et chimiques via l'ozone est ainsi l'une des caractéristiques essentielles de la stratosphère. L'ensemble de ces couplages aboutit alors à un comportement global de l'ozone qui conduit à distinguer trois domaines d'altitude :

- les processus dynamiques dominant aux altitudes inférieures à 25 km, l'ozone se comportant alors comme un traceur passif. La circulation méridienne sous l'action combinée du vent moyen et des phénomènes ondulatoires transporte l'ozone des régions équatoriales où il est produit vers les régions polaires où il s'accumule pendant l'hiver en l'absence d'activité chimique.

- les processus chimiques dominant aux altitudes supérieures à 40 km, là où d'ailleurs l'effet des constituants chlorés se fait le plus sentir ;

- entre ces deux altitudes (25-40 km) existe une région où les deux types de processus jouent un rôle et conduisent à une très grande variabilité spatiale et temporelle des concentrations d'ozone, dont l'origine est souvent très difficile à déterminer avec précision.

Les incertitudes

L'exposé précédent montre toute la complexité d'un équilibre précaire dans une région de l'atmosphère d'accès pour le moins difficile. Il est bien évident que ces connaissances sont entachées de nombreuses sources d'incertitudes. Sans prétendre être exhaustif, quelques unes d'entre elles sont rappelées ci-dessous, qui démontrent que la compréhension des équilibres de la haute atmosphère reste, et restera très probablement au cours des prochaines années, du ressort de la recherche.

Dans le domaine de la chimie, certaines vitesses des réactions mises en jeu ne sont encore connues qu'avec une incertitude pouvant aller jusqu'à 50 %. Il s'agit ici d'un travail de laboratoire extrêmement difficile car il faut reconstituer les conditions de pression (de un dixième à un millième d'atmosphère) et de température (de - 90°C à -10°C) qui règnent dans la stratosphère. Mais l'incertitude la plus importante dans ce domaine, tient certainement à la mise en évidence récente (cf. chapitre 4) de l'importance des processus de chimie dite hétérogène,

mettant en jeu les interactions entre les phases gazeuses, solides et liquides qui peuvent coexister dans la haute atmosphère. L'importance de ces processus à l'échelle globale, en particulier en dehors des régions polaires reste pour une large part inconnue.

Par ailleurs et compte tenu de la difficulté à mesurer avec précision les concentrations des constituants stratosphériques, les mesures dont on dispose actuellement, restent insuffisantes pour permettre de contraindre définitivement les modèles, notamment du fait de l'absence de données quant à la répartition en latitude et longitude des principaux constituants. Et ceci, malgré l'effort instrumental important accompli au cours des dix dernières années tant dans le domaine des mesures au sol que dans celui des instruments embarqués (avion, ballon, satellite).

En ce qui concerne les espèces sources, la difficulté principale concerne l'établissement de bilans quantifiés à l'échelle du globe. (cf. chapitre 3). De plus, le temps de résidence de ces constituants dans la basse atmosphère est un paramètre déterminant dans le calcul des flux d'entrée dans la stratosphère. Or ce temps de résidence dépend en partie des interactions physico-chimiques dans la troposphère, domaine de recherche encore en plein essor à l'échelle globale et dans lequel aussi bien l'étude précise des mécanismes que les mesures expérimentales restent à développer.

Du point de vue radiatif, le rayonnement solaire ultraviolet est le principal moteur des interactions chimiques dans la stratosphère. Avant de parvenir jusqu'à 50 km d'altitude, ce rayonnement doit traverser les régions supérieures de l'atmosphère et l'on conçoit bien que, de la détermination précise de l'atténuation qu'il y subit, dépend la connaissance exacte du flux disponible à plus basse altitude pour induire les réactions chimiques. Il s'agit là de mesures extrêmement délicates car elles doivent aboutir à une détermination absolue des intensités. D'autre part la variabilité naturelle liée aux différents cycles solaires (27 jours, 11 ans, 22 ans) vient encore compliquer le problème, si bien qu'il est raisonnable d'estimer qu'aujourd'hui les incertitudes sur les valeurs précises du forçage solaire restent comprises entre 10 % et 20 % suivant le domaine de longueur d'onde.

Enfin du point de vue des processus dynamiques, il est nécessaire de constater que notre compréhension des processus correspondant à des échelles spatiales courtes (entre 1 km et 1000 km) reste encore imprécise et qu'il nous est donc difficile de prendre en compte ces phénomènes de façon quantitative dans les modèles de simulation à grande échelle.

Filtrage du rayonnement solaire

Le rôle de filtrage du rayonnement solaire ultra-violet par l'ozone est essentiellement lié à l'absorption du rayonnement solaire dans le domaine des longueurs d'onde comprises entre 240 nm et 320 nm. Le seuil inférieur de 240 nm correspond à la limite supérieure des longueurs d'onde absorbées par l'oxygène moléculaire, constituant majoritaire du gaz atmosphérique. Parmi tous les constituants de l'atmosphère, seul l'ozone présente des propriétés d'absorption suffisamment intenses pour atténuer effectivement le rayonnement solaire ultra-violet et empêcher ainsi qu'arrive au niveau du sol un rayonnement énergétique susceptible de détruire les molécules nobles de la matière vivante (acides aminés, protéines) et d'inhiber la photosynthèse. On pense d'ailleurs aujourd'hui que l'apparition de la vie sur les terres émergées est directement liée à l'apparition de l'ozone dans la haute atmosphère qui a suivi celle de l'oxygène moléculaire produit en partie par les premiers organismes vivants dans les océans. Pour mesurer la fragilité de cet équilibre, on peut raisonner sur la quantité totale d'ozone qui nous sépare du soleil. En effet, en première approximation, c'est cette quantité totale, exprimée en termes de l'épaisseur d'une colonne d'ozone de surface unité, qui importe lorsque l'on veut quantifier le filtrage du rayonnement solaire par l'atmosphère terrestre. Si l'on prend donc toutes les molécules d'ozone contenues dans une telle colonne et que l'on ramène l'ensemble aux conditions de pression et de température qui règnent à la surface du sol, ce qui revient à comprimer l'ozone de la haute atmosphère, on obtient une épaisseur totale moyenne de 3 millimètres. Malgré cette faible épaisseur, le rayonnement solaire ultra-violet (UV) de longueur d'onde inférieur à 280 nm, qui correspond au domaine des UV-C ne peut parvenir jusqu'au sol. Dans le domaine des UV-B, entre 280 nm et 320 nm, le rayonnement qui parvient jusqu'à la surface est fortement atténué et ce d'autant plus que la longueur d'onde est plus courte. Enfin les rayons UV-A compris entre 320 et 400 nanomètres ne sont que peu affectés par l'ozone.

Effet de serre

Les propriétés d'absorption de l'ozone ne se limitent pas au seul domaine des longueurs d'onde ultra-violettes. Comme tous les constituants sources que nous avons été conduits à considérer dans la description de l'équilibre de l'ozone, - méthane, oxyde nitreux, composés organo-halogénés -, l'ozone possède des bandes d'absorption dans le domaine spectral de l'infra-rouge thermique autour de 10 micromètres. Ces constituants, à l'image de la vapeur d'eau et du gaz carbonique CO₂, interceptent une partie du rayonnement émis par la terre et le renvoient vers la surface. Ils peuvent ainsi, en fonction de leur concentration dans

l'atmosphère, contribuer à l'effet de serre, phénomène naturel pour une large part, puisqu'il conduit à une augmentation de la température de la surface terrestre de + 30°C par rapport à celle (- 19°C) que connaîtrait notre planète en l'absence d'atmosphère. Ils jouent par conséquent un rôle fondamental dans le maintien de l'eau sous forme liquide à la surface de la Terre, condition nécessaire à l'apparition de la vie. L'influence de ces constituants minoritaires est d'autant plus grande que leurs bandes d'absorption caractéristiques, dans le domaine des longueurs d'onde infra-rouge, sont situées en dehors des régions spectrales d'absorption de la vapeur d'eau et du gaz carbonique. A masse équivalente dans l'atmosphère, le pouvoir radiatif du méthane CH₄, mesuré en termes de réchauffement de la surface, est ainsi supérieur d'un facteur 58 à celui du gaz carbonique. Dans le cas de l'oxyde nitreux N₂O ce facteur atteint la valeur de 206. Le tableau suivant donne la part relative prise par chacun de ces constituants dans l'effet de serre "naturel", correspondant à la composition chimique de l'atmosphère entre 1765 et 1900.

Constituant	Contribution relative (%) à l'effet de serre naturel
CO ₂	66 %
CH ₄	22 %
N ₂ O	5 %
H ₂ O (stratosphère)	7 %

3. EVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE L'ATMOSPHERE

L'équilibre naturel de la couche d'ozone est lié au rôle primordial joué par les constituants sources des familles de composés hydrogénés, azotés ou chlorés. La quantification de ces sources conduit alors à considérer l'ensemble du système atmosphérique et les couplages avec la biosphère et les océans. Le problème de l'ozone rejoint ainsi celui de la modification globale de la composition chimique de l'atmosphère et des changements climatiques que celle-ci peut induire. Pour pouvoir par la suite quantifier ces effets, il est nécessaire de caractériser les processus qui assurent la régulation des sources et des puits de ces constituants, en examinant successivement les origines naturelles et anthropiques des constituants qui sont directement liés à l'équilibre de l'ozone et induisent donc à la fois des effets climatiques et chimiques : méthane, protoxyde d'azote, composés organo-chlorés.

Méthane

La présence du méthane dans l'atmosphère est connue depuis 1940, mais les premières mesures ne datent que de la fin des années 1960 lorsque des techniques d'analyse suffisamment sensibles deviennent disponibles. Les valeurs moyennes des concentrations relatives mesurées étaient alors de 1,41 ppmv dans l'hémisphère Nord et 1,30 ppmv dans l'hémisphère Sud. En 1976, elles avaient augmenté jusqu'à 1,6 ppmv et les concentrations actuelles (1989) sont d'environ 1,72 ppmv, soit une augmentation moyenne de 0,9% par an. Si l'on s'intéresse aux tendances à plus long terme une information intéressante peut être obtenue à partir des archives glaciaires par l'analyse des bulles d'air piégées dans les glaces du Groënland ou de l'Antarctique. La concentration relative de méthane est ainsi trouvée constante (0,7 ppmv) jusqu'en 1700 puis croît ensuite de façon quasi-exponentielle au cours des 300 dernières années. Cette augmentation est remarquablement corrélée avec celle de la population humaine ce qui semble indiquer qu'elle est directement liée aux activités anthropiques, principalement agricoles.

Le méthane est naturellement produit à partir de l'activité microbienne dans des conditions anaérobiques, par minéralisation de la matière organique en l'absence d'oxygène. Cette production correspond aux sols recouverts d'eau, aux rizières, aux marécages, et également aux intestins des animaux herbivores. Elle est donc aussi bien d'origine naturelle qu'anthropique. D'autres sources sont elles directement liées aux activités humaines : exploitation du gaz naturel et des mines de charbon, combustion de la biomasse, émission dans les décharges.

Ces sources de méthane sont équilibrées par deux puits principaux : un puits chimique qui correspond à l'oxydation photochimique du méthane par le radical hydroxyle OH dans la troposphère et la stratosphère et un puits biologique lié à la décomposition par les micro-organismes. Le tableau suivant résume les estimations les plus récentes des sources et puits du méthane dans l'atmosphère, exprimées en millions de tonnes par an (MT ou mégatonnes). Il s'agit donc de valeurs moyennes qui correspondent à des sources étendues intégrées dans le temps et dans l'espace, et qui sont associées à des domaines d'incertitude qui prennent en compte les nombreux facteurs - température, humidité, contenu en engrais. - dont dépend l'intensité des émissions.

Emission annuelle (MT/an)

	Valeur moyenne	Domaine d'incertitude
<u>Sources</u>		
Surfaces inondées naturelles	115	100-200
Rizières	110	25-170
Fermentation entérique (animaux)	80	65-100
Exploitation du gaz naturel	45	25- 50
Combustion de la biomasse	40	20- 80
Termites	40	10-100
Décharges	40	20- 70
Exploitation minière	35	17- 50
Océans	10	5- 20
Eaux douces	5	1- 25
Décomposition des composés hydratés	5	0-100
<u>Total des sources</u>	525	400-800
<u>Puits</u>		
Réaction avec OH	500	400-600
Décomposition dans les sols	25	10-100
<u>Total des puits</u>	525	410-700
<u>Augmentation dans l'atmosphère</u>	44	40-48

Si les ordres de grandeur nécessaires à l'obtention d'un bilan équilibré sont effectivement atteints, une marge importante d'incertitude subsiste encore. L'impact des activités humaines, en particulier agricoles (ruminants, rizières, combustion de la biomasse), est mis en évidence par une augmentation de plus de 50 % de ces émissions anthropogéniques au cours des cinquante dernières années.

La masse totale de méthane dans l'atmosphère est de 4400 MT. Une émission annuelle de l'ordre de 525 MT correspond alors à environ 12% du contenu total méthane de l'atmosphère et l'augmentation annuelle dans l'atmosphère de 0.9% à 44 MT. Ceci implique un temps de résidence moyen du méthane dans l'atmosphère de l'ordre de 10 ± 2 ans.

Protoxyde d'azote

L'augmentation du protoxyde d'azote dans l'atmosphère est sensiblement plus faible que celle du méthane puisqu'elle n'a été en moyenne que de 0.2 à 0.3 % par an entre 1977 et 1989. La concentration relative moyenne observée est de 310 ppbv soit une masse totale dans l'atmosphère de 1500 MT. La source naturelle de N₂O est principalement liée à l'action des micro-organismes dans les sols et l'eau. Deux processus doivent être pris en compte :

- la dénitrification c'est-à-dire la réduction des nitrates par la matière organique dans des conditions anaérobiques. Ces processus ont lieu essentiellement dans un environnement riche en éléments oxydables: sédiments riches en matière organique, surfaces inondées, bassins océaniques fermés.

- la nitrification résultant de l'oxydation de la matière organique ou des composés azotés réduits présents dans les engrais. Il s'agit d'une étape primordiale dans la dégradation aérobie (en présence d'oxygène) des déchets organiques aussi bien dans les sols que dans les océans.

L'utilisation extensive des engrais conduit aujourd'hui à une augmentation des taux d'émission de N₂O, bien que seule une faible partie de l'azote contenu dans les engrais (= 1 à 2 %) soit effectivement convertie en protoxyde d'azote. Le protoxyde d'azote est également produit par d'autres activités anthropiques liées à la combustion de la biomasse ou des fuels fossiles. La destruction du protoxyde d'azote est principalement due à l'oxydation dans la stratosphère pour un total d'environ 14 MT. Une faible partie est également réabsorbée par les

sols et les océans (= 2 MT), le reste correspondant à l'augmentation observée dans l'atmosphère. Le tableau suivant résume les différents termes du bilan exprimés en MT par an.

<u>Source</u>	Emission (MT/an)
Océan/Eaux claires	2.2 - 4.1
Sols (forêts tropicales)	3.4 - 5.8
Sols (forêts tempérées)	1.1 - 2.3
Engrais	0.6 - 3.4
Combustion des fuels fossiles	0.3 - 0.5
Combustion de la biomasse	0.4
<u>Total des sources</u>	8.0 - 16.5
 <u>Puits</u>	
Décomposition dans les sols	2 - 3
Oxydation dans la stratosphère	11- 20
<u>Total des puits</u>	13 - 23
<u>Augmentation dans l'atmosphère</u>	3 - 4.5

On constate ainsi que les émissions anthropiques représentent aujourd'hui entre 30 % et 45 % de la production totale. Celle-ci (= 13 MT) ne représente que 0.8% du contenu total atmosphérique, et le temps de résidence de N₂O dans l'atmosphère est de 150 ans. Compte tenu de la valeur élevée de ce temps de résidence, le protoxyde d'azote est actuellement hors d'équilibre dans l'atmosphère et les émissions globales sont supérieures de 30% aux puits. Même si les émissions restaient constantes au cours des décennies à venir, la concentration relative en protoxyde d'azote continuerait donc à augmenter pour atteindre une valeur de l'ordre de 400 ppmv, correspondant bien à une augmentation relative de 30 % par rapport aux valeurs actuelles.

Constituants organo-halogénés

Les constituants organo-halogénés, et parmi eux principalement les chlorofluorocarbures, font aujourd'hui figure d'accusé principal dans le problème de la diminution éventuelle de la couche d'ozone sous l'influence des activités humaines. Ils constituent un sous-ensemble minoritaire es composés chlorés émis au niveau du sol. En effet, des océans aux volcans, c'est une masse totale de l'ordre de 210 millions de tonnes d'équivalent chlore qui est émise chaque année dans l'atmosphère. Mais à la différence du protoxyde d'azote et, pour une large part du méthane, la troposphère joue ici le rôle de filtre et réduit pratiquement à zéro la composante naturelle de la source stratosphérique de chlore.

Les océans contiennent une grande quantité de sels dissous et notamment de chlorures de différents métaux comme le sodium, le calcium, le potassium ou le magnésium. L'interface entre l'océan et l'atmosphère est le siège d'échanges permanents de matière, qui se traduisent soit par la dissolution dans les eaux de surface de gaz ou de particules présents dans l'atmosphère, soit par l'émission vers l'atmosphère des minéraux présents dans la mer. Ainsi chaque année environ 200 MT de chlore moléculaire Cl₂ et d'acide chlorhydrique HCl sont émises par les océans dans l'atmosphère. Ces deux constituants étant solubles dans l'eau, leur durée de vie dans l'atmosphère n'excède pas une dizaine de jours, durée caractéristique du cycle de l'eau. Compte tenu d'un temps de diffusion de l'ordre de dix ans pour atteindre la stratosphère, seuls quelques fractions de millièmes de cette émission atteindront à terme la stratosphère.

Le même raisonnement s'applique à la source volcanique qui correspond à une émission journalière d'environ 20 000 tonnes d'acide chlorhydrique. La production annuelle par les volcans est ainsi estimée à 10 MT en moyenne globale. Essentiellement troposphérique, elle ne peut constituer une source stratosphérique que lors d'explosions cataclysmales susceptibles d'éjecter matériaux et gaz jusqu'à des altitudes de l'ordre de 15 à 20 kilomètres. De telles éruptions se produisent plusieurs fois par siècle et depuis cent ans les principales ont été celles du Krakatoa en 1883, du Mont Agung en Indonésie en 1963, du Fuego au Guatemala en 1974 et tout récemment du volcan El Chichon au Mexique en 1982. Localisées dans le temps et dans l'espace, sporadiques par nature de telles sources influencent certainement à l'échelle de quelques mois les équilibres stratosphériques. Ainsi l'éruption du volcan El Chichon, certainement la plus intense de ces dernières décennies, a injecté dans la stratosphère environ 100 000 tonnes d'acide chlorhydrique. Moyennée sur une année, cette contribution ne représente en fait à l'échelle globale que moins de 1 pour cent de la contribution totale des émissions anthropiques de constituants chlorés.

Les seuls constituants organo-halogénés d'origine naturelle dont la durée de vie dans la troposphère est suffisamment longue pour constituer une source appréciable de chlore stratosphérique sont produits dans les régions photosynthétiquement actives des océans par réaction entre les ions chlore, iode ou brome contenus dans l'eau de mer et les espèces soufrées réduites produites par les algues dans les premières dizaines de mètres de l'océan. Ces composés sont essentiellement le chlorure, l'iodure et le bromure de méthyle, dérivés substitués du méthane de formule chimique CH_3Cl , CH_3I et CH_3Br . L'intensité de cette source océanique est de l'ordre de 5 millions de tonnes par an pour le chlorure de méthyle, dont la durée de vie dans la troposphère est de 1.5 ans. La teneur moyenne du chlorure de méthyle dans l'atmosphère est alors de 0.60 ppbv (600 pptv). Cette valeur n'a pas varié au cours des dix dernières années comme le montrent les mesures effectuées au niveau du sol par les stations de mesure du réseau de surveillance des constituants chlorés, disséminées en différents points du globe, loin des régions de production.

A ces émissions naturelles, se superpose depuis environ cinquante ans, une production industrielle de composés organiques halogénés, les chlorofluorocarbures (aussi appelés chlorofluorocarbones). La croissance rapide de leur production tient à leur très grande stabilité chimique et donc à leur absence de toxicité au niveau du sol. Cette absence de réactivité se traduit par une durée de vie très longue dans la troposphère, de l'ordre de plusieurs dizaines d'années. Tous ces constituants diffusent à terme vers la stratosphère, où du fait du rayonnement solaire intense, ils vont libérer le chlore actif et contribuer ainsi à l'augmentation du chlore total contenu dans la stratosphère.

Les chlorofluorocarbures dérivent par substitution d'atomes de chlore, Cl, de fluor, F, ou d'hydrogène, H, des hydrocarbures saturés comme le méthane ou l'éthane ou non saturés comme l'éthylène ou le propène. Leur formule chimique est donc généralement de la forme $\text{C}_a\text{H}_b\text{Cl}_c\text{F}_d$ et l'on a pris l'habitude de les désigner par un système universel de numérotation à trois chiffres, proposé initialement par la Société Du Pont de Nemours, qui permet d'identifier facilement les espèces contenues dans chacun de ces chlorofluorocarbures ou CFC.

Plusieurs sources statistiques officielles permettent d'évaluer production et consommation des CFC à travers le monde. Les chiffres les plus directement utilisables sont ceux fournis par la Chemical Manufacturers Association qui regroupe l'ensemble des vingt principaux producteurs appartenant aux Etats-Unis, au Canada, à l'Amérique Latine, à l'Australie, au Japon et à l'Europe de l'Ouest. Ces données excluent les pays communistes et concernent presque exclusivement les CFC 11, CFC 13, et CFC 12, CF_2Cl_2 , qui représentaient encore, en 1985, 70% de la production mondiale.

Développés au début des années 1930 par la General Motors aux Etats-Unis, la production des CFC ne démarre vraiment qu'après la deuxième guerre mondiale. De 1945 à 1974 la production croît au rythme annuel de 13% par an pour atteindre un volume de production mondiale de 370 000 tonnes pour le CFC 11 et 443 000 tonnes pour le CFC 12 soit au total 813 000 tonnes. Cette production record correspond à des utilisations très diverses liées essentiellement aux propriétés physiques de ces constituants : ininflammabilité, faible toxicité, stabilité thermique, miscibilité avec l'eau et l'huile, pouvoir solvant et compatibilité avec de nombreux métaux et plastiques. Ils trouvent ainsi des applications dans des domaines aussi variés que les aérosols, les mousses synthétiques, la réfrigération et la climatisation, les solvants et les extincteurs. Jusqu'à la fin des années 1970 le débouché essentiel est l'industrie des aérosols qui représente encore aujourd'hui près d'un tiers de la production. On en rencontre dans tous les types d'aérosols, cosmétiques, déodorants, laques (58%), produits ménagers, insecticides, désodorisants (24%) ou produits industriels et pharmaceutiques (13%). Les CFC et notamment les CFC 11, CFC 12 et HCFC 22 jouent le rôle d'agent propulseur et une bombe aérosol en contient en moyenne 40%.

La seconde utilisation par ordre d'importance, concerne les mousses synthétiques, polyuréthane, polystyrène, polyéthylène auxquelles les CFC 11, CFC 12 et CFC 114 confèrent des propriétés isolantes particulièrement recherchées. Celles-ci sont de plus en plus utilisées dans l'isolation des bâtiments, l'emballage, l'industrie automobile. Elles absorbent environ un tiers de la production.

Le troisième volet concerne la réfrigération et la climatisation. Les CFC 11, CFC 12, HCFC 22, CFC 113 et CFC 114 sont utilisés comme réfrigérants dans les grandes installations frigorifiques mais aussi dans les réfrigérateurs individuels, où on les retrouve également dans les mousses synthétiques qui assurent l'isolement des réfrigérateurs. Signalons enfin leur utilisation comme solvant pour le nettoyage en particulier dans l'industrie électronique comme le CFC 113 liquide, et dans l'industrie de la stérilisation. Les halons, composés organo-bromés sont utilisés en tant qu'agents extincteurs gazeux depuis le début des années 1970.

Après 1974, la production des CFC marque le pas. Limites des débouchés, premiers effets des inquiétudes naissantes pour la couche d'ozone, conduisent à une diminution de 26% de la production en 1982 due principalement à la diminution de la production des aérosols. Mais de nouveaux débouchés sont trouvés pour les CFC 11 et CFC 12 et la production des autres chlorofluorocarbures comme les CFC 113 et CFC 114, augmente rapidement. En 1986, la production annuelle atteint à nouveau 86% de celle de 1974, soit 700 000 tonnes pour les CFC 11 et CFC 12. Dans le même temps la production des CFC 113 et CFC 114 a plus que doublé passant de 23 000 tonnes en 1976 à 54 000 tonnes en 1986. Ces chiffres ne concernent que les

pays producteurs regroupés dans la Chemical Manufacturers Association. Une estimation pour 1985 incluant les pays d'Europe de l'Est et la Chine conduit au chiffre de 1,15 millions de tonnes pour l'ensemble de la production mondiale.

Les émissions vers l'atmosphère des CFC sont très diversifiées. Les premières pertes se produisent dès la production. L'émission peut ensuite avoir lieu au cours de la consommation même des biens comme dans le cas des bombes aérosols, du nettoyage industriel, des mousses flexibles pour lesquelles les CFC s'échappent dès la fabrication. Les CFC sont également incorporés de façon plus durable dans plusieurs biens de consommation : mousses rigides à cellules fermées utilisées dans l'isolation, fluides réfrigérants dans les systèmes de réfrigération ou d'air conditionné. Il en résulte alors un certain délai, directement lié à la durée de vie des biens de consommation, entre le moment où un CFC est produit et l'instant de son émission dans l'atmosphère, qui se chiffre en années.

Pour les principaux CFC, la durée de vie dans la troposphère varie de 58 ans pour le CFC 11 à 100 ans pour le CFC 12, 98 ans pour le CFC 113, 250 ans pour le CFC 114, 520 ans pour le CFC 115. D'après les chiffres de la Chemical Manufacturers Association, la production cumulée des CFC 11 et CFC 12 entre 1931 et 1985 représente 14,9 millions de tonnes, produites à 95% dans l'hémisphère Nord. Mais cette répartition géographique, qui ne correspond d'ailleurs pas nécessairement à celle des émissions n'a que peu d'importance car l'atmosphère s'homogénéise en quelques années. Les concentrations relatives observées aujourd'hui traduisent directement cette accumulation à l'échelle globale : 0,2 ppbv pour le CFC 11, 0,32 ppbv pour le CFC 12, les valeurs pour les autres CFC restant inférieures à 0,1 ppbv et reflétant directement les rapports des quantités produites.

Si par contre les chlorofluorocarbures contiennent un atome d'hydrogène leur durée de vie dans la troposphère est beaucoup plus courte, inférieure en général à 20 ans. Ces constituants, ou HCFC et HFC, ont en effet la propriété de réagir chimiquement avec le radical hydroxyde OH et d'être ainsi détruits chimiquement dans la troposphère. Actuellement le principal HCFC est le chloro-difluorométhane (HCFC 22), utilisé principalement comme agent réfrigérant. Sa durée de vie n'est que de vingt ans. Cette propriété d'oxydation rapide par OH sera largement utilisée dans le futur puisqu'elle ouvre une des principales voies d'étude des produits de substitution susceptibles de remplacer à terme les CFC.

Enfin les chlorofluorocarbures ne sont pas les seuls constituants chlorés produits industriellement. Deux composés méritent d'être signalés car leur production et donc leur concentration relative dans l'atmosphère sont loin d'être négligeables par rapport à celle des CFC. Le tétrachlorure de carbone CCl_4 est un composé intermédiaire pour la fabrication des

CFC. Sa production annuelle est de 830 000 tonnes. Associée à une durée de vie de l'ordre de 50 ans, elle conduit à une teneur atmosphérique de 0,14 milliardièmes. Le trichloroéthane CH_3CCl_3 , ou méthylchloroforme, est un solvant utilisé depuis le début des années 1960 pour le nettoyage des pièces mécaniques et plastiques, dans les colles et les peintures du fait de sa faible toxicité et de son caractère ininflammable. Bien que sa durée de vie soit courte, de l'ordre de 6 ans, une production annuelle de 545 000 tonnes conduit à une concentration relative de 0,12 milliardièmes.

Au total, l'ensemble des chlorofluorocarbures conduit aujourd'hui à une concentration relative totale en constituants chlorés dans l'atmosphère double de celle du chlorure de méthyle. Les activités humaines ont donc d'ores et déjà modifié de façon importante le contenu en chlore de la stratosphère puisque tous ces constituants vont à plus ou moins long terme diffuser vers les hautes altitudes. Cette augmentation résulte essentiellement des quantités produites et émises dans les dernières années. Pour un rythme de croissance moyen de l'ordre de 6 à 7%, les émissions doublent en 11 ans; si ce rythme atteint 10%, elles doublent en 7 ans. De plus comme dans le cas du protoxyde d'azote, l'équilibre n'est certainement pas atteint et donc, même en cas de blocage ou de réduction de ces émissions, les concentrations relatives continuent à augmenter avant de se stabiliser ou de décroître. La concentration relative des constituants chlorés susceptibles de diffuser vers la stratosphère a donc augmenté depuis l'époque préindustrielle. La teneur en chlore correspondait alors au seul chlorure de méthyle soit 0,6 milliardièmes. En sommant tous les atomes de chlore susceptibles d'être libérés dans la stratosphère par la dissociation des constituants organo-chlorés, le contenu en "équivalent chlore" de la stratosphère atteint aujourd'hui 3 milliardièmes, soit cinq fois la valeur préindustrielle. Ce résultat prend en compte aussi bien les sources troposphériques à leur niveau actuel, que tout le chlore déjà libéré aux cours des années passées et qui est entré dans les chaînes catalytiques de destruction de l'ozone. Il ne représente d'ailleurs, en 1988, que 20 % de la quantité totale émise depuis quarante ans.

Le tableau ci-dessous résume les teneurs relatives, les taux annuels d'augmentation et les durées de vie des principaux constituants organo-chlorés.

Constituant	Teneur relative (pptv)	Taux d'augmentation		Durée de vie (années)
		pptv	%	
CH ₃ Cl	600			1.5
CH ₃ Br	10-15			1.5
CFC13 (CFC-11)	280	9.5	4	60
CF ₂ Cl ₂ (CFC-12)	484	16.5	4	120
CF ₃ Cl (CFC-13)	5			400
C ₂ F ₃ Cl ₃ (CFC-113)	60	4 - 5	10	90
C ₂ F ₄ Cl ₂ (CFC-114)	15			200
C ₂ F ₅ Cl (CFC-115)	5			400
CCl ₄	146	2	1.5	50
CHF ₂ Cl (HCFC-22)	122	7	7	15.3
CH ₃ CCl ₃	158	6	4	6.3
CBrClF ₂ (halon 1211)	1.7	0.2	12	25
CBrF ₃ (halon 1301)	2	0.3	15	110

Tendances à long terme : évolution des concentrations

Pour étudier de façon quantitative précise les effets des constituants atmosphériques sources, il est nécessaire d'estimer l'augmentation prévisible de la concentration de ces gaz au cours des cinquante à cent prochaines années. Ces projections ont bien évidemment une grande marge d'incertitude qui tient, d'une part aux limites de notre connaissance actuelle des processus qui gouvernent le cycle de ces constituants, d'autre part à la difficulté de prédire l'évolution des principales activités industrielles et agricoles à l'échelle de la planète. Les scénarii doivent donc être considérés comme une première approche de la sensibilité de l'environnement terrestre aux perturbations anthropiques. Quelques règles simples peuvent être formulées quant à l'estimation de la concentration future des constituants tels que le méthane, le protoxyde d'azote et les composés organo-halogénés:

- les constituants dont la durée de vie est courte, inférieure à dix ans, atteindront rapidement une concentration d'équilibre pratiquement proportionnelle à leur taux d'émission. Ce sera le cas pour le méthane.

- pour les constituants dont la durée de vie est longue, plusieurs décennies à plusieurs siècles, l'accumulation dans l'atmosphère prime et c'est cette fois le taux d'augmentation qui est proportionnel au taux d'émission. C'est le cas du protoxyde d'azote et des chlorofluorocarbures.

Les effets sur la couche d'ozone et les équilibres climatiques ne sont pas simplement proportionnels aux valeurs des concentrations observées pour les espèces sources, et des effets d'amplification très rapide peuvent se produire si les concentrations de ces espèces prises en valeur relative les unes par rapport aux autres dépassent certains seuils. Il est donc utile de définir un scénario de référence qui fixe pour l'ensemble de ces constituants l'évolution des concentrations futures. Il ne s'agit en aucun cas d'une prédiction de la composition chimique future de l'atmosphère, mais simplement de fixer une fourchette de valeurs qui prenne en compte les incertitudes sur les extrapolations. Le tableau suivant résume ces valeurs de référence. Il prend en compte pour les constituants non soumis à une réglementation internationale, un taux d'accroissement compatible avec le rythme d'augmentation observé aujourd'hui dans l'atmosphère - CO₂, CH₄, N₂O, CCl₄, CH₃CCl₃, HCFC 22 -. Pour les constituants soumis à une réglementation par le Protocole de Montréal - CFC 11, CFC 12, CFC 113, CFC 114, CFC 115, halon 1211, halon 1301, halon 2402 - les flux d'émission sont maintenus constants, égaux à leur valeur de 1985.

Constituants	Valeurs de 1985		Taux d'augmentation	
	Teneur relative	Flux d'émission (milliers de tonnes)	% par an (1985)	pptv par an
CO2	345 ppmv		0.4	
CH4	1600 ppbv		0.9	15 ppbv
N2O	306 -		0.25	
			0	0
CFC 11	220 pptv	350	0	0
CFC 12	375 -	450	0	0
CFC-113	30 -	150	0	0
CFC-114	5 -	15	0	0
CFC-115	4 -	5	0	0
HCFC 22	80 -	140	5	1
halon 1211	1.5 -	5	0	0
halon 1301	1.7 -	8	0	0
CCl4	100 -		1	1
CH3CCl3	130 -		3	4
CH3Cl	600 -		0	0
CH3Br	10 -		0	0

4. LES CFC FACTEUR DE DESEQUILIBRE DE L'ATMOSPHERE

Du fait de l'augmentation de la concentration des CFC, la charge totale en chlore de la stratosphère est passée de 0.6 ppbv durant l'ère pré-industrielle à 3 ppbv en 1985. Les modèles de simulation photochimique laissaient entrevoir dans ces conditions une réduction de la concentration d'ozone vers 40 km d'altitude, entraînant sous nos latitudes une diminution de l'ozone total de 0.5 à 1.2% pour les mois d'hiver et de 0.3 à 0.6% pour les mois d'été. Ce n'est pas ce qui est observé. Prenant à contre-pied toutes les prédictions, c'est en région polaire et au printemps que la destruction d'ozone la plus significative est apparue avec une amplitude de un à deux ordres de grandeur supérieure aux prévisions, puisqu'elle peut atteindre localement 50%. Phénomène lié à l'augmentation des chlores comme cela a été immédiatement proposé ou d'une autre nature? Sa conséquence la plus immédiate a été de démontrer l'existence d'une chimie inconnue jusqu'alors dans l'atmosphère constituée de réactions entre les espèces gazeuses minoritaires et des particules, gouttes et cristaux d'eau liquide ou solide dans les quelles les molécules gazeuses peuvent se trouver adsorbées ou dissoutes.

Nous exposerons pas à pas les termes du débat qui conduit à attribuer ce nouveau mode de destruction de l'ozone aux CFC avant de dresser un état des tendances à l'évolution de l'ozone à toutes les latitudes fondé sur l'ensemble des observations depuis le sol ou en orbite, qui met en évidence la contribution majeure du mécanisme polaire à l'évolution globale.

La deuxième conséquence de l'augmentation de la concentration des CFC est leur contribution à l'effet de serre. On sait aujourd'hui que l'atmosphère terrestre est de 0.8° à 1°C plus chaude qu'il y a un peu plus d'un siècle c'est à dire à l'ère pré-industrielle et que de façon concomitante la teneur des gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O et CFC) augmente. On sait aussi aujourd'hui que bien que les simulations montrent une relation entre l'un et l'autre et par conséquent une menace pour le futur, il n'est pas possible d'attribuer sans ambiguïté l'échauffement observé à un effet de serre d'origine anthropogénique. Nous examinerons l'importance relative des CFC dans ce mécanisme et par là même, le risque pour de dérive climatique que l'augmentation de leur teneur pourrait entraîner.

Destruction de l'ozone polaire

Alors que les modèles de simulation de la photochimie stratosphérique laissaient entrevoir depuis 1974 une destruction locale et lente (un à deux pour-cents au plus sur dix ans) de l'ozone à haute altitude aux moyennes latitudes, c'est aux pôles et dans la basse stratosphère

que s'est manifesté brutalement un phénomène nouveau et totalement imprévu: la destruction de l'ozone au printemps à une cadence beaucoup plus rapide puisqu'elle peut atteindre 1 à 2% par jour. La découverte de ce phénomène a eu pour conséquence la découverte de la présence dans l'atmosphère d'une chimie dite hétérogène faite de réactions entre les gaz et les particules, gouttes liquides ou cristaux solides. Bien que des progrès rapides aient été obtenus dans la compréhension de la chimie de l'ozone polaire, les conséquences de l'apparition de cette chimie hétérogène sur l'atmosphère à toutes latitudes, y compris en région équatoriale où la température peut être aussi basse qu'aux pôles et dans la troposphère dans les nuages liquides ou solides, sont encore loin d'être totalement appréhendées.

Pour nous en tenir à la destruction de l'ozone polaire, nous passerons en revue les faits expérimentaux établis avant d'en exposer l'interprétation actuelle et d'expliquer pourquoi l'augmentation des CFC en est bien à l'origine.

Le trou d'ozone en Antarctique

Le trou d'ozone printanier est un phénomène récent qui n'est apparu qu'au début des années 1980 dans les observations d'ozone total depuis le sol en Antarctique à Halley Bay (GB) et à Syowa (Japon) bien que celles-ci aient été poursuivies de façon continues depuis l'année 1957, c'est à dire l'année Géophysique Internationale. Il se manifeste par une réduction de la colonne d'ozone au printemps austral de Septembre à Novembre. Bien qu'une certaine modulation sur deux ou trois ans soit observée, vraisemblablement liée à un cycle connu de 26 mois de la dynamique de la stratosphère, l'amplitude du phénomène croît rapidement avec le temps. En 1989 à Halley Bay on observait au mois d'octobre une colonne d'ozone réduite à 160 Unités Dobson (UD) au lieu de 300 UD en moyenne de 1957 à 1972 (Figure 4-1).

Depuis, de nombreuses observations sont venues confirmer et compléter ces premières découvertes. Les données de l'instrument satellitaire TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer à bord du satellite américain Nimbus 7) délaissées dans un premier temps en régions polaires parce que difficiles à interpréter à faible élévation du soleil, ont été retraitées. Elles ont permis de dresser des cartes d'ozone (Figure 4-2) montrant soit un trou couvrant l'ensemble du continent Antarctique (environ 7.5 % de la surface de l'hémisphère Sud en 1989) à partir de la fin du mois d'Août date des premières mesures possibles, jusqu'au moment du réchauffement stratosphérique final en Novembre ou Décembre suivant les années, soit comme en 1988 des "mini trous" transitants lentement autour du continent. Les observations depuis le sol à Dumont d'Urville conduites depuis 1988 à l'aide d'une nouvelle technique de mesure par absorption dans le domaine visible, les seules existantes en hiver, ont montré que le phénomène

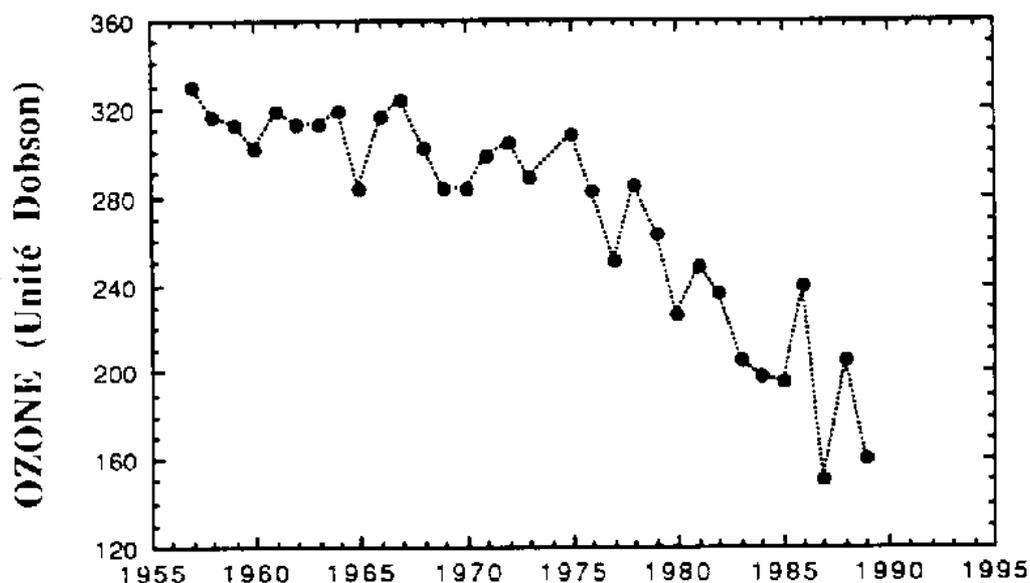


Figure 4-1. - Colonne totale moyenne d'ozone observée au mois d'octobre au-dessus de la station britannique de Halley Bay (76°S) en Antarctique depuis 1957 à l'aide d'un spectrophotomètre Dobson. A partir de la fin des années 70, l'ozone décroît régulièrement pour atteindre les valeurs records de 150 à 160 Unités Dobson en 1987 et 1989 au lieu de 300 UD en moyenne entre 1957 et 1972. Les variations d'une année sur l'autre seraient le reflet de fluctuations de la circulation générale en particulier du cycle bien connu en région équatoriale de 26 mois de période (adaptation d'après J. Farman et al, 1985, British Antarctic Survey).

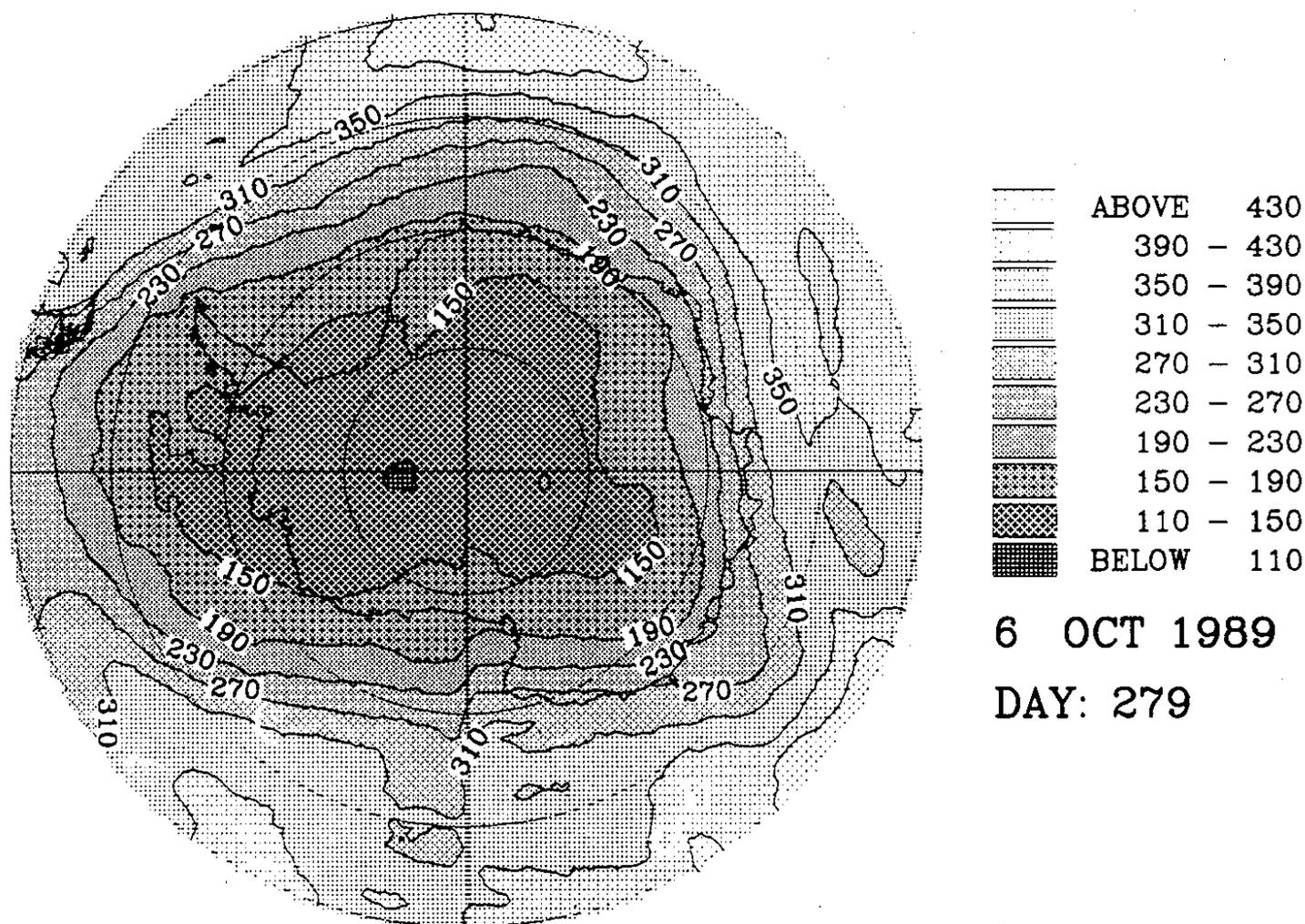


Figure 4-2. - Carte du trou d'ozone Antarctique observé par TOMS le 6 Octobre 1989 lors de son maximum d'extension géographique. La valeur minimale de la colonne d'ozone au voisinage du pôle Sud est de 110 Unité Dobson (Données TOMS transmises par le World Data Center et traitées par le Service d'Aéronomie du CNRS).

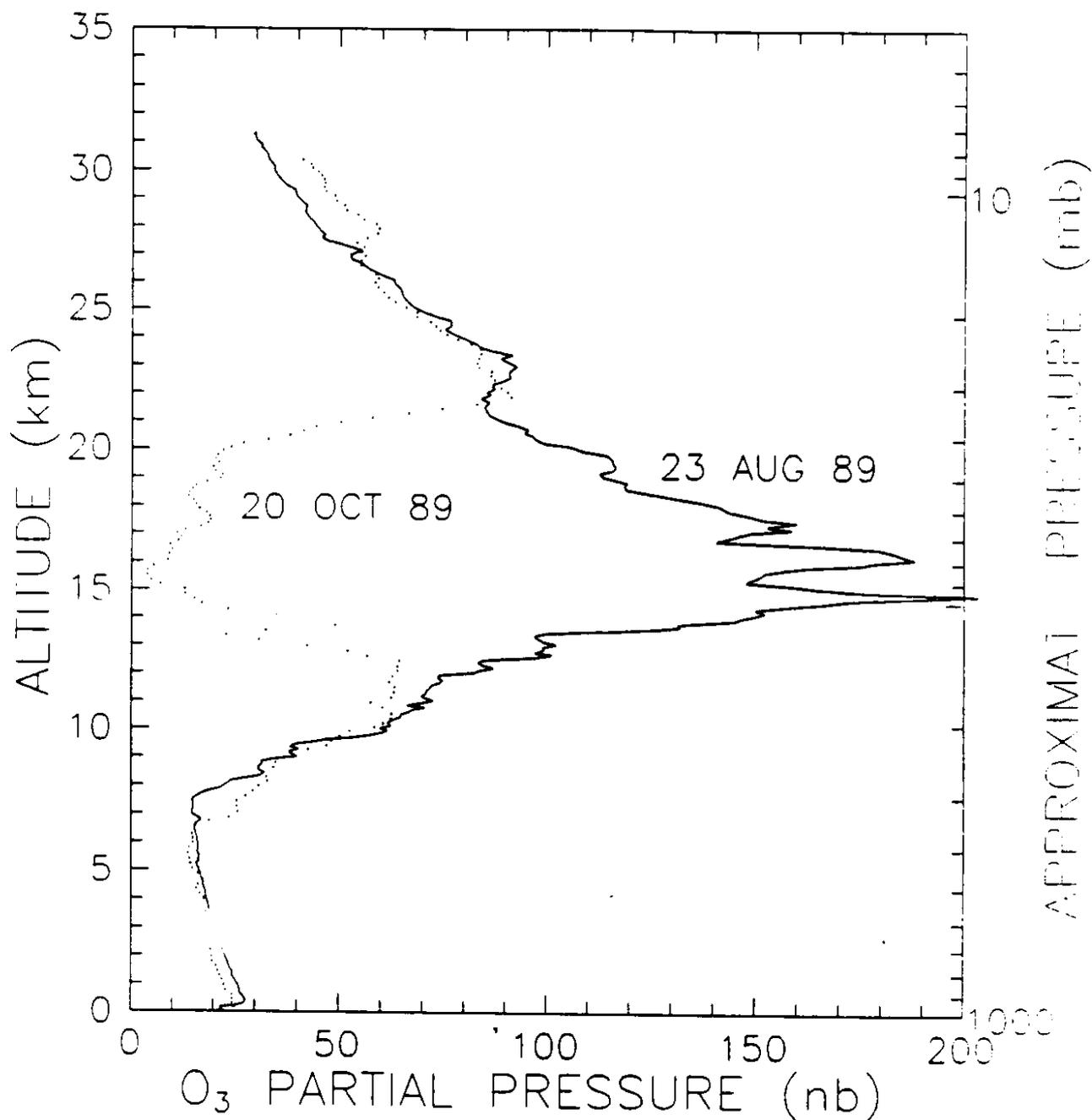


Figure 4-3. - Distributions verticales de l'ozone mesurées par radio-sondages les 23 août et 20 octobre 1989 à McMurdo (74°S) en Antarctique. En hiver la concentration d'ozone est maximale vers 15 à 18 km. Au printemps après l'apparition du soleil, l'ozone est rapidement détruit entre 12 et 22 km altitude c'est à dire dans la tranche d'altitude la plus froide de la stratosphère, mais demeure pratiquement inchangé au dessus et en dessous. Vers 16 km, la concentration d'ozone est voisine de zéro. Une réduction ultérieure de la colonne totale ne peut donc provenir que d'une extension verticale du domaine de destruction et non d'une accélération du mécanisme photochimique. (d'après T. Dessler et al., Geophys. Res. Lett., Février 1990)

apparaissait dès le mois de Juillet à la latitude du cercle polaire. De leur côté les sondages hebdomadaires en ballons pratiqués depuis 1987 à McMurdo et Amundsen Scott (USA) ont démontré que l'ozone était essentiellement détruit à une altitude comprise entre 12 et 22 km où en 1987 et 1989, il l'était totalement, la valeur résiduelle de la concentration dans cette tranche d'altitude étant voisine de zéro (Figure 4-3). La conséquence de ceci est qu'une éventuelle amplification du trou d'ozone en Antarctique au cours prochaines années ne pourrait plus venir que d'une extension en altitude ou horizontale du phénomène.

Parallèlement aux observations d'ozone, de nombreux autres paramètres, espèces chimiques et nuages stratosphériques, ont été mesurés soit depuis le sol, soit in-situ en avion au cours de la campagne américaine AAOE (Airborne Antarctic Ozone Expedition) en 1987. Les éléments les plus importants à retenir sont les suivants:

- Les concentrations en oxydes de l'azote ou NO_y , c'est à dire les espèces actives NO , NO_2 et NO_3 , les réservoirs N_2O_5 , ClONO_2 et l'espèce puits HNO_3 l'acide nitrique, sont relativement réduites dans le milieu confiné et obscur en hiver que représente la dépression ou vortex stratosphérique (figure 4-4);
- A l'inverse, les concentrations des chlores actifs (Cl , ClO et OCIO), c'est à dire capable de détruire l'ozone, y sont considérablement accrues dans la nuit polaire par rapport aux concentrations des latitudes moyennes, jusqu'à un facteur 500 (Figure 4-5a), alors que les espèces chlorées stables, HCl et HOCl , sont elles mêmes réduites. Au printemps, en présence de soleil, les régions à haute teneur en chlore actif s'identifient à celles où l'ozone est détruit (Figure 4-5b).
- En association avec les très basses températures de la stratosphère (jusqu'à -95°C), on observe la présence de nuages stratosphériques (PSC ou Polar Stratospheric Clouds) qui se présentent sous deux formes distinctes: a) des nappes de brume fine lorsque la température est inférieure à -78°C dont l'analyse a montré que les particules de quelques microns de diamètre étaient constituées d'une association d'une molécule d'acide nitrique pour trois molécules d'eau (Nitric Acid Trihydrate ou NAT); b) des nuages plus denses de particules de glace d'eau de 10 à 100 microns de diamètre lorsque la température devient inférieure à -88°C . Les premiers sont connus sous le nom de PSC de type I, les seconds de PSC de type II. Les observations satellitaires par occultation solaire, par définition uniquement dans les régions éclairées et les mesures depuis le sol par Lidar au Pôle Sud et à Dumont d'Urville, montrent que ces nuages sont présents dès le mois de Mai en Antarctique entre 15 et 22 km. Leur altitude décroît en moyenne au cours de l'hiver et ils disparaissent au printemps, au mois de Novembre ou exceptionnellement au tout début du mois de Décembre lors de l'échauffement stratosphérique final.

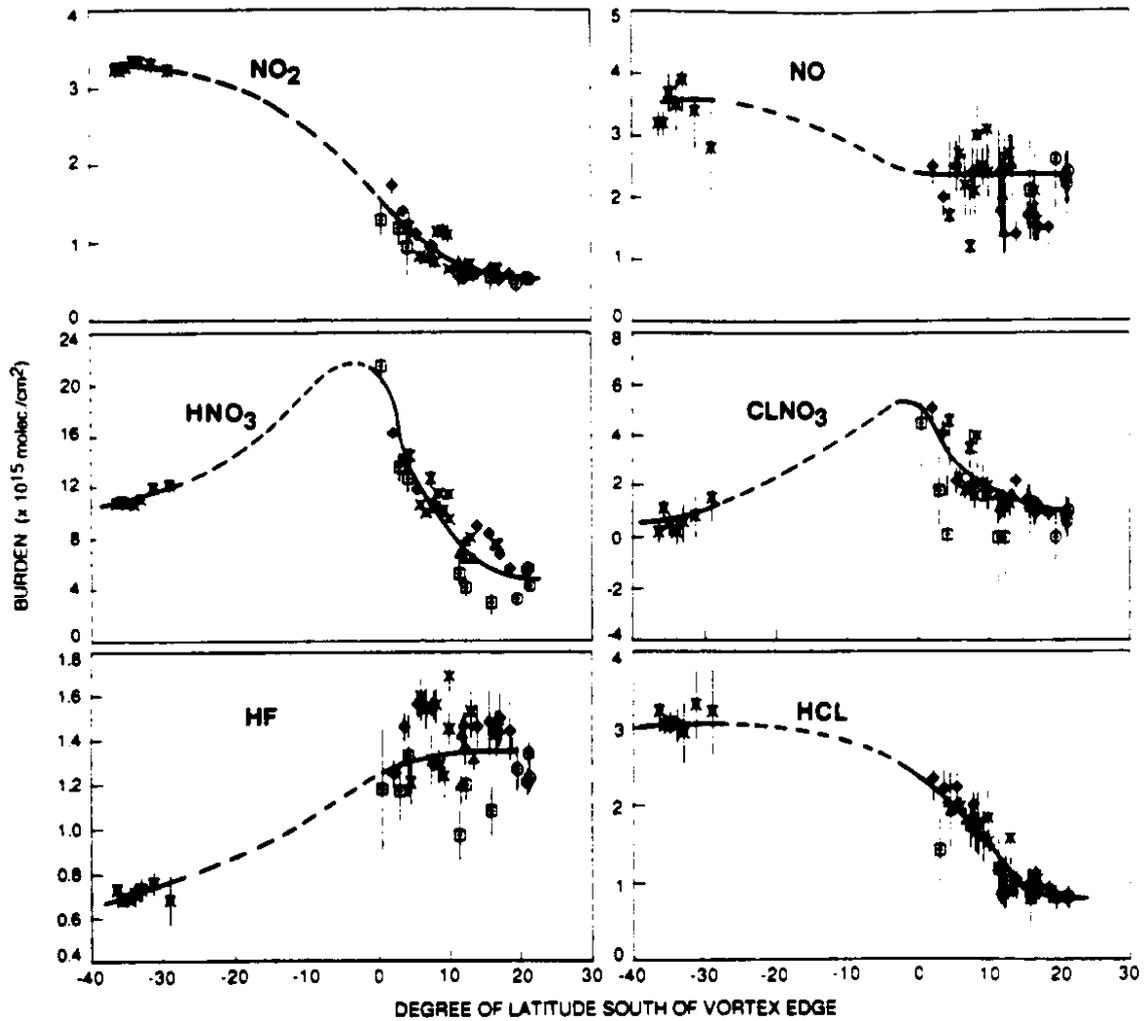


Figure 4-4. - Distributions en latitude des colonnes totales de NO, NO₂, HNO₃, ClNO₂, HCl et HF en fonction de la latitude par rapport au bord du vortex polaire (coté zéro en abscisse) en Antarctique en 1987. Au sein du vortex, les radicaux azotés (NO, NO₂ et ClNO₂) sont désactivés, les acides nitrique et chlorhydrique sont considérablement réduits par suite du piégeage du premier par les particules de glace des nuages stratosphériques et de sa transformation en d'autres espèces pour le second. L'acide fluorhydrique n'est pas affecté par ce phénomène. (d'après Toon et al, J. Geophys. Res., 16,584, 1989).

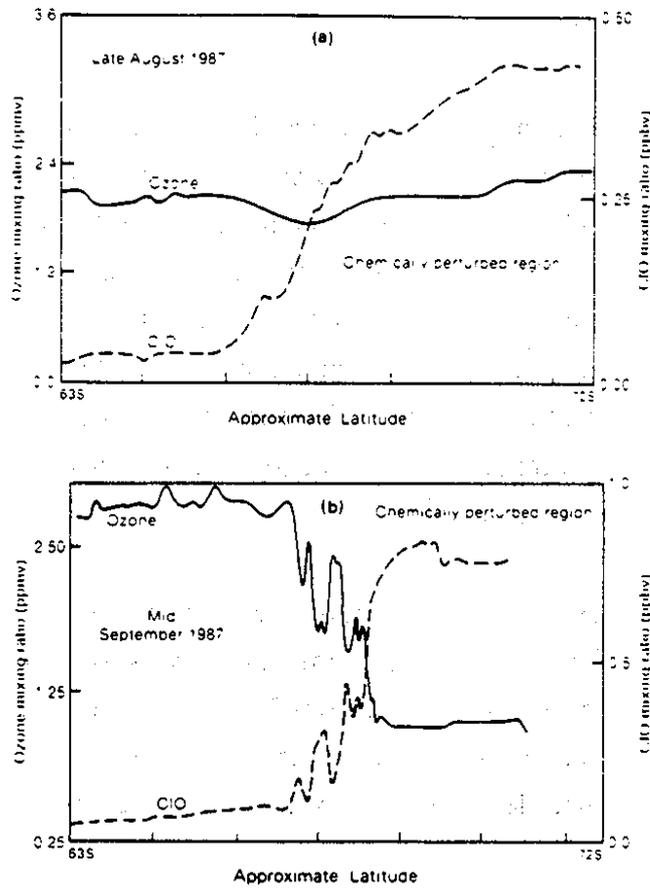


Figure 4-5. - Concentrations d'ozone et de monoxyde chlore ClO, mesurées à 18 km d'altitude entre 63°S et 72°S au cours de deux vols de l'avion ER-2 durant la campagne AAOE en 1987. A la fin du mois d'Août durant la nuit polaire, la concentration de ClO augmente brutalement lorsque l'avion pénètre dans le vortex polaire, où elle peut atteindre une valeur jusqu'à 500 fois supérieure à celle qui peut être observée aux latitudes moyennes. Lors de l'arrivée de la lumière solaire au milieu du mois de Septembre, l'ozone est rapidement détruit dans les régions où la concentration de ClO est élevée comme le montre l'anti-correlation des concentrations des deux constituants. (d'après J. G. Anderson et al, 1989)

L'Ozone en Arctique

Aucun trou stable et de large étendue n'a jamais été observé en Arctique, mais par contre des "mini trous" semblables à ceux qui ont été signalés en Antarctique et au sein des quels la colonne d'ozone peut être très faible (par exemple 165 Unités Dobson au dessus de la Scandinavie au mois de Février 1990).

Les mesures depuis le sol en Scandinavie et au Groenland ainsi que les observations en avion durant la campagne américaine AASE (Airborne Arctic Stratospheric Expedition) en 1989 et en ballons au cours des expériences Franco-Allemandes CHEOPS (Chemistry of the Polar Stratosphere) en 1987, 1988, 1989 et 1990, ont aboutit à la conclusion que les oxydes de l'azote étaient réduits alors que les composés chlorés et bromés étaient pour leur part activés, c'est à dire que la photochimie était identique aux deux pôles. De plus les observations en ballons et en fusées sondes, non praticables en Antarctique, ont montré que la concentration d'acide nitrique était localement réduite en présence de nuages stratosphériques alors que celle de la vapeur d'eau pouvait y devenir saturante.

Il faut ajouter que les nuages stratosphériques observés par satellite y sont moins fréquents que dans l'hémisphère sud et que la température y est de 8 à 10°C plus élevée en moyenne et surtout que la période de présence des PSC y est beaucoup plus brève puisque l'échauffement printanier final se produit en Janvier ou Février soit un à deux mois avant l'équinoxe dans le Nord au lieu de mi-Novembre à début-Décembre, soit deux mois après l'équinoxe dans le Sud.

Interprétation: le rôle des chlores

Dès leur découverte du trou Antarctique en 1985, les chercheurs du BAS (British Antarctic Survey) ont associé la destruction de l'ozone à l'augmentation des composés chlorés libérés par les CFC. Il faut bien constater que cette intuition n'a fait qu'être confirmée par l'ensemble des découvertes qui se sont rapidement succédées depuis: Tous les autres mécanismes alternatifs successivement proposés sont aujourd'hui infirmés par les faits.

- Un refroidissement éventuel de la stratosphère dont la conséquences aurait été une augmentation de la fréquence des PSC, n'a pas pu être mis en évidence ni dans les mesures de température ni dans celles de la fréquence d'apparition des nuages.

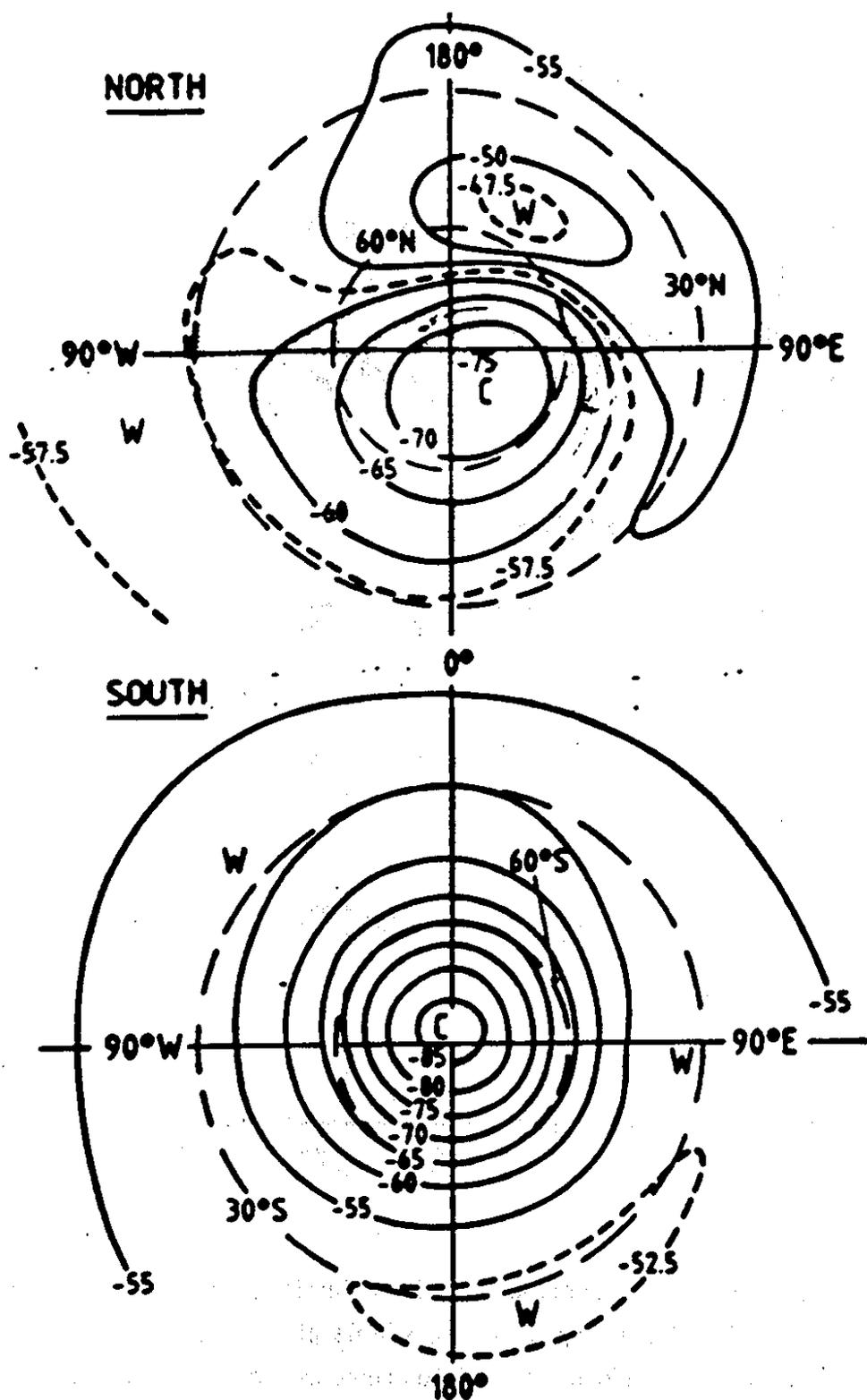


Figure 4-6. Champ de température stratosphérique à 20 km d'altitude en hiver en Arctique et en Antarctique. Au Sud (figure du bas) le minimum de pression ou vortex polaire stratosphérique, est généralement centré de façon stable au pôle jusqu'au réchauffement final de printemps qui n'intervient pas avant le milieu du mois de Novembre, c'est à dire deux mois après l'équinoxe de printemps. Au Nord (figure du haut), le vortex polaire se déplace rapidement pour parfois se scinder en deux. Des échauffements brusques ou explosifs tel que celui que l'on peut observer sur la figure (W: Warm) se produisent régulièrement de Novembre à Février. L'échauffement final peut se produire dès le mois de Janvier, rarement plus tard que la mi-Février c'est à dire un mois avant l'équinoxe de printemps.

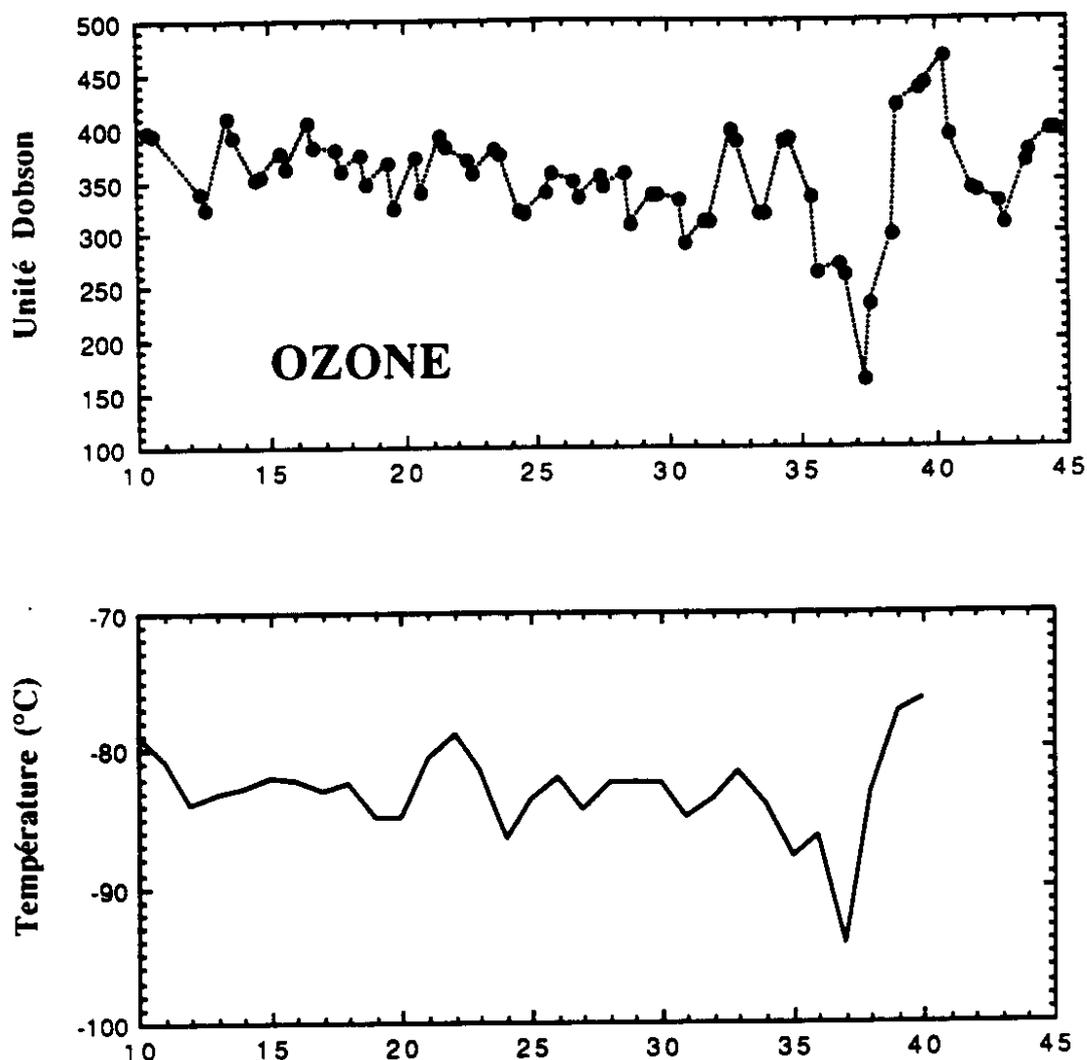


Figure 4-7. En Scandinavie au début du mois de Février 1990 durant la campagne Franco-Allemande CHEOPS III, un spectromètre visible placé à Kiruna observait une brutale décroissance de la colonne d'ozone jusqu'à 165 Unité Dobson c'est à dire une valeur de l'ordre de celle du trou d'ozone Antarctique. Au même moment vraisemblablement sous l'effet d'une onde orographique formée sur les montagnes de Norvège, la stratosphère se refroidissait de 10°C vers 25 km d'altitude et des nuages stratosphériques se formaient à tous les niveaux entre 12 et 25 km (Service d'Aéronomie du CNRS). Les observations des spectrophotomètres Dobson à Oslo et Norrköping à 10° plus au sud montraient que le trou d'ozone avait une extension supérieure à 1200 km.

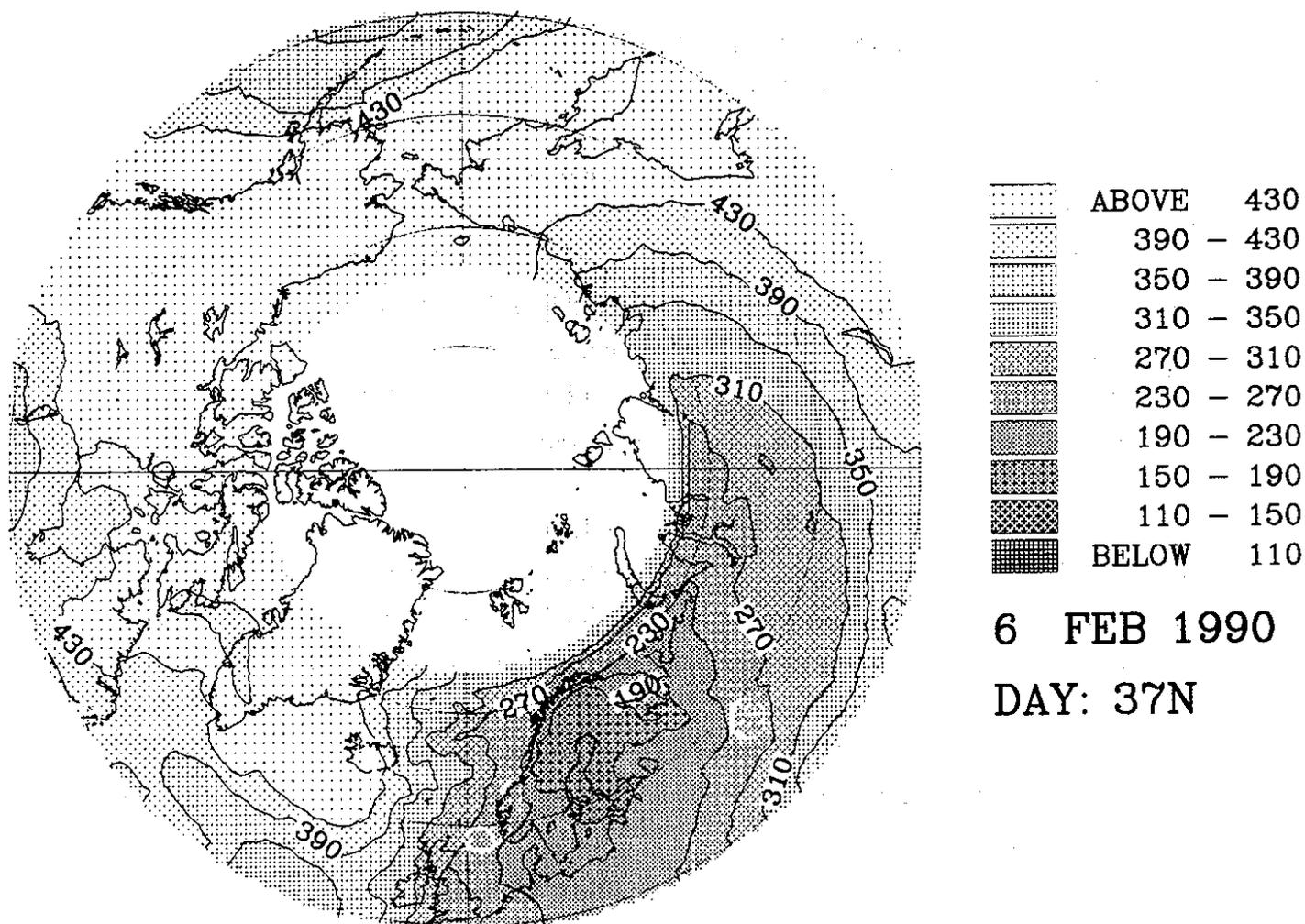


Figure 4-8. Les observations satellitaires TOMS disponibles au mois de Mai, confirment la formation rapide sur place d'un trou d'ozone totalement absent la veille dont une partie migrera vers l'Europe Occidentale pour atteindre la France le 8 Février avec une valeur minimum d'ozone de 220 UD c'est à dire du même ordre que le minimum observé à Dumont d'Urville en Antarctique au printemps (Données TOMS transmises par le World Data Center, traitées par le Service d'Aéronomie du CNRS).

- Un transport vers le haut en région polaire un instant proposé, qui aurait eu pour conséquence l'injection de masses d'air troposphériques pauvres en ozone, est infirmé par les mesures de distributions verticales d'espèces sources inactives du point de vue photochimique comme N₂O, CH₄ ou les CFC eux-mêmes, qui montrent qu'il s'agit plutôt de l'inverse, c'est à dire d'une descente lente. De plus les sondages indiquent que l'ozone est détruit limitativement dans une tranche d'altitude située entre 12 et 22 km, et qu'il est inchangé en-dessous et au-dessus.

- Une augmentation des oxydes de l'azote avec le temps entre-aperçue en comparant de façon illégitime les données de deux expériences satellitaires indépendantes et successives dans le temps, SAGE I et SAGE II, et qui était interprétée comme la signature des variations de l'activité solaire, est totalement abandonnée aujourd'hui. Huit années de mesures de NO₂ à l'aide d'un instrument unique en Nouvelle Zélande ont démontré que cette affirmation était inexacte. La réduction établie des NO_x dans le vortex polaire montrait de son côté que les oxydes d'azote ne pouvaient pas être tenus pour responsables de la destruction de l'ozone.

Seul le rôle des chlores résiste à l'analyse. Le mécanisme bien que comportant encore des zones d'ombre, notamment en ce qui concerne les vitesses de réactions, a pu être en grande partie reproduit en laboratoire et commence à être simulé de façon satisfaisante par des modèles. Il fait appel à la chimie hétérogène faite de réactions entre gaz et cristaux solides.

Les quatre réactions les plus importantes, identifiées en laboratoire dans les conditions de la stratosphère polaire en présence de particules de glace d'eau ou d'acide nitrique tri-hydraté et sur lesquelles sont fondées l'interprétation des observations, sont les suivantes:

- (1) $\text{HCl (sol)} + \text{ClONO}_2 \text{ (ads)} \rightarrow \text{Cl}_2 \text{ (g)} + \text{HNO}_3 \text{ (cristal)}$
- (2) $\text{HCl (sol)} + \text{N}_2\text{O}_5 \text{ (ads)} \rightarrow \text{ClNO}_2 \text{ (g)} + \text{HNO}_3 \text{ (cristal)}$
- (3) $\text{ClONO}_2 \text{ (sol)} + \text{H}_2\text{O (sol, ads)} \rightarrow \text{HOCl (g)} + \text{HNO}_3 \text{ (cristal)}$
- (4) $\text{N}_2\text{O}_5 \text{ (sol)} + \text{H}_2\text{O (sol, ads)} \rightarrow 2 \text{HNO}_3 \text{ (cristal)}$

où (sol), signifie que l'espèce est en solution dans le liquide ou le solide; (ads), que l'espèce est adsorbée sur la surface de glace; (g), qu'elle est sous forme gazeuse et (cristal) qu'elle est incluse dans le réseau du cristal.

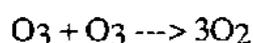
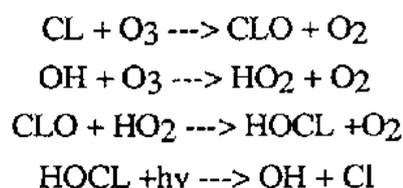
On observera que les quatre réactions ont pour effet de transformer des réservoirs de NOx en acide nitrique, conduisent ainsi à une dénitrification en série avec l'adsorption de N₂O₅, c'est à dire la désactivation préalable des NOx. HNO₃ se trouve dans tous les cas inclus dans les cristaux de glace et si ceux-ci sont assez gros, ils peuvent précipiter, entraînant une perte irréversible d'oxydes d'azote.

En ce qui concerne les chlores, les réactions (1) et (2) conduisent à la transformation de HCl, espèce stable en composés gazeux actifs alors que la réaction (3) a pour résultat une déchlorination. Il y a donc compétition entre les deux mécanismes. Les mesures en laboratoire indiquent que la réaction (1) est la plus rapide, de l'ordre de 30 heures au lieu de 12 jours pour la réaction (3). L'activation des chlores l'emporte donc et l'on remarquera qu'une fois sous forme active (Cl, ClO, OClO) et en l'absence de NOx, il n'existe plus de possibilité de déchlorination.

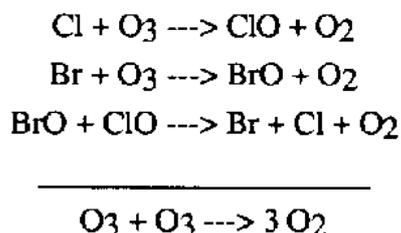
Bien que de nombreux aspects des mécanismes indiqués ci-dessus restent à préciser, les coefficients de réactions mesurés en laboratoire permettent de rendre compte quantitativement des résultats qui parviennent du terrain: en présence de nuages stratosphériques, les composés azotés sont séquestrés dans les particules de glace alors que les chlores sont transformés en espèces gazeuses actives.

Parvenu à ce stade, il faut encore détruire l'ozone. Le simple cycle catalytique qui permettait de rendre compte de la réduction lente de l'ozone à 40 km est ici largement insuffisant. Trois mécanismes ont été proposés et étudiés en laboratoire:

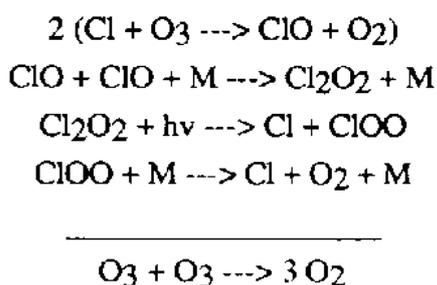
CYCLE I (SOLOMON ET AL, 1986)



CYCLE II (McELROY ET AL, 1986)



CYCLE III (MOLINA and MOLINA, 1987)



Ces trois cycles ont en commun qu'il ne peuvent exister qu'en présence de soleil. Aucun mécanisme de destruction d'ozone n'a pu être identifié qui serait actif durant la nuit polaire. Les données les plus récentes de laboratoire ainsi que les simulations des observations convergent vers une plus grande importance du cycle III, ou cycle du dimère de ClO, qui expliquerait plus de 50% de la destruction de l'ozone.

Les coefficients de réactions mesurés en laboratoire permettent aux modèles de simulation à une dimension (verticale) ou Lagrangien, c'est à dire le long d'une trajectoire d'une masse d'air individualisée calculée au préalable par un modèle de circulation générale, de rendre compte des taux moyens de destruction de l'ozone observés en Antarctique, de l'ordre 1 % par jour.

Bien qu'une chimie identique soit observée aux deux pôles, elle ne conduit pas dans le cas de l'hémisphère nord à la formation d'un trou large et stable. Ceci est aujourd'hui bien compris. En contraste avec le Sud où l'on observe en hiver la présence d'un tourbillon dépressionnaire stratosphérique stable ou vortex qui ne se dissout qu'au moment du réchauffement final plus de deux mois après l'équinoxe de printemps, la circulation générale dans l'hémisphère nord est instable. En Arctique, on observe fréquemment un vortex soit décalé vers les latitudes moyennes, soit encore scindé en deux (Figure 4-6). Au lieu d'un

réchauffement final, on observe une succession de "réchauffements explosifs", jusqu'à 60°C en quelques jours. La date du dernier d'entre eux, le réchauffement final, varie de Janvier à Mars au plus tard, c'est à dire avant l'équinoxe de printemps. Enfin, la température de la stratosphère polaire Arctique est en moyenne 10° plus élevée que celle régnant en Antarctique, c'est à dire moins favorable à la formation de PSC. Les conditions de formation d'un trou de larges dimensions ne sont donc pas réunies et l'expérience montre que seuls des "mini-trous" de 1000 à 2000 km circulant dans le flux général d'ouest, sont présents. On a noté par exemple en 1990 en Scandinavie un trou tout aussi profond que celui de l'Antarctique puis qu'il a atteint 165 unités Dobson (Figures 4-7 et 4-8). Bien qu'il soit établi qu'un forçage dynamique troposphérique soit à l'origine de la formation des ces mini-trous, le mécanisme de destruction d'ozone est bien présent dans les deux hémisphères, même s'il revêt une forme différente. Du fait d'un hiver stratosphérique plus court en Arctique qu'en Antarctique, la réduction d'ozone à l'échelle hémisphérique, devrait y être en moyenne plus faible.

Origine des chlores et responsabilité des CFC

Les radicaux chlorés et à un moindre degré les radicaux bromés, sont bien responsables de la destruction de l'ozone polaire. Quelle peut en être leur origine?

Les chlores actifs dans la stratosphère ne peuvent être directement issus d'émanations gazeuses au niveau du sol. En effet tout composé actif ClOx mais également NOx dans la troposphère réagirait avec le radical oxydrile OH pour former un acide, HCl ou HNO₃, soluble dans l'eau et donc rapidement lessivé. La durée de vie des chlores actifs de quelques jours au niveau de sol est largement inférieure au temps de transit vers la stratosphère, qui est de 5 à 10 ans.

Deux idées ont été avancées: a) le transport brutal de composés actifs à la suite d'une éruption volcanique; b) le transport progressif d'espèces sources totalement inactives à basse altitude, venant à libérer quelques années plus tard des composés actifs par suite de leur photodissociation par le rayonnement solaire ultra-violet à haute altitude.

Bien que les quantités émises ne représentent au mieux que 10% des chlores présents à l'époque, l'hypothèse volcanique a un temps pu paraître séduisante à cause de l'éruption du volcan El Chichon au Mexique en 1982. On observera cependant que le trou d'ozone a commencé en 1979, c'est à dire trois ans auparavant et que les mesures satellitaires ne laissent pas de place à une éruption inconnue. Depuis cette éruption, la charge en aérosols est revenue à la normale et le trou d'ozone n'a jamais été aussi prononcé. Les éruptions volcaniques ne sont donc pas responsables de la diminution d'ozone depuis 1979. Ceci ne veut pas dire pour autant qu'un semblable événement ne se soit pas produit par le passé. Le calcul montre qu'une

éruption cataclysmique comme celle du Krakatoa en Indonésie à la fin du siècle dernier a vraisemblablement entraîné une large destruction de l'ozone stratosphérique.

En ce qui concerne le transport lent d'espèces sources stables vers la stratosphère, les seuls composés halogénés naturels entrant dans cette catégorie sont les chlorures, bromures et iodures de méthyle qui diffusent de la surface de la mer. Leur concentration mesurée est stable et de l'ordre de 0.6 ppbV à comparer avec une teneur totale en chlores dans la stratosphère en 1989 de 3.5 ppbV.

Les seules espèces halogénées sources en augmentation permanente que celle-ci soit évaluée par le bilan des émissions ou bien par des mesures régulières in-situ sont bien les CFC.

Evaluation des tendances évolutives de la couche d'ozone

L'analyse la plus récente de l'ensemble des données disponibles sur l'évolution passée de la couche d'ozone a été effectuée en 1989 dans le cadre du Rapport PNUE / OMM sur l'état de la couche d'ozone. Elle concerne les variations de la colonne totale et de la distribution verticale d'ozone.

Colonne totale d'ozone

En ce qui concerne le contenu total en ozone, la seule base de données disponible, sur une période suffisamment longue pour prendre en compte la variabilité naturelle de l'atmosphère à des échelles de temps décennales, est celle du réseau des stations sol équipées de spectrophotomètres Dobson. Ces instruments sont pour la plupart localisés dans les régions de moyenne latitude de l'hémisphère nord, si bien que l'étude des tendances est restreinte aux régions de latitude comprises entre 30° et 65° nord. L'étalonnage absolu du réseau Dobson est effectué par référence à l'instrument étalon situé au laboratoire central de Boulder. On estime que cet instrument (Dobson n° 83) est resté fidèle en valeur absolue à mieux que $\pm 0.5\%$ au cours des 15 dernières années. Bien que les données du réseau Dobson soit disponibles depuis 1957, Année Géophysique Internationale, les analyses statistiques ont été volontairement limitées à la période postérieure à 1969. En effet, les explosions nucléaires atmosphériques du début des années 1960 ont certainement perturbé, du fait des émissions importantes des NOX, le contenu en ozone dans la stratosphère. Ces impacts sont pour le moins difficiles à modéliser et ne pourraient être pris en compte qu'avec une marge d'incertitude importante.

Les observations satellitaires sont uniquement celles de l'instrument TOMS (Total Ozone Mapping System) à bord du satellite Nimbus 7 lancé en 1979. Elles ne couvrent donc qu'une période de dix ans et ont dû de plus être réétalonnées à partir des données du réseau Dobson pur compenser les dérives instrumentales. Il ne s'agit donc pas d'une base de données indépendante, même si elles permettent du fait de la couverture globale fournie par le satellite, d'extrapoler les tendances à moyen terme à l'ensemble du globe.

Les données du réseau Dobson ont été corrigées des effets de la variabilité naturelle par la prise en compte des variations saisonnières, de l'oscillation quasi-biennale de la circulation stratosphérique, du cycle solaire de onze ans. Une étude approfondie de sensibilité montre que les résultats obtenus restent peu ou pas sensibles aux modèles utilisés pour rendre compte de ces phénomènes naturels. Cinq analyses statistiques indépendantes, effectuées en termes de moyenne zonale, mettent toutes en évidence des diminutions significatives de la colonne d'ozone comprises entre -2% et -6% entre 30 et 64° de latitude nord pendant les mois d'hiver (décembre à mars) entre 1969 et 1986. Les diminutions les plus importantes sont observées aux latitudes les plus élevées, les incertitudes citées correspondant à un intervalle de confiance de 95% : de $-0.9 \pm 0.9\%$ à $-1.7 \pm 0.9\%$ entre 30° et 39° nord, de $-2 \pm 0.8\%$ à $-3 \pm 1.7\%$ entre 40° et 52° nord, de $-2.5 \pm 1.9\%$ à $-3.7 \pm 1.8\%$ entre 53° et 64° nord. Par contre, en été (mai à août), les tendances sur la même période (1969-1986) sont soit non significatives soit à la limite des valeurs significatives : $-0.4 \pm 0.9\%$ à $-1.1 \pm 0.9\%$ entre 30° et 39° nord, $-0.7 \pm 0.6\%$ à $-1.1 \pm 0.8\%$ entre 40° et 52° nord, $-0.1 \pm 0.9\%$ à $-0.7 \pm 0.9\%$ entre 53° et 64° nord. La prise en compte dans ces analyses des données obtenues entre 1986 et 1988 ne modifie pas ces conclusions. Sur cette période de 19 ans les tendances évolutives exprimées en % par décennie sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Latitude	Tendance évolutive (% par décennie)	
	Hiver	Eté
30° - 39° N	$- 1.8 \pm 1.1$	$- 0.5 \pm 1.1^*$
40° - 52° N	$- 2.3 \pm 0.9$	$- 0.3 \pm 1.0^*$
53° - 64° N	$- 2.7 \pm 1.2$	$- 0.2 \pm 1.2^*$

* tendance non statistiquement significative

Par ailleurs, une analyse plus poussée en fonction de la longitude, met en évidence des variations des tendances entre les différentes régions. Les variations observées sont plus importantes au dessus de l'Amérique du Nord et de l'Europe ($-2.9\% \pm 0.7\%$ par décennie en hiver, $-1.2 \pm 0.7\%$ en été), plus faible et même non significative au dessus du Japon ($-0.6 \pm 1.0\%$ par décennie en hiver, $+0.8 \pm 1.2\%$ en été).

Aucune extrapolation à partir de ces données ne peut être effectuée pour les régions tropicales, équatoriales, polaires et pour tout l'hémisphère sud, du fait essentiellement de la non représentativité d'un échantillonnage spatial limité par le trop faible nombre de stations. Toutefois les données satellitaires, une fois corrigées des effets de dérive, peuvent être utilisées pour confirmer ces signatures régionales. Comme leur extension limitée dans le temps - inférieure à un cycle solaire de onze ans - ne permettent pas d'étude approfondie des tendances à long terme, les variations sont exprimées en termes de différences de contenu intégré d'ozone, observées à différentes latitudes, entre les années 1987 et 1978 (novembre). Si environ 1 % des diminutions observées peuvent être attribuées à la variation du flux solaire entre 1978 et 1987 au cours du cycle undécennal, les résultats de ces comparaisons, résumés dans le tableau suivant, mettent en évidence une variation de la quantité globale d'ozone et montrent clairement l'influence des phénomènes polaires dans l'hémisphère sud.

Latitude	Différence relative du contenu intégré d'ozone (1987) - (1978)
Global (53°N-53°S)	- 2.5 ± 0.6 %
Hémisphère nord (0°-53°N)	- 1.8 ± 1.4 %
Hémisphère sud (0°-53°S)	- 2.9 ± 0.9 %

Latitude	Différence relative du contenu intégré d'ozone (1987) - (1978)
53°S - 65°S	-10.6 ± 1.6 %
39°S - 53°S	- 4.9 ± 1.8 %
29°S - 39°S	- 2.7 ± 2.1 %
19°S - 29°S	- 2.6 ± 1.5 %
0° - 19°S	- 2.1 ± 0.8 %
0° - 19°N	- 1.6 ± 1.3 %
19°N - 29°N	- 3.1 ± 1.9 %
29°N - 39°N	- 2.5 ± 1.7 %
39°N - 53°N	- 1.2 ± 1.5 %
53°N - 65°N	- 1.4 ± 1.4 %

Ces données expérimentales peuvent être comparées aux résultats des modèles numériques simulant l'évolution de l'atmosphère sur la même période, 1969-1986. On constate alors que les tendances observées sont largement supérieures aux prédictions des modèles pour les mois d'hiver : entre $-1.8 \pm 0.7\%$ et $-2.6 \pm 1.2\%$ par décennie pour les mesures, entre -0.5 et -1.2% pour les prédictions théoriques. En été par contre, l'accord est meilleur : entre $-0.6 \pm 0.6\%$ et $-0.8 \pm 0.6\%$ par décennie pour les mesures, entre -0.3 et -0.6% pour les prédictions théoriques. Il importe de rappeler que ces modèles ne prennent pas en compte les processus de chimie hétérogène récemment mis en évidence dans les régions polaires.

Distribution verticale de l'ozone

La situation en ce qui concerne les données sur la distribution verticale d'ozone dans la troposphère et la stratosphère est encore moins satisfaisante que pour les mesures de la colonne totale. Les mesures par sondes in-situ embarquées sur les ballons météorologiques ne sont effectuées de façon systématique que dans quelques stations de l'hémisphère nord. Elles ne donnent des indications sur la répartition verticale de l'ozone que jusqu'à une altitude inférieure à 32 km. Seules dix stations d'observation sol effectuent des mesures de cette distribution verticale dans la stratosphère supérieure par la méthode Umkehr au moyen du

spectrophotomètre Dobson. Ces stations sont réparties de façon totalement inhomogène à la surface du globe et donc non optimisée pour la détermination de tendances à long terme. De plus, les mesures, dont la résolution verticale ne dépasse pas 11 à 15 km, sont très sensibles à la présence de poussières d'aérosols dans la haute atmosphère et les données passées sont largement affectées par les éruptions volcaniques majeures du Mont Agung (1963) et des volcans Fuego (1974) et El Chichon (1982).

Les seules données satellitaires utilisables sont celles des instruments SAGE (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment) lancés successivement en 1979 (SAGE) et en 1984 (SAGE II). Le premier de ces instruments n'a fonctionné que jusqu'en 1981 et donc l'évaluation des tendances ne peut se faire que par comparaison entre les résultats de ces deux expériences qui n'ont pas été comparées de façon absolue entre elles faute de recouvrement temporel. Les mesures ont un caractère absolu du fait de la méthode d'occultation solaire utilisée. Elles permettent d'obtenir environ 900 profils par mois de la distribution verticale d'ozone au dessus de 25 km.

La difficulté principale dans l'analyse de ces données tient essentiellement au faible échantillonnage temporel et spatial disponible, qui rend impossible une détermination précise de tendances à l'échelle globale. L'effort a donc porté sur la recherche des signatures attendues des effets des activités humaines et en particulier une diminution de la concentration d'ozone entre 35 et 50 km directement liée à l'augmentation des constituants chlorés. .

Dans les régions de latitude comprises entre 20° et 50° nord et 20° et 50° sud, qui correspondent à la densité maximale des données satellitaires, les comparaisons entre les mesures des deux instruments SAGE indiquent pour une période de 6 ans entre 1981 et 1986 :

- une diminution de la concentration d'ozone entre 35 et 44 km correspondant à un changement maximum de $-3 \pm 2\%$ à 40 km,
- une diminution de $-3 \pm 2\%$ à 25 km
- pas de variation de la concentration d'ozone entre 28 et 33 km et entre 45 et 48 km.

Ces valeurs ne reflètent pas une tendance au sens des analyses statistiques effectuées sur les données de la colonne totale d'ozone. Elles correspondent à la comparaison de 33 mois de données de l'instrument SAGE (1979-1981) et 3 ans de données (Octobre 1984 - Décembre 1988) de l'instrument SAGE II. Elles représentent donc les changements de concentration d'ozone au cours de cette période, non corrigés des effets du cycle solaire.

En ce qui concerne les données sol, il est cette fois possible du fait de la continuité temporelle des données obtenues par la méthode Umkehr, d'effectuer une analyse statistique de

tendances en prenant en compte les différentes sources de variabilité naturelle (cycles solaires, oscillation quasi-biennale, variations saisonnières, influence des particules d'aérosols d'origine volcanique). L'analyse ainsi effectuée pour 10 stations de l'hémisphère nord entre 1977 et 1987, met en évidence des tendances statistiquement significative entre 30 et 43 km qui correspondent à une diminution moyenne de la concentration d'ozone de $-0,4 \pm 0,3\%$ par an à 40 km (intervalle de confiance de 95%). Ces valeurs sont corrigées des effets du cycle solaire, dont l'importance est d'ailleurs donnée directement par l'analyse statistique et correspond à une diminution de la concentration d'ozone de $-0,3\%$ par an entre 1977 et 1987. Si l'on utilise cette valeur pour corriger les données satellitaires, on obtient une variation de la concentration d'ozone à 40 km de $-0,2 \pm 0,4\%$ par an, valeur qui n'est pas incompatible avec les résultats des observations sol dans la limite des incertitudes respectives.

Dans la basse stratosphère, entre 15 et 24 km, l'analyse des données obtenues entre 1966 et 1986 par sondage ballon dans 9 stations au Canada, en Europe et au Japon, met en évidence un variation de la concentration d'ozone de $-0,5 \pm 0,4\%$ par an. Cette analyse reste toutefois entachée d'incertitudes importantes quant à la qualité des données et ne peut refléter une tendance globale du fait du faible échantillonnage spatial. Ces résultats ne sont à nouveau pas incompatibles avec la diminution observée par les instruments SAGE à 25 km d'altitude.

Si l'on compare ces résultats expérimentaux aux variations théoriques données par les modèles bi-dimensionnels de la stratosphère pour les mêmes périodes, on constate que les prédictions des modèles actuels indiquent une diminution maximum de la concentration d'ozone de -6% entre 1979 et 1985 à 40 km pour les régions de moyenne latitude. Ces valeurs se placent donc à la limite supérieure des résultats expérimentaux. Mais le résultat essentiel de ces analyses tient au fait que les variations de la concentration d'ozone mises en évidence à 40 km et donc à priori directement reliés à l'effet des constituants chlorés, ne peuvent expliquer les variations de l'ordre de $-1,1\%$ par décennie mise en évidence par l'analyse des données de la colonne totale d'ozone. En effet la concentration totale d'ozone entre 35 et 45 km ne représente que moins de 10% de cette colonne totale. Il semble donc que les résultats concordant quant à la diminution de la concentration d'ozone vers 25 km d'altitude, obtenus par les satellites et les observations sol, mettent en évidence le rôle prépondérant de la basse stratosphère dans les tendances évolutives de la couche d'ozone. Or, les modèles actuels, qui n'incluent pas les mécanismes de chimie hétérogène, sont incapables de prédire de tels effets. Il s'agit là d'une incertitude majeure qui ne pourra être levée que par la mise au point de modèles prenant en compte l'ensemble des processus caractéristiques de la basse stratosphère.

Variations de la température stratosphérique

Le profil vertical de température dans la stratosphère est directement lié à la concentration locale d'ozone entre 35 et 60 km d'altitude. Il est donc à priori intéressant vérifier si les variations observées de la température stratosphérique restent compatibles avec les tendances mises en évidence sur la concentration d'ozone. La base de données est ici essentiellement constituée dans la basse stratosphère par les données des stations météorologiques effectuant des radio-sondages réguliers, et dans la haute stratosphère par les données satellitaires obtenues par les satellites météorologiques en orbite polaire de la série NOAA. Les premières permettent une analyse sur une période d'environ 20 ans alors que les secondes ne fournissent d'information que depuis 1979, et donc sur une période trop courte pour que tous les effets de la variabilité naturelle puissent à nouveau être pris en compte.

Dans la basse stratosphère, entre 15 et 23 km, les données obtenues au cours des vingt dernières années suggèrent une variation maximum de la température de -0.4°C par décennie dans les régions de basse et moyenne latitude. Des changements plus importants pourraient se produire dans les régions de plus haute latitude mais ces premières analyses méritent confirmation. Dans la haute stratosphère, les données satellitaires obtenues en comparant les périodes (1985-1986) et (1979-1980) indiquent un changement global de la température de $-1.5 \pm 1^{\circ}\text{C}$ à 40 km d'altitude. Ce résultat est compatible avec la diminution de concentration d'ozone de $-3 \pm 2\%$ mise en évidence par les instruments SAGE. Toutefois de larges incertitudes demeurent dans l'analyse de ces données de température, en particulier sur l'influence possible du cycle solaire et de l'oscillation quasi-biennale sur la température de la stratosphère.

Variations du flux solaire ultra-violet au sol

L'importance de la couche d'ozone pour les équilibres de l'environnement terrestre tient largement au rôle de filtre du rayonnement solaire ultra-violet joué par ce constituant. Il est donc particulièrement important de vérifier si la diminution de la colonne totale d'ozone mise en évidence au cours de la dernière décennie se traduit ou non par une augmentation du rayonnement solaire ultra-violet au sol. Malheureusement les données actuellement disponibles ne permettent en aucun cas de conclure quant à une variation de ce flux. La seule base de données disponibles est celle du réseau des instruments "Robertson-Berger" en opération aux Etats-Unis depuis 1974. Si l'analyse statistique ne met en évidence aucune variation du flux solaire au cours de cette période, il est difficile de faire la part des différentes sources possibles

de variations à partir d'instruments dont la sensibilité à de très faibles variations du contenu en ozone reste très limitée et qui sont par ailleurs fortement influencés par la nébulosité et la pollution locale. La mise en oeuvre d'un réseau opérationnel, correctement étalonné, de surveillance du flux solaire ultra-violet reste aujourd'hui une priorité.

5. INCERTITUDES SUR LES MECANISMES DE DESTRUCTION DE L'OZONE

La diminution progressive de l'ozone atmosphérique durant la dernière décennie en particulier aux hautes latitudes, dans des limites des erreurs discutées et acceptées par la communauté scientifique internationale, est aujourd'hui établie. La destruction de plus en plus marquée de l'ozone polaire chaque printemps par un mécanisme photochimique rapide l'est également. La responsabilité des chlores et par conséquent des CFC comme on l'a vu plus haut, est un fait acquis. L'augmentation de la concentration des CFC avec ses conséquences sur l'effet de serre, qu'elle soit mesurée directement ou évaluée sur la base de leur production l'est aussi, ainsi que sa croissance inéluctable durant les années qui viennent. Par contre les prévisions d'évolution de l'ozone durant les décennies à venir sont largement incertaines. Ceci ne provient pas d'une ou autre erreur de mesure qu'il est toujours possible d'évaluer, mais de la méconnaissance dans la quelle nous nous trouvons de plusieurs mécanismes complexes qui ne peuvent être rendus par les modèles de simulation et de prédiction, parce qu'ils sont inconnus et que donc ils ne peuvent y être introduits.

Nous en voyons trois principaux: les mécanismes de chimie hétérogènes en région polaire, mais également à toutes les autres latitudes à température plus élevée; la diffusion complexe des trous d'ozone des régions polaire à l'échelle hémisphérique, qu'ils soient larges ou de petites dimensions; la dynamique et la photochimie de la basse stratosphère équatoriale, c'est à dire le mécanisme d'injection des composés troposphériques dans la stratosphère qui contrôle leur durée de vie globale.

La chimie hétérogène et l'équilibre de l'ozone polaire

Nous avons déjà vu que la présence de chlores actifs dans la stratosphère et la séquestration des composés azotés en milieu polaire étaient principalement attribuées à l'existence de quatre réactions hétérogènes observées en laboratoire et que par la suite, des cycles photochimiques comme celui du dimère du monoxyde de chlore permettaient de simuler un taux moyen de destruction d'ozone de l'ordre de 1% par jour.

Ce n'est pas tout à fait ce qui est observé dans la nature. Si au lieu de regarder le taux moyen de destruction d'ozone sur un mois, on décortique les observations par tranches de quelques jours ou bien si l'on regarde les variations diurnes systématiques d'ozone qui ne peut se détruire que de jour, on constate des taux de destruction extrêmement variables dans des conditions d'éclairement et de température qui ne sont pas fondamentalement différentes. Ce taux peut varier de 0 à 6 ou 8 % par jour.

Bien qu'en moyenne, la concentration et la variation diurne des oxydes d'azote soit réduite en région polaire en hiver, de larges variations son présentes et l'on ne peut rendre compte aujourd'hui totalement du transfert de ces radicaux d'abord vers le pentoxyde d'azote puis l'acide nitrique. Le mécanisme de dénitrification lui-même n'est pas parfaitement apprécié.

En absence de mesures extrêmement difficiles, le rôle des radicaux hydrogénés OH et HO₂ voir des hydrocarbures, est mal pris en compte.

La description qui été donnée plus haut des nuages stratosphériques polaires est en fait incomplète. La dimension, la densité et la composition des particules d'acide nitrique tri-hydraté ou de glace d'eau contenant plus ou moins d'acides nitrique et chlorydrique, adsorbés ou dissous suivant les cas, sont extrêmement variables et par la même les constantes de réaction chimiques hétérogènes qui leur sont associées.

Le tableau ci-dessous dû à Turco, Toon et Hamill (JGR, 16.493, 1989) qui fournit une estimation des constantes de temps exprimées en secondes à partir de mesures en laboratoire des quatre réactions hétérogènes déjà signalées en fonction du type de nuage stratosphérique, résume assez bien la situation.

REACTION	TYPE DE NUAGE		
	PSC I	PSC II	PSC III
(1) ClONO ₂ ads + HCl sol	1 x 10 ⁵	2 x 10 ⁵	10 ³
(2) ClONO ₂ sol + H ₂ O sol	1 x 10 ⁶	2 x 10 ⁵	10 ³
(3) N ₂ O ₅ sol + H ₂ O sol	1 x 10 ⁶	2 x 10 ⁵	10 ³
(4) N ₂ O ₅ ads + HCl sol	1 x 10 ⁶	2 x 10 ⁶	10 ⁴

Dans des PSC de type I c'est à dire formé de particules d'acide nitrique tri-hydraté de 1 micron de diamètre en moyenne, la réaction (1) dite d'activation des chlores serait la plus rapide (28 h). La réaction (3) de dénitrification serait lente (12 jours). En présence de PSC de type II formés de cristaux de glace d'eau de 10 à 100 microns de diamètre, la première serait relativement ralentie d'un facteur 2, mais la réaction (3) serait accélérée d'un facteur 5. En présence de particules de glace d'eau mais cette fois de plus petit diamètre (5 microns), donc avec une surface considérablement accrue pour la même quantité d'eau, les constantes de temps des réactions (1), (2) et (3) seraient réduites à une demi-heure. Ces derniers nuages dits de type

III ne sont pas ésotériques. Il s'agit de nuages qui se forment par détente adiabatique de l'air comme les nuages troposphériques lenticulaires, dans des ondes orographiques vers 15 km d'altitude lorsque le vent est violent dans les basses couches. En Antarctique, leur présence a été décelée par l'équipe du CNRM de Toulouse sous le vent de la Péninsule à l'aide des données satellitaires TOVS (JGR, 11.233, 1989). C'est à un phénomène identique que l'on doit le refroidissement de la stratosphère de 10°C en un jour (de -85° à -95°) qui a échappé totalement aux modèles météorologiques mais a pourtant été observé en Suède durant la campagne CHEOPS au mois de Février 1990. Simultanément un trou d'ozone au sein duquel un minimum de 165 UD, c'est à dire du même ordre que celui de l'Antarctique, était observé sur l'ensemble de la Scandinavie de Oslo à Kiruna. La formation de ce trou, qui ne peut être que partiellement interprétée par des causes dynamiques, nécessiterait une modification radicale des constantes de vitesse des réactions.

Dans la nature, des particules de dimensions très variables coexistent. Elles se modifient en permanence, la forme discontinue des nuages l'atteste. Le feuilletage de la stratosphère comme son nom l'indique, s'accompagne d'une juxtaposition de couches de composition chimique et de teneur en vapeur d'eau variées. Il serait donc compréhensible que les réactions hétérogènes ainsi qu'en aval la destruction d'ozone, puissent être extrêmement variables. Les taux moyens introduits dans des modèles qui ne peuvent rendre compte en détail des mécanismes micro-physiques de formation des particules, ne représentent que des résultats de laboratoire obtenus dans des conditions expérimentales données. Seule l'observation sur le terrain nous permettra d'en apprécier la variété.

L'incertitude sur le taux réel de destruction de l'ozone polaire à des conséquences lourdes sur les projections dans le futur. Il s'agit du mécanisme le plus efficace aujourd'hui identifié de destruction d'ozone à l'échelle globale. Une destruction rapide par exemple dans les nuages stratosphériques orographiques pourrait signifier paradoxalement que même en l'absence de formation d'un trou stable sur plusieurs mois, la destruction moyenne d'ozone pourrait être plus importante dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud, du moins au cours des années froides.

Chimie hétérogène aux moyennes latitudes

Dans la stratosphère de nos latitudes entre 15 et 30 km, à des températures comprises entre -40° et -60°C coexistent des espèces chimiques et des particules d'aérosols formées principalement d'eau liquide en surfusion et de sulfates (SO₄). Traditionnellement ces particules ne sont prise en compte que dans les calculs de transfert de rayonnement c'est-à-dire de

diffusion de la lumière, mais jamais dans la chimie. La découverte de l'existence de réactions chimiques hétérogènes est un élément d'importance. Le rôle de ces gouttes d'eau en particulier sur les oxydes de l'azote ($\text{N}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O liq} \rightarrow 2 \text{HNO}_3$ en solution) non encore établi mais en cours d'étude en laboratoire, pourrait modifier sensiblement notre compréhension des équilibres photochimiques.

Cette vision est renforcée par le fait que plusieurs maillons semblent manquants ou mal évalués dans les équilibres photochimiques. Ceci peut s'illustrer par deux exemples parfaitement établis:

a) - La comparaison de l'ensemble des mesures de distribution verticale de l'acide nitrique en accord entre elles d'une part quelque soit la technique et les résultats de modèles d'autre part, montre au choix suivant la quantité totale d'oxydes d'azote introduite dans le calcul, une surestimation systématique de la concentration de ce constituant au dessus de 25 km ou une sous estimation en dessous.

b) - Enfin le plus important: malgré les nombreuses tentatives pour en comprendre la cause, les calculs quelque soit leur degré de sophistication, sous-estiment systématiquement de 20 à 30% la concentration d'ozone dans la haute stratosphère au-dessus de 35 km. Ce niveau est justement celui de la production photochimique de l'ozone. Une erreur sur celle-ci se répercuterait directement sur le le bilan de l'ozone.

La dilution des trous d'ozone polaire à l'échelle hémisphérique

La réduction d'un facteur 2 de la colonne d'ozone au printemps sur une surface de l'ordre 5 à 6% de la surface totale de l'hémisphère sud, représente pour celui-ci une perte globale de l'ordre de 2 à 3%. La contribution des mini-trous qui apparaissent souvent pendant quelques jours au voisinage du cercle polaire dans le Nord aussi bien que dans le Sud, pourrait éventuellement représenter une contribution plus importante.

En fait cette contribution à l'échelle globale ou diffusion des trous d'ozone à l'échelle hémisphérique est quelque chose de très difficile à estimer pour les raisons suivantes:

- Le mélange d'une masse d'air avec une autre aux altitudes stratosphériques, est dû à un mécanisme de diffusion turbulente qui fait intervenir tout le spectre des échelles spatiales, de quelques dizaines de mètres à plusieurs milliers de kilomètres. Les modèles de circulation générale ou GCM ne peuvent rendre compte de façon explicite des phénomènes de dimension

inférieure à leur maille horizontale (150 à 250 km) et verticale (2 à 5 km). Nous avons donné une illustration de ce problème lorsque nous avons signalé un refroidissement de la stratosphère de 10°C observé mais non présent dans les modèles météorologiques. Les dimensions verticale et horizontale de la chaîne de montagnes norvégienne qui en est la cause, sont d'une part trop réduites par rapport à la dimension de la maille d'un modèle hémisphérique et d'autre part la propagation vers le haut des ondes de relief est mal rendue dans les modèles. Un autre phénomène bien établi par des mesures de dynamique en ballon, est que la stratosphère est constituée de fines couches de quelques centaines de mètres d'épaisseur au maximum qui peuvent être soit stables soit turbulentes suivant le gradient vertical local de température. C'est au sein de ces petites couches turbulentes que se produisent des échanges rapides entre les filets d'air. Dans une vue moyenne et globale, la stratosphère est stable et ces échanges disparaissent. Le moyen de contourner le problème de l'inaptitude des modèles globaux à résoudre les mécanismes de petite dimension, est de les paramétriser. Ceci est en cours. Des progrès sont obtenus qui peuvent être satisfaisants ou non suivant les cas.

- L'absorption du rayonnement ultra-violet solaire par l'ozone est responsable de l'échauffement de la stratosphère. Lorsque l'ozone est détruit, le chauffage est réduit. Suivant des simulations récentes (CNRM, JGR, 1883, 1990) la température à 20 km d'altitude aurait été 6 à 8°C plus faible au cours du printemps 1987 en Antarctique que celle qui aurait prévalu si l'ozone n'avait pas été détruit. Les basses températures entraînant la présence plus nombreuse de nuages stratosphérique, la destruction d'ozone s'auto-accélérerait. De plus, le champ de température contrôle le champ de pression et donc les vents. Suivant ce schéma, l'absence d'ozone dans un vortex, l'entreprendrait. La même simulation indique par exemple que en absence de destruction d'ozone, l'échauffement final stratosphérique en 1987 se serait produit 2 semaines plus tôt.

La complexité du mécanisme de diffusion en latitude des trous d'ozone polaire, ne permet pas aujourd'hui une évaluation certaine de ses conséquences à l'échelle globale et donc des prédictions fiables sur plusieurs décennies.

L'échange troposphère-stratosphère.

Très grossièrement, 5 à 7 ans séparent en moyenne l'émission des CFC au niveau du sol de leur présence dans la basse stratosphère vers 25 km où ils sont dissociés par le rayonnement ultra-violet solaire. Ceci n'est cependant qu'une moyenne qui résulte de l'observation de la distribution verticale d'espèces sources plus ou moins stables du point de vue photochimique et non de la compréhension détaillée de leur transport vers le haut. La durée

du transfert d'un constituant donné du niveau de la mer aux couches supérieures comporte une incertitude assez large. En voici la raison.

La limite entre la stratosphère et la troposphère, la tropopause définie comme l'altitude (6 km au pôle, 15 km à l'équateur) où le gradient de température potentielle devient positif c'est à dire où la stabilité verticale de l'air croit brusquement, n'est pas une barrière imperméable aux échanges. Vers le bas, le mécanisme est connu. Il s'agit d'un transfert local et soudain qui se déclenche préférentiellement aux moyennes latitudes sur le bord anticyclonique descendant des jet-streams. Il se traduit par des "langues" ou "rivières" d'air stratosphérique riche en ozone que l'on peut parfois identifier jusqu'au niveau du sol. Vers le haut le mécanisme est beaucoup moins bien appréhendé.

L'idée proposée est que l'injection de l'air troposphérique se produirait essentiellement au sommet des énormes nuages convectifs de la Zone de Convergence Equatoriale, ZIC ou ITCZ pour les anglais ou encore Pot au Noir pour les marins et additionnellement au dessus des cyclones tropicaux et des orages de très grande dimension présents en été par exemple dans les grandes plaines des USA. Ces nuages appelés Cumulo-Nimbus et dont les sommets formés d'enclumes glacées pourraient culminer vers 18 ou 20 km d'altitude, sont le siège de courants verticaux rapides, jusqu'à 40 m/s ou 120 km/heure. Ils auraient pour effet de sucer l'air au niveau du sol et de l'injecter violemment dans la stratosphère.

Newell un britannique, découvrait il y a une quinzaine d'année, que l'altitude de ces nuages était systématiquement plus élevée au voisinage de la Micronésie et du Nord de l'Australie de Novembre à Mars, a qui il donnait le nom imagé de "Fontaine Stratosphérique" pensant que la vapeur d'eau troposphérique était ainsi injectée dans la stratosphère. Sur ce dernier point Newell se trompait. Au milieu des années 1980, un américain E. Danielsen, réussissait à convaincre la NASA d'envoyer l'avion ER2 effectuer des mesures au-dessus des nuages dans la région de Panama moins active, mais où les nuages culminent quand même vers 17 km. Danielsen y découvrait qu'effectivement on observait de violentes intrusions d'air troposphérique mais que cet air était paradoxalement très sec. Il en trouvait l'explication et par la même celle de la sécheresse incompréhensible de la stratosphère en général. La réflectivité du sommet des nuages ainsi que leur émissivité infra-rouge entraîneraient comme pour la neige, un déficit radiatif et par conséquent un refroidissement intense. La vapeur d'eau serait condensée dans cette barrière de température et l'air parvenant dans la stratosphère serait desséché. Danielsen mesurait des températures voisines de -87°C . Les premières expériences qui ont survolé la Micronésie en ballons de longue durée, ont mesuré des températures aussi basses que -92°C . La présence probable de réactions chimiques hétérogènes favorisées par la présence à la

fois de particules de glace et de températures voisines de celles de la stratosphère polaire, est cependant totalement inconnue.

La conséquence de ces observations est que la teneur en eau de l'ensemble de la stratosphère est contrôlée par ce mécanisme, ce qui veut dire que les points de passage de la troposphère vers la stratosphère autres que ces nuages, ne jouent qu'un rôle négligeable. Le volume d'air qui transite chaque année de cette façon du niveau du sol vers les couches supérieures est encore bien difficile à évaluer. On devrait vraisemblablement retrouver dans les modulations de son amplitude la signature des grands cycles atmosphériques ou océaniques comme la circulation quasi-biennale de 26 mois ou le phénomène aperiodique El Nino, qui déterminent l'amplitude de la convection. On notera qu'un échauffement de la basse atmosphère par exemple par effet de serre, conduirait inmanquablement à une augmentation de l'instabilité verticale et par conséquent à un transfert plus rapide des espèces chimiques émises au niveau du sol vers la stratosphère.

En l'absence de mesures suivies en région équatoriale, très difficiles du fait même de la présence des Cumulo-Nimbus, le mécanisme de Fontaine Stratosphérique n'est pratiquement pas quantifié. C'est pourtant prioritairement à lui que l'on doit le transport des CFC dans la stratosphère.

6. MOYENS D'ETUDE ET DE SURVEILLANCE

La compréhension de l'état présent et de l'évolution possible de l'atmosphère passe par l'emploi combiné d'instruments placés au sol, en orbite ou aéroportés en ballon et en avion et de modèles numériques ayant pour objet la simulation des observations à partir de données de laboratoire avant de tenter des projections sur le futur.

Les performances de ces moyens se sont considérablement accrues ces dernières années en particulier à la suite de la crise survenue au cours des années 1972-75 et liée aux menaces que faisaient peser sur l'atmosphère l'avènement de l'aviation supersonique commerciale. Nous distinguerons les instruments au sol, propres aux observations en réseau sur une longue durée, les appareils embarqués sur des satellites qui seuls peuvent prétendre à une vue géographique globale mais limitée dans le temps et les appareils aéroportés qui présentent l'avantage de permettre des observations in-situ. Nous évoquerons rapidement ensuite les différents types de modèles de simulation avec leurs avantages et leurs limitations.

Instruments de mesures d'ozone au sol

Ces moyens comportent par définition des appareils de mesure à distance. Nous y inclurons les sondages de température et d'ozone réguliers en ballons.

Le plus ancien des appareils de surveillance de l'ozone est le spectrophotomètre Dobson, inventé durant les années 1930 et construit depuis à quelques 110 exemplaires. Il permet l'observation simultanée de la lumière solaire à deux longueurs d'onde dans l'ultra-violet entre 312 et 324 nm, et par la même une mesure de l'absorption par l'ozone c'est à dire la colonne totale de ce gaz au dessus de l'observateur. C'est pour honorer ces travaux que l'unité de colonne d'ozone porte maintenant le nom de Unité Dobson (1 mm d'ozone égale 100 UD). Par observation de la lumière diffusée au zénith durant le crépuscule, l'allemand Gotz en 1934 a montré que l'on pouvait obtenir à l'aide du Dobson, une distribution verticale à basse résolution de l'ozone par une méthode dite d'effet d'inversion ou Umkehr.

C'est à l'instrument Dobson maintenant automatisé à 7 exemplaires répartis dans des stations sélectionnées, que l'on doit les longues séries d'observations continues depuis les années 1930, par exemple à Arosa en Suisse, ou en Antarctique depuis l'Année Géophysique Internationale (AGI) en 1957 et une description des principaux traits de la distribution de l'ozone dans l'atmosphère: cycles saisonniers, variation en latitude et distribution en altitude.

Le spectrophotomètre Dobson n'est cependant pas un appareil facile d'emploi. Les difficultés de maintien des réglages nécessitent des opérateurs entraînés. Des corrections sont nécessaires pour tenir compte de la température de la stratosphère, des aérosols, des nuages ou d'absorbants parasites comme SO₂. Enfin la qualité des mesures dépend d'un étalonnage qui est tout sauf trivial puisque la seule méthode en cours est la comparaison directe avec un appareil dit de référence aux Etats-Unis.

Pour toutes ces raisons le nombre d'observations continues et fiables parmi les 110 appareils en service et dont les informations sont centralisées par le Centre Mondial de l'Ozone à Ottawa au Canada, est limité. Pour les mieux servis, la précision est estimée à 2%. Il est cependant clair que bien que le Dobson ne soit plus fabriqué, pour des raisons de continuité les observations devront être maintenues et que tous les nouveaux instruments devront leur être comparés.

Un autre appareil fondé sur le même principe d'observation de l'absorption par l'ozone dans l'ultra-violet est en service dans les pays de l'Est: le photomètre M-83 amélioré depuis peu par le M-104. Il s'agit d'un photomètre parce que d'un instrument à filtre, aisé d'emploi mais présentant tous les désavantages des filtres c'est à dire une dérive de transmission avec la température. Leur précision globale est moins bonne que celle des Dobson, dans le meilleur des cas: 4%. Des comparaisons avec les instruments Dobson ont montré des différences importantes qui peuvent atteindre parfois 40%. Leur avantage est leur nombre: 43 stations permanentes pour la seule Union Soviétique qui dresse des cartes quotidiennes d'ozone au-dessus de son territoire.

Une variante du Dobson plus moderne à cause de l'emploi d'un réseau optique au lieu d'un prisme et de l'adjonction d'un calculateur permettant des observations autonomes permanentes, a été introduite par les Canadiens au début des années 1980, le spectrophotomètre Brewer, du nom de son inventeur. Il en existe aujourd'hui 35 de part le monde. Leur précision est du même ordre que celle des Dobson. Les données d'observations sont collectées avec celles du réseau Dobson au Centre Mondial de l'Ozone à Ottawa.

A ces instruments au sol, il faut ajouter les sondages régulier de température et d'ozone qui en sont les compléments indispensables.

Les sondages de température quotidien et parfois bi, tri ou quadri-quotidiens entrent de la cadre de la veille météorologique mondiale. Bien souvent malheureusement, ils s'arrêtent dans la basse stratosphère vers 16 km en particulier en hiver polaire où les ballons explosent systématiquement à cause des trop basses températures. Le remède consiste à employer des

ballons plus performants et donc plus chers, ainsi qu'en une préparation des ballons dans un mélange d'huile de moteur et d'antigel extrêmement contraignante pour les opérateurs. Ces mesures ne sont appliquées que dans un nombre très restreint de stations. Bien souvent aujourd'hui en hiver, le champ de température dans la stratosphère polaire n'est défini que par les observations satellitaires à basse résolution en altitude (5km) et quelques points de sondage interpolés à la limite du raisonnable. L'amélioration des sondages de température dans la stratosphère est un priorité.

Différentes sondes d'ozone ont été successivement imaginées et proposées sur le marché comme des sondes optiques (Sondes Kulcke et Paetzold, Vassy, Kobayashi) ou des des cristaux de Rhodamine fluorescents en présence d'ozone (Sonde de Reggener). Elles ont certes permis des mesures de distribution verticale intéressantes mais elles sont aujourd'hui dépassées par une méthode universellement reconnue: les sondes électrochimiques fondées sur une réaction entre l'ozone et une solution aqueuse d'iodure de potassium. Deux modèles existent qui diffèrent par la conception de la cellule de réaction: Brewer-Mast et ECC. Ces dernières sont commercialisées aux Etats-Unis et en Finlande.

D'une façon générale, les mesures des sondes doivent être corrigées d'un facteur d'efficacité de la pompe d'aspiration de l'air qui varie avec l'altitude, d'un étalonnage effectué au laboratoire avant le décollage et présentent une certaine sensibilité à d'autres gaz comme SO₂ et NO₂. L'intégrale du profil vertical mesuré en ballon est souvent normalisée à la colonne totale observée par un Dobson voisin. Sans rentrer dans les détails, leur précision est estimée à 10-15 % en dessous de 25 km et à 20-25% vers 30 km.

Les sondages d'ozone coûtent relativement cher: 6000 à 8000 F par vol. Les Etats-Unis avaient entrepris de financer un réseau en 1964 qui a été arrêté en 1968 à l'exception de la station de Wallops en Virginie. Aujourd'hui une dizaine de stations au Canada, Etats-Unis, Japon, Europe, Hawaï, Fidji et Antarctique effectuent un sondage hebdomadaire, le mercredi. Ces observations sont renforcées en hiver dans les deux régions polaires. Quelques tirs de fusée-sondes sont également pratiqués chaque année à Wallops Island et également en URSS (Ile de Heiss, Volgograd et Mirny), dans le but de contrôler les étalonnages des instrument en orbite.

Les nouveaux instruments

Au delà de la nécessité de mieux mesurer l'ozone et sa distribution verticale, il apparaît primordial de pouvoir également surveiller systématiquement le plus grand nombre possible des espèces chimiques qui interviennent dans l'équilibre photochimique de la stratosphère. De nouvelles techniques ont été imaginées, pour certaines maintenant bien démontrées, pour d'autres, encore au stade du développement. C'est sur ces instruments que l'on retrouvera également plus loin embarqués sur des satellites, des avions et des ballons, que reposera notre capacité à comprendre l'évolution de la stratosphère. Il nous paraît donc important de les décrire. Ces instruments sont les suivants:

- a) Les Lidar pour la mesure de l'ozone, de la température et des aérosols et nuages stratosphériques;
- b) Les sondeurs micro-ondes pour l'ozone, la vapeur d'eau et le monoxyde de chlore (ClO);
- c) Les spectromètres ultra-violet et visibles pour la mesure des colonnes d'ozone, NO₂ et en région polaire OClO, BrO et la détection des nuages stratosphériques;
- d) Les spectromètres infra-rouge à Transformée de Fourier (FTIR) pour la mesure des colonnes d'ozone, HCl, NO, NO₂, ClONO₂ et HNO₃ etc...

Les Lidar

La technique du radar laser est la seule qui permette d'obtenir à distance une information à haute résolution spatiale (100 à 300m) sur la distribution verticale des paramètres mesurés. Elle consiste à émettre une impulsion laser puissante et collecter en retour le faible signal rétrodiffusé par l'atmosphère. L'altitude de diffusion est déterminée précisément par la durée qui sépare l'émission du retour du signal.

La distribution verticale de l'ozone est mesurée par Lidar par une technique d'absorption différentielle (DIAL) qui consiste à émettre simultanément à deux longueurs d'onde: à 308 nm à l'aide d'un laser excimer XeCl et à 335 nm avec un laser Nd-Yag. La très grande différence d'absorption de l'ozone entre ces longueurs d'onde, permet de déduire la concentration de ce constituant. Le bruit des mesures pour une altitude inférieure à 40 km est de moins de 3% et l'erreur absolue liée à la présence éventuelle d'aérosols ou d'absorbants parasites est de l'ordre de 10%. La mesure de l'ozone par Lidar a été mise au point en France par le CNRS où dès 1983 un appareil fonctionnait en mode de recherche à l'Observatoire de Haute Provence (OHP). Des mesures systématiques y sont maintenant conduites depuis 1986 et un instrument semblable sera installé en 1990 à la station Antarctique de Dumont d'Urville. D'autres Lidar

ozone sont maintenant en opération ou en développement aux Etats-Unis (NASA-JPL et NASA-GSFC), au Japon, en Allemagne (Spitzberg), au Canada et en Hollande.

La deuxième application stratosphérique du Lidar est la mesure de la température et des aérosols ou nuages stratosphériques. La mesure consiste à étudier le rayonnement rétrodiffusé d'un laser Nd-Yag émettant à 532 nm. En présence d'aérosols entre 9 et 28 km, le lidar permet d'obtenir un rapport de diffusion qui caractérise les couches d'aérosols ou en région polaire, les nuages stratosphériques. Au dessus de 30 km, la contribution des aérosols devient négligeable et le signal est rétrodiffusé uniquement par les molécules d'air (diffusion Rayleigh). Sa mesure en fonction du temps permet de remonter au profil vertical de densité et donc de température.

Des instruments de moyenne portée (30 km) destinés à la mesure des aérosols et à la détection des PSC sont en opération dans plusieurs pays dans le monde, en particulier en Antarctique au pôle Sud (Université de Rome) et à Dumont d'Urville (collaboration CNRS - Université de Florence).

Les instruments plus puissants nécessaires à la mesure de la température, ont été mis au point par le CNRS à la station de l'OHP dès 1985, date depuis la quelle des observations systématiques entre 30 et 85 km avec une précision de 2 K sont poursuivies. Plus récemment, des Lidar Rayleigh aux performances accrues (altitude maximum 100 km) sont entrés en opération au Centre d'Essais des Landes à Biscarosse et à bord du navire d'assistance du CEL, le Raymond Poincaré. Ces instruments sont commercialisés en France par la firme Lidaray. A l'étranger, la mesure de la température par Lidar a été entreprise aux Etats-Unis (NASA-GSFC), en Italie et au Japon.

Les Lidar peu sensibles à la pollution troposphérique, sont les seuls moyens existants et précis de mesure à distance des distributions verticales de température, ozone et aérosols dans la stratosphère. Bien qu'une fine couche de cirrus ne soit pas un obstacle, leur principale limitation est la présence des nuages en présence desquels ils sont aveugles.

Les sondeurs micro-ondes

La technique consiste à effectuer des mesures à haute résolution spectrale de l'émission des espèces atmosphériques dans l'infra-rouge lointain, c'est à dire dans le domaine micro-ondes. Les raies de rotation pure sont élargies par pression et il est donc possible d'en déduire des distributions verticales à basse résolution (6 à 7 km) des espèces. La technique micro-onde s'applique à l'ozone entre 20 et 75 km, à la vapeur d'eau entre 20 et 85 km et à ClO entre 25 et 45 km avec des précisions respectives de l'ordre de 4, 6 et 10%.

Son développement est essentiellement d'origine américaine (NASA-Langley, NASA-JPL, State University New-York, Naval Research Laboratory, Penn State). En Europe, des observations micro-ondes sont effectuées par des groupes allemand et suisse et en France par l'Université de Bordeaux. Un instrument a été commercialisé aux Etats-Unis par la firme Millitech Corporation.

L'intérêt des sondeurs micro-ondes est qu'ils autorisent des mesures de jour comme de nuit et ne sont pas directement sensibles aux nuages. Ils sont par contre très limités par la présence de vapeur d'eau et demandent donc des sites à haute altitude. Pour ClO, il est vraisemblable que seuls des sites polaires à très basse température et à haute altitude comme l'intérieur du Groenland, la station américaine du Pôle Sud ou la station française du Dôme C, puissent convenir.

Spectromètres ultra-violet et visible

Les instruments uv-visible mesurent l'absorption par l'atmosphère de la lumière directe du soleil ou de la lune ou celle qui est diffusée au zénith. La quantité d'absorbant suivant la ligne de visée est obtenue par comparaison avec des spectres caractéristiques de chaque espèce, mesurés en laboratoire. Elle est traduite en colonne verticale par une méthode d'inversion qui tient compte de la géométrie du parcours optique de la lumière. Elle donne accès aux constituants suivants: ozone (3%) où en particulier dans le domaine visible elle permet de poursuivre les observations en hiver jusqu'au cercle polaire, NO₂ (5%) dont elle permet d'étudier la variation diurne, OClO (10%), BrO (10%), NO₃ de nuit uniquement, la vapeur d'eau troposphérique et O₄ le dimère de l'oxygène avec le quel une méthode a été imaginée pour mesurer l'altitude des nuages stratosphériques. En mode zénithal la méthode est insensible à la présence de nuages, elle permet des observations par tous les temps.

Quatre groupes de recherche ont développé ces dernières années des spectromètres uv-visible: le NOAA aux USA, le DSIR en Nouvelle Zélande, le Max Planck Institute en RFA et le CNRS en France, qui dispose d'appareils fonctionnant en permanence depuis 1988 en Antarctique à la station de Dumont d'Urville, sur le navire polaire l'Astrolabe, au Groenland et en Finlande. Un spectromètre uv-visible a été commercialisé en France par la firme Atmos Equipement, qui équipe la Norvège, le Danemark et le British Antarctic Survey.

Spectromètres infra-rouge à Transformée de Fourier

La spectroscopie infra-rouge à haute résolution est une technique qui permet la mesure de la colonne verticale de nombreux constituants atmosphériques. Elle consiste à observer l'absorption par l'atmosphère de la lumière solaire à grande distance zénithale, dans le domaine 700-5000 cm^{-1} ou 2-14 microns. De très nombreuses molécules présentent des signatures spectrales de bandes de vibration-rotation identifiées au laboratoire. Le profil des raies dépendant de la pression et de la température, il est nécessaire pour interpréter les observations de disposer de mesures simultanées de la distribution verticale de température et d'une estimation de celle de l'espèce mesurée. La précision varie largement avec le constituant observé. Elle peut être meilleure que 1% pour certains d'entre eux comme HNO_3 ou HCl . Elle se dégrade sensiblement pour les espèces faiblement absorbantes, par exemple ClONO_2 .

Les composés traces observables ainsi que leur détectabilité (B bonne, AB assez-bonne, F faible) sont les suivants:

Oxydes d'azote: $\text{NO}(\text{B})$, $\text{NO}_2(\text{B})$, $\text{HNO}_3(\text{B})$, $\text{N}_2\text{O}_5(\text{F})$, $\text{HO}_2\text{NO}_2(\text{F})$, $\text{ClONO}_2(\text{AB})$

Halogènes: $\text{HCl}(\text{B})$, $\text{HF}(\text{B})$, $\text{HOCl}(\text{AB})$, $\text{ClO}(\text{F})$

Sources: $\text{O}_3(\text{B})$, $\text{H}_2\text{O}(\text{B})$, $\text{CH}_4(\text{B})$, $\text{N}_2\text{O}(\text{B})$, $\text{CO}(\text{B})$, $\text{CO}_2(\text{B})$, $\text{OCS}(\text{B})$, $\text{HCN}(\text{B})$, $\text{C}_2\text{H}_6(\text{B})$, $\text{C}_2\text{H}_2(\text{B})$

Sources halogénées: $\text{CCl}_2\text{F}_2(\text{B})$, $\text{CCl}_3\text{F}(\text{B})$, $\text{CHClF}_2(\text{B})$, $\text{CH}_3\text{Cl}(\text{F})$, $\text{CH}_3\text{CCl}_3(\text{F})$, $\text{CCl}_4(\text{AB})$, $\text{CF}_4(\text{F})$

La longueur de cette liste montre bien l'intérêt de la spectroscopie IR pour la surveillance de la stratosphère depuis le sol. On soulignera cependant qu'elle nécessite l'observation du soleil proche de l'horizon c'est à dire le grand beau temps, qu'elle est sensible à la pollution troposphérique et à la présence de vapeur d'eau et que par conséquent que le site d'observation doit être en altitude. Il s'agit d'une méthode bien adaptée à l'obtention d'un nombre limité de mesures chaque année mais sur une très longue durée.

Les laboratoires qui ont le plus contribué au développement de ces techniques sont l'Université de Denver, le groupe du NCAR qui l'utilise en avion et l'Observatoire de Liège qui effectue des observations depuis plus de quinze ans à la Jungfraujoch en Suisse. En France, on trouve le Laboratoire de Physique Moléculaire Atmosphérique de Paris VI et l'Université de Reims qui collaborent fréquemment avec les instituts étrangers précédemment cités.

Les Réseaux

Il est bien évidemment tentant de regrouper les observations des instruments précédents en réseaux. Ceci n'est cependant pas toujours possible du fait de l'inhomogénéité des techniques instrumentales mais surtout des contraintes financières et opérationnelles.

La nécessaire surveillance de la stratosphère s'oriente à l'heure actuelle dans la direction suivante: a) des réseaux de petits instruments proches ou identiques et relativement peu coûteux répartis avec une maille géographique parfois serrée pour l'étude de mécanisme à moyenne échelle (exemple: le réseau européen en cours d'implantation d'une dizaine de spectromètres uv-visible en Arctique, du Groenland à l'Union Soviétique, pour la campagne européenne d'étude de l'ozone arctique en hiver 1991-92); b) un réseau mondial de surveillance de la stratosphère à long terme constitué de l'ensemble des instruments décrits plus haut dans 6 ou 7 sites soigneusement sélectionnés. Ce réseau NDSC (Network for Detection of Stratospheric Changes) a pour objectif le suivi de l'évolution de chacune des espèces mesurables depuis le sol, le contrôle des étalonnages des satellites et l'obtention de données destinées à la validation des modèles de simulation multi-dimensionnels.

Le problème le plus important posé par ce réseau est le maintien de la qualité des données, des traitements et des étalonnages sur une très longue période: 20 ans. Pour prétendre y parvenir il apparaît nécessaire que ce réseau ne soit pas placé sous le contrôle d'un organisme opérationnel international mais que chaque instrument et les données qui en sont issues, soient directement contrôlés par une équipe de recherche associée à la discussion et la publication des résultats. Une organisation qui regroupe l'ensemble des expérimentateurs et des modélistes ainsi que les représentants des agences nationales et internationales (UNEP, WMO) impliquées directement dans le projet, a été proposée.

A cause de sa contribution passée majeure, la première station sélectionnée a été celle du groupe alpin: Observatoire de Haute Provence, Station Scientifique de la Jungfrauoch en Suisse et Hoenpeissenberg en RFA. La deuxième virtuellement sélectionnée, est la station américaine de Mauna Loa à Hawaii. Une autre pourrait être placée en altitude sur le continent américain et enfin une quatrième en Nouvelle Zélande. La situation en région polaire n'est pas définie. Alert, Thulé et le Spitzberg sont candidats dans le nord. La station qui pourrait être la mieux placée en Antarctique serait la base française du Dôme C en construction. Aux tropiques, il est difficile de trouver un site convenable pour tous les instruments. L'île de la Réunion est envisagée.

Les observations en orbite

Bien que les contraintes spatiales limitent les capacités d'emport, on retrouve pour l'essentiel en orbite les techniques de sondage à distance des instruments au sol. Sans entrer dans les détails, en voici les principaux traits et limitations.

L'ozone est mesuré en absorption dans l'ultra-violet, dans le visible et l'infra-rouge.

La méthode la plus courante est la visée au nadir (verticale vers le bas) dans l'ultra-violet à l'aide d'un appareil fonctionnant sur le même principe que le Dobson, c'est à dire par observation dans des canaux spectraux discrets entre 255 et 380 nm. Il s'agit de l'instrument TOMS pour Total Ozone Mapping Spectrometer embarqué à bord du satellite américain NIMBUS 7, qui a fourni depuis 1978 l'essentiel des cartes quotidiennes d'ozone connues du grand public et chaque année une description détaillée du trou d'ozone en Antarctique. La précision à court terme de TOMS est excellente: de l'ordre de 2%. Deux difficultés dans l'interprétation des données sont cependant apparues: a) une dérive systématique de l'étalonnage de l'appareil due à une dégradation du dispositif de diffuseur placé à l'entrée de l'instrument sous l'effet du rayonnement ultra-violet solaire; b) une erreur systématique dans l'inversion des mesures lorsque le soleil est bas sur l'horizon qui serait due à un problème réel de physique atmosphérique et non instrumental. La dérive de l'ordre de 1% par an bien que corrigée, a pour conséquence l'introduction d'une incertitude de l'ordre de 2% sur les tendances à long terme de l'ozone, c'est à dire du même ordre de grandeur que la quantité à mesurer. Le deuxième conduirait à une surestimation du creusement du trou d'ozone au printemps en Antarctique jusqu'à 30%. Dans un premier temps et conscients des difficultés d'interprétation des mesures en incidence rasante, les expérimentateurs de TOMS avait rejeté les observations des régions polaires. Ces données ont été reprises après la découverte du trou d'ozone par les britanniques, mais ont vraisemblablement été sur-interprétées. TOMS n'en demeure pas moins un instrument précieux qui seul permet une vue globale quotidienne de la distribution de l'ozone. Un exemplaire de TOMS sera lancé en 1991 sur un satellite soviétique METEOR III, un autre trois ans plus tard sur le satellite Japonais ADEOS et enfin un troisième encore trois ans plus tard sur un METEOR soviétique.

Un autre appareil de visée au nadir, SBUV pour Solar Backscattered UV, est placé sur Nimbus 7. Il comporte 12 canaux de mesures entre 255 et 340 nm ce qui lui confère une possibilité de restitution de la distribution verticale de l'ozone par inversion de la variation des radiances en fonction de la longueur d'onde. De nombreux profils verticaux ont été obtenus avec cependant une tendance systématique à placer le maximum d'ozone plus bas en altitude que les mesures in-situ en ballon. La précision des mesures est de l'ordre de 8% au dessus de

22 km et de 15% en dessous avec une tendance systématique à une sous évaluation de 8% environ. SBUV a malheureusement essuyé un problème de dérive d'étalonnage identique à celui de TOMS mais en plus grave qui le rend difficilement utilisable pour l'étude des tendances de l'ozone. Un appareil proche de SBUV a été utilisé un temps en orbite (1985-87) par les Japonais à bord du satellite EXOS-C.

La mesure la plus précise (5 à 10% suivant les altitudes) de la distribution verticale de l'ozone est due aux instruments américains SAGE I et II (Stratospheric Aerosols and Gas Experiment, missions AEM en 1979 et ERBS en 1984) à l'interprétation desquels le Laboratoire d'Optique Atmosphérique de Lille est étroitement associé. Les instruments SAGE opèrent par occultation solaire directe, c'est à dire par observation du soleil au lever et au coucher. L'inversion des observations pour obtenir un profil vertical est directe. Elle ne dépend pas d'un modèle de transfert radiatif. Les instruments SAGE disposent de 6 canaux discrets dans le visible qui permettent la mesure de l'ozone, de NO₂ et des aérosols. L'inconvénient de cette technique est que le nombre d'occultation solaire est limité en particulier à haute latitude durant la nuit ou le jour polaire. Une couverture géographique complète de 60°N à 60°S nécessite un mois d'observations. La deuxième remarque est que SAGE I s'est arrêté en 1981 et qu'il n'existe donc aucun recouvrement entre les deux jeux de données d'instruments quand même un peu différents. L'erreur systématique de 4% dans la comparaison des mesures d'ozone des deux instruments est due à ce fait. En ce qui concerne NO₂ dont les mesures ne sont précises qu'au dessus de 22 à 25 km, l'augmentation de concentration qui avait été constatée entre SAGE I et II est totalement dans l'incertitude instrumentale.

D'autres instruments de mesure d'ozone total existent. Il s'agit du radiomètre infra-rouge TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder) embarqué sur le satellite NOAA 10 ainsi que des instruments semblables sur la série soviétique des METEOR. Ces appareils transmettent des cartes de radiance infra-rouge à petite échelle qui pourraient être précieuses par exemple pour l'étude des mini-trous d'ozone ou bien durant la nuit polaire dans laquelle tous les autres appareils sont aveugles. De plus ils permettent d'identifier les nuages stratosphériques polaires. Malheureusement les algorithmes d'inversion des mesures sont tels que de grandes différences existent avec les observations depuis le sol ou à bord d'autres satellites. Le Centre de Recherche Météorologiques à Toulouse a réussi à surmonter ces difficultés et des cartes détaillées d'ozone à petite échelle sont maintenant disponibles.

Les autres instruments actuellement en orbite et intéressant la stratosphère sont SAM II qui transmet des profils verticaux d'aérosols et de nuages stratosphériques obtenus par occultation solaire et donc uniquement au dessus des régions éclairées du globe et les précieux sondeurs radiométriques infra-rouge opérationnels (Stratospheric Sounding Unit ou SSU) qui

transmettent des radiances infra-rouge à plusieurs altitudes d'où sont issues les analyses en temps réel des champs de température et de pression.

Par le passé d'autres instruments ont été embarqués pour des durées souvent plus limitées, mais qui ont fortement contribué au développement des connaissances sur la stratosphère:

- Le radiomètre infra-rouge LIMS observant au limbe (à l'horizon) et qui limité par ses capacités cryogéniques a fonctionné 8 mois en 1978 à bord de Nimbus 7 durant lesquels il a transmis simultanément les distributions verticales et en latitude de NO_2 , O_3 , HNO_3 et H_2O ; Le radiomètre SAMS à bord du même satellite a permis de mesurer CH_4 , N_2O et H_2O de 1978 à 1982.
- Le spectromètre à Transformée de Fourier ATMOS de NASA JPL a obtenu au cours du vol Spacelab d'une semaine de la navette américaine, le profil vertical de 20 espèces différentes y compris pour la première fois de N_2O_5 , malheureusement à une seule latitude dans l'hémisphère nord et une autre mais seulement le matin dans l'hémisphère sud. ATMOS a effectué un second vol en 1987 (SL3) et doit en effectuer un nouveau au printemps 1991 durant la mission ATLAS.
- Le satellite SME (Solar Mesosphere Explorer) de l'Université du Colorado qui par des mesures de diffusion au limbe dans l'ultra-violet et le visible difficiles à interpréter, a obtenu de longues séries de données d'ozone au-dessus de 50 km et de NO_2 de jour au-dessus de 25 km.

Les autres instruments sont à l'état de projets plus moins avancés. En ce qui concerne la stratosphère, le programme le plus important est UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) dont le lancement devrait intervenir à la fin de l'année 1991 et qui comporte de nombreux instruments destinés à la mesure des espèces azotées, chlorées, hydrogénées ainsi que la température, les vents et l'ozone. Le CNRS est associé à l'instrument canadien WINDII de mesure de la vitesse des vents à haute altitude. Autour de UARS est construit un réseau de distribution et d'analyse de données en temps réel dont le CNRS et le CNRM (Centre National de Recherche Météorologique) sont parties prenantes. Un dernier aspect est celui de la validation des observations et des algorithmes pour lequel un programme spécial (UARS Correlative Measurements Program) a été mis sur pied. Plus d'une dizaine d'équipes françaises y sont associées pour des observations depuis le sol et en ballons, et des modélisations photochimiques et dynamiques. Si beaucoup est attendu de ce programme en ce qui concerne les mécanismes et la photochimie de la stratosphère, il faut indiquer que UARS n'est pas un satellite en orbite polaire et que par conséquent les informations sur ces régions seront limitées.

Les autres projets sont par ordre chronologique: METEOR III (URSS) avec un instrument américain TOMS à bord au mois d'août 1991; GOME, spectromètre uv-visible non encore décidé, visant au nadir sur ERS 2 (ESA) en 1994, ADEOS (Japon) en 1995 avec un instrument TOMS et vraisemblablement un spectromètre infrarouge pour visée au limbe, GOMR un dérivé de TOMS amélioré sur un satellite TIROS de la NOAA vers 1995, SAGE III (USA), SCIAMACHY (RFA) et GOMOS (France) tous candidats pour voler sur l'une ou l'autre des plate-formes polaires américaines vers 1996 et européenne vers 1998 et peut-être GLOBSAT, projet français basé sur l'utilisation d'une plate-forme SPOT dont une partie serait tournée vers l'étude de la stratosphère.

Expériences embarquées sur avions

L'intérêt de l'emploi d'avions est de pouvoir effectuer des coupes en latitude. Les types d'instruments embarquables sont évidemment très liés aux performances des avions, que l'on peut classer ainsi: a) les avions troposphériques à bord desquels on ne peut effectuer que des mesures à distance dans la stratosphère par exemple lidar, spectromètres infra-rouge et uv-visible; b) les avions planeurs stratosphériques dans les quels on pourra effectuer des mesures in-situ mais automatiques sans personnel à bord.

Dans la première catégorie on placera un DC8 et un Convair de la NASA, un Iliouchine 18 en URSS, un Falcon 50 et un Transall en RFA, la Caravelle du CEV et le Fokker de l'INSU. Dans la seconde beaucoup plus coûteuse, on trouve l'ER2 de NASA-Ames transformation d'un U2, un M-17 qui sera suivi d'un M-55 en 1991 en URSS, capables d'embarquer 400 kg d'instrument à 20-22 km d'altitude pour quelques heures. La RFA cherche à employer pour les recherches stratosphériques un avion militaire de type Egrett (altitude maximum 16 km).

Les américains ont effectué depuis plusieurs années des missions de mesures de nuages stratosphériques et de spectrométrie infra-rouge à l'aide du Convair. Mais les campagnes aéroportées les plus remarquables ont été les programmes AAOE, (Airborne Antarctic Ozone Experiment) en 1987 et AASE (Airborne Arctic Stratospheric Expedition) en 1989. Par une programmation détaillée des vols simultanés du DC8 et de l'ER2 à plus haute altitude, elles ont permis d'obtenir une moisson de résultats en ce qui concerne la destruction de l'ozone polaire.

En France, la Caravelle du CEV a été utilisée pour la mesure des distributions en latitude de NO, NO₂ et HNO₃ à l'aide d'un spectromètre à grille de l'ONERA durant les campagnes STATOZ I, II et III en 1982, 1985 et 1987 avec de très jolis résultats. Un laser du CNRS,

Léandre, pour la mesure des aérosols puis plus tard celle de l'ozone, a fait ses premiers essais sur le Fokker de l'INSU en 1990. Il doit participer, ainsi que des instruments embarqués sur un avion allemand (Transall et peut être Egrett) à une campagne européenne d'étude de l'ozone en Arctique en hiver 1991-92.

Vois en ballons

Du point de vue des recherches sur la stratosphère, l'avantage des ballons est de pouvoir se rendre dans le milieu. Il en existe de deux types: a) les ballons stratosphériques ouverts permettant d'emporter jusqu'à 2 tonnes à 40 km pour quelques heures; b) les ballons de longue durée: 50 kg, 30 km, 2 mois.

Ballons stratosphériques

Les premiers, ouverts pour évacuer le trop plein de gaz sans exploser, sont construits en polyéthylène. Ils sont gonflés à l'hydrogène ou à l'hélium et comportent souvent une soupape et du lest pour être pilotés en altitude. Leur volume peut atteindre 2 millions de m³, c'est à dire une dimension de 300 m au décollage. Les nacelles sont récupérées sous parachute à la fin du vol. Les deux pays qui maîtrisent le mieux ces technologies sont les USA et la France bien qu'une activité de vols en ballons existe également en Inde, Chine, Japon, Indonésie, Canada et URSS. En France les opérations ballons sont conduites par le CNES qui dispose d'un centre de lâcher permanent à Aire sur l'Adour dans les Landes, d'une station saisonnière à Gap-Tallard et effectue fréquemment des campagnes extérieures au Brésil, en Australie et sur la base permanente de l'ESA: l'ESRANGE à Kiruna dans le nord de la Suède. Le nombre total de vols en France est de l'ordre de 30 à 40 par an en confondant les objectifs atmosphériques et astronomiques.

Du fait de l'emploi aisé des ballons, de la durée brève de préparation comparée à celle des instruments satellitaires et du coût relativement modéré, une grande variété d'appareils embarquent sous ballons: tout d'abord les instruments de mesure à distance: spectromètres infra-rouge, uv et visible pour des observations par occultation solaire et stellaire, sondeurs micro-ondes et lidars, sur les quels nous ne reviendront pas et ensuite des instruments de mesure in-situ. Parmi ceux-ci, les conteneurs de prélèvements cryogéniques qui volent systématiquement une fois ou deux par an ont permis de mesurer les distributions verticales des espèces sources (CH₄, N₂O et l'ensemble des CFC) et leur évolution d'une année sur l'autre. On peut citer encore les mesures in-situ d'ozone par photométrie locale dans l'ultra-violet, les plus précises (3% en valeur absolue) ou par chimiluminescence, les mesures de NO par

chimiluminescence et de l'ensemble de NO_x convertis en NO par un réducteur, celles de HO₂ par prélèvement sur matrices cryogéniques suivies d'une analyse par résonance de Spin électronique, les mesures de vapeur d'eau par hygromètre à point de givre et par résonance fluorescente etc...

En France les groupes de recherche participant à ces travaux sont le Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement d'Orléans, le Laboratoire de Physique Moléculaire Atmosphérique de Paris VI, le Laboratoire d'Optique Atmosphérique de Lille, Le Laboratoire de Météorologie Dynamique de l'École Polytechnique et le Service d'Aéronomie du CNRS.

Pour faciliter la comparaison des résultats et l'interprétation d'observations complémentaires, le travail est souvent organisé en campagnes internationales avec une forte participation d'instruments au sol et en orbite. Les validations des observations satellitaires de SAGE, SBUV, EXOS-C, SME sont les produits des campagnes BOIC, BIC (Balloon Intercomparison Campaign) aux USA en 1982 et 83 et GLOBUS en France en 1981, 1983 et 1985 qui ont réuni jusqu'à 40 instruments de toutes origines.

En ce qui concerne l'étude de l'ozone polaire, il n'est pas possible de voler et de récupérer les appareils en Antarctique si bien que toute l'activité de ballons qui seule permet la mesure de la distribution verticale des espèces, est concentrée à l'ESRANGE à Kiruna. La division ballons du CNES a mis au point une technologie particulière permettant des vols aux très basses températures (-90°C) des régions polaires. Des vols CHEOPS (Chemistry of Polar Stratosphere) soutenus conjointement par le programme PAMOY du CNRS d'étude de l'atmosphère moyenne et le Ministère de la Recherche allemand, le BMFT, ont été effectués en 1987, 1988, 1989 et 1990. Des vols en ballons en Arctique sont également effectués par les Canadiens à Alert (80°N).

Les ballons de longue durée

Ces ballons, totalement différents des premiers, sont de deux types: soit des ballons étanches et pressurisés en terphane retenus par un ensemble de sangles en kevlar et gonflés à l'hélium, soit des ballons en terphane aluminisé sans gaz, dont la force ascensionnelle est entièrement due à la captation du rayonnement infra-rouge qui monte du sol ou des nuages et qui portent le nom de Montgolfière Infra-Rouge. L'un et l'autre ont été imaginés en France et étudiés par la Division Ballons du CNES. Les premiers sont encore en développement. Les seconds qui ont effectué en 1989 des vols de 50 à 70 jours en région tropicale, sont maintenant opérationnels. Ils vont permettre d'avoir enfin accès à une région pratiquement inaccessible du

globe, la zone de convergence intertropicale ou "Fontaine stratosphérique" au voisinage de la Micronésie où se rencontrent les énormes nuages convectifs qui pourraient bien être à l'origine d'une injection rapide de l'air troposphérique dans la stratosphère. (voir chapitre Incertitudes).

Les modèles de simulation

La complexité des mécanismes physico-chimiques fait que l'analyse des données d'observation repose sur l'emploi de modèles numériques de simulation. Une fois validés par les observations, ceux-ci permettent alors d'effectuer des projections sur l'avenir et donc des prédictions à plus ou moins long terme.

Disons tout de suite qu'il n'existe pas de modèle capable de simuler simultanément tous les mécanismes chimiques, radiatifs et dynamiques à toutes les échelles de temps et d'espace, mais un variété d'approches plus ou moins simplifiées qui permettent de rendre compte d'une partie des problèmes.

Le plus simple d'entre eux est le modèle à zéro dimension, c'est à dire le calcul en un point de l'espace de l'évolution de la photochimie en fonction du temps avec un pas de temps aussi petit que l'on veut: la seconde, la minute ou la dizaine de minutes. Si l'on répète cet exercice à plusieurs niveaux d'altitude on obtient un modèle à une dimension. L'intérêt de cette approche réside dans l'étude des phénomènes photochimiques rapides comme les cycles diurnes ou les variations crépusculaires en tenant compte en détail des variations d'éclairement, de la diffusion de la lumière simple ou multiple. On peut y introduire une chimie aussi complexe que l'on veut. Leur limite est qu'ils ne comprennent au mieux qu'un transport vertical moyen ajusté sur les observations de distributions verticales des espèces sources et qui ne représente aucune réalité physique. Leur domaine d'application est donc restreint à l'étude des phénomènes photochimiques dont la constante de temps est inférieure à celle des termes de transport. Il en existe de nombreux dans le monde. En France le Laboratoire de Physique et Chimie d'Orléans en a mis un performant au point, utilisé en particulier pour la simulation des observations de constituants chimiques actifs en ballon.

Le degré de complexité suivant est le modèle 2D ou à deux dimensions: altitude et latitude. Les transports méridionaux et verticaux moyens sont introduits par une paramétrisation ajustée encore fois sur la distribution des espèces sources c'est à dire de traceurs passifs. Comme il n'est plus possible de calculer explicitement les phénomènes photochimiques rapides, les variations diurnes sont paramétrisées au préalable à l'aide des modèles 1D. Ces modèles supposent par définition une homogénéité zonale dans la distribution des températures, vent et

constituants. C'est à l'aide des modèles 2D que sont étudiés les cycles photochimiques longs à l'échelle du mois, de la saison, de l'année et les tendances à long terme. C'est à eux que l'on doit la plus grande part des prédictions. Ils représentent à l'heure actuelle le meilleur compromis possible entre une photochimie pas trop simplifiée et un transport réaliste. On soulignera cependant qu'ils négligent tous les inhomogénéités de distribution en longitude et tous les phénomènes de transport à une courte échelle de temps (de l'ordre du mois). En France deux modèles de ce type existent au Service d'Aéronomie tous deux originaires des USA, le premier de NOAA et le second du NCAR.

Les modèles à trois dimensions ou 3D sont essentiellement les modèles de prévision météorologique étendus en altitude dans la stratosphère et la mésosphère dans lesquels une photochimie très simplifiée est introduite. Le nombre de niveaux et de points de grille c'est à dire la résolution spatiale n'est limitée que par la puissance des calculateurs. Ils peuvent être globaux, hémisphériques ou locaux à l'échelle d'une région et même enchaînés c'est à dire que le calcul local à maille fine est initialisé à partir du modèle global. Ces modèles permettent de rendre compte des inhomogénéités zonales, de l'influence des continents, des montagnes, avec cependant la même limitation que tous les modèles météorologiques c'est à dire qu'ils ne permettent de rendre compte de l'influence des phénomènes à échelle spatiale inférieure à leur maille. Cette approche est indispensable si l'on veut par exemple étudier le phénomène de diffusion du trou d'ozone à l'échelle hémisphérique. La complexité de ces modèles fait qu'il n'en existe qu'une poignée dans le monde: en France celui du Centre National de Recherche Météorologique à Toulouse.

Enfin il existe en Grande-Bretagne dont la réputation dans le domaine de la météorologie n'est plus à faire, deux approches originales de la simulation de la stratosphère qui ont conduit leurs auteurs à des travaux remarquables:

- L'approche de l'Université de Cambridge consiste en un modèle à trois dimensions mais dont la coordonnée verticale n'est plus la pression mais la température potentielle, c'est à dire la température d'une masse d'air ramenée à une pression de 1000 mb par compression adiabatique. L'intérêt de cette approche est la suivant. Dans la stratosphère, l'échange radiatif entre une masse d'air et son milieu environnant est extrêmement faible. On peut donc considérer au moins sur une période de 10 à 20 jours, que son entropie, c'est à dire sa température potentielle demeure constante. Dans ce type de coordonnées on identifie une quantité mathématique, la vorticité potentielle ou rotationnel du champ de vent calculé sur une surface de température potentielle constante, qui possède l'étonnante propriété d'être conservative. La vorticité potentielle connue sous le nom de "PV" est donc un véritable traceur atmosphérique. Cette propriété vérifiée par l'expérience, est mise à profit pour l'étude par exemple des

intrusions d'air stratosphérique dans la troposphère mais surtout pour simuler la diffusion et l'érosion du trou d'ozone antarctique au printemps à l'échelle de l'hémisphère sud.

- L'approche du Met Office à Bracknell repose sur la même idée de trajectoires isentropes ou à température potentielle constante que la précédente sur les quelles vont être simulés les mécanismes photochimiques. En pratique la trajectoire d'une masse d'air individualisée dans les trois dimensions de l'espace sur par exemple 15 jours va être calculée à l'aide d'un modèle à 3 dimensions puis dans un deuxième temps, les phénomènes photochimiques seront simulés le long de cette trajectoire à l'aide d'un modèle à zéro dimension aussi complexe que l'on voudra. C'est par cette approche qu'on pu être simulés non seulement les réactions chimiques hétérogènes conduisant à la destruction de l'ozone mais également la microphysique de la condensation ou de la vaporisation des nuages stratosphériques polaires lorsque l'air se refroidit ou s'échauffe durant les déplacements verticaux adiabatiques liés à la présence des ondes planétaires.

Conclusion

Nous pensons avoir montré dans ce chapitre l'extraordinaire variété des moyens existants et nécessaires à l'étude sur le terrain d'un phénomène aussi complexe que le rôle des CFC dans la perturbation de l'équilibre de l'atmosphère. Il faudrait y ajouter la contribution des chimistes de laboratoire pour qui l'effort que représente à l'heure actuelle l'étude de la photochimie hétérogène est un véritable recyclage. Ces moyens sont cependant insuffisants puisqu'il existe encore de larges zones d'ombre dans la physico-chimie de la stratosphère dont on a pu se convaincre en lisant le chapitre consacré à la discussion des incertitudes sur les mécanismes de destruction de l'ozone.

7. PREDICTION DE L'EVOLUTION DE LA CHARGE EN CHLORE DE LA STRATOSPHERE ET DE SON IMPACT SUR LA COUCHE D'OZONE - CAS DES CONSTITUANTS REGLEMENTES PAR LE PROTOCOLE DE MONTREAL OU DEJA EN USAGE

Le seul outil qui permette d'évaluer l'évolution future de la couche d'ozone est la modélisation numérique avec toutes les limites qu'imposent une connaissance imparfaite des processus élémentaires et la difficulté de simuler un système aussi complexe que celui de l'ensemble de la planète Terre. Dans l'état actuel des connaissances, la modélisation se limite d'ailleurs à la simulation plus ou moins exacte des différents réservoirs pris séparément, troposphère, stratosphère, océan. Un modèle couplé de l'environnement terrestre incluant également la biosphère, ne sera probablement pas réalisé avant la fin de ce siècle.

Si l'on se restreint à la seule atmosphère, l'histoire même de cette modélisation prédictive doit inciter à la modestie. Dès les premières alarmes concernant la couche d'ozone au début des années 1970, et sans parler du problème spécifique de l'aviation supersonique, les prédictions se multiplient. En 1975, le consensus général s'établit autour d'une diminution d'environ - 15% de la couche d'ozone à un terme de l'ordre de cinquante ans à la condition de maintenir constantes, au niveau atteint en 1974, les émissions des chlorofluorocarbures. Deux ans plus tard, en 1976, la diminution prédite n'est plus que de - 7%, pour repasser à - 20% en 1978, toujours pour les mêmes conditions d'émission. Ces variations reflètent l'évolution des connaissances, les nouvelles mesures des coefficients de réaction, ou la prise en compte de processus élémentaires jusque là inconnus. En 1981, la quantification des couplages étroits entre les différentes familles de constituants permet de comprendre qu'une partie importante des espèces chimiquement actives et donc susceptibles de détruire l'ozone, peuvent être stockées sous forme de réservoirs tels que le nitrate de chlore ou l'acide pernitrique. La diminution de la couche d'ozone à l'équilibre pour une émission des chlorofluorocarbures maintenue constante dans le temps au niveau de 1974 se stabilise alors, dans les prédictions, à environ -5% à -7%.

D'emblée des limitations importantes sont donc fixées quant à la capacité d'extrapolation fondée sur la modélisation numérique. Et ce d'autant plus que l'augmentation des constituants chlorés ne constitue pas la seule perturbation liée aux activités humaines. C'est l'ensemble des modifications de la composition chimique de l'atmosphère qui doit être pris en compte. Ainsi l'augmentation du gaz carbonique conduit à une intensification de l'émission du rayonnement dans le domaine des longueurs d'onde infrarouges dont ce constituant est le principal responsable. La stratosphère se refroidit. C'est l'effet inverse de celui qu'une augmentation du gaz carbonique produit dans la troposphère, le réchauffement étant lié à la réémission vers la

surface terrestre d'une partie du rayonnement émis. La diminution de quelques degrés de la température stratosphérique limite alors directement l'efficacité des réactions chimiques et conduit en fait à un ralentissement des cycles catalytiques de destruction de l'ozone. Cet effet "bénéfique" dit de contre-réaction négative, contrebalance en partie l'augmentation des constituants chlorés.

De même, les concentrations de protoxyde d'azote et de méthane, sources principales des constituants azotés et hydrogénés chimiquement actifs, augmentent. L'effet direct de cet accroissement est alors une capacité accrue de destruction de l'ozone par l'intermédiaire des cycles catalytiques qui font intervenir les espèces oxydées HOx et NOx. Mais dans le même temps ces constituants vont également limiter en partie l'activité des constituants chlorés en augmentant les possibilités de stockage sous forme d'espèces réservoirs. Effets négatifs et positifs interfèrent, qui rendent la réponse du système fortement non linéaire. Il ne suffit plus d'ajouter les effets individuels des perturbations pour obtenir une évaluation précise de la perturbation finale.

De plus, d'autres effets de réaction, positifs ou négatifs sont eux directement associés à la variation de l'ozone lui-même. En effet, toute modification de la répartition spatiale de l'ozone entraîne une modification de la structure thermique de la stratosphère et par la même de toute la circulation induite par les échanges d'énergie entre régions chaudes et régions froides. La redistribution qui s'ensuit va entraîner à son tour une différenciation suivant l'altitude et la latitude des effets attendus, que seule la modélisation bi-dimensionnelle permet d'apprécier.

Enfin un dernier mécanisme correcteur doit être introduit qui concerne directement la transmission du rayonnement solaire dans la stratosphère. Si l'ozone diminue à haute altitude, entre 35 et 50 kilomètres, la transparence de l'atmosphère au rayonnement solaire ultra violet augmente et le flux disponible à plus basse altitude pour photodissocier l'oxygène moléculaire s'accroît. Une production supplémentaire d'ozone apparaît ainsi à plus basse altitude entre 30 et 35 kilomètres qui peut compenser pour une faible part la diminution survenue à plus haute altitude. Cet effet, connu en anglais sous le nom de "self-healing", littéralement "auto-guérison", est fortement dépendant de l'inclinaison du rayonnement solaire qui détermine la profondeur de pénétration de la lumière ultra-violette et donc de la latitude. Lui aussi ne peut être correctement pris en compte que dans les modèles bi-dimensionnels.

Indépendamment des incertitudes inhérentes au modèles de prédiction, il reste à évaluer l'évolution future de la composition chimique de l'atmosphère, principal paramètre du forçage anthropogénique. Elle dépend pour l'essentiel des variations prévisibles des taux d'émission des constituants sources, méthane, protoxyde d'azote, constituants organo-halogénés. Différents scénarii peuvent donc être envisagés afin d'examiner de la façon la plus exhaustive

possible l'impact des mesures de régulation et de contrôle sur l'évolution de la couche d'ozone. Ces scénarii ne doivent cependant pas être considérés comme une prévision de l'état de l'atmosphère. Il s'agit uniquement d'évaluer les implications des différentes stratégies de contrôle, et l'objectif est donc d'évaluer le domaine de variation de la charge en chlore et en brome et d'étudier la réponse potentielle de la couche d'ozone. Ces prédictions, fondées sur les résultats de simulation numériques effectuées dans le cadre du rapport scientifique sur la couche d'ozone PNUE/OMM de 1990, doivent également être considérées avec précaution compte tenu des limitations déjà évoquées des modèles de simulation. Ainsi, les prédictions des changements de concentration d'ozone ou de température vers 40 km à l'échelle globale sont certainement plus crédibles que les variations en fonction de la latitude, du fait notamment de la non prise en compte des processus de chimie hétérogène dans les modèles actuels.

Dans un premier temps, les scénarii envisagés concerneront uniquement les composés organo-halogénés actuellement utilisés, afin de mesurer l'impact des mesures de régulation prises lors de la signature du Protocole de Montréal sur l'évolution de la couche d'ozone et du flux solaire ultra-violet susceptible de parvenir jusqu'au sol. La part relative prise aujourd'hui par les différents constituants organo-chlorés dans la charge totale en chlore de l'atmosphère est rappelée dans le tableau suivant.

Sources industrielles	Part relative dans la charge en chlore (1990)
CFC-11	22 %
CFC-12	25 %
CFC-113	3 %
CFC-114	<1 %
CFC-115	<1 %
HCFC-22	3 %
CCl ₄	13 %
CH ₃ CCl ₃	13 %
Sources naturelles	
CH ₃ Cl	20 %

Définition des grandeurs utilisées pour l'évaluation de l'impact des constituants organo-halogénés sur la couche d'ozone

La première grandeur introduite, dès la négociation du Protocole de Montréal, pour quantifier l'influence des différents constituants chlorés sur la couche d'ozone est le potentiel de destruction de l'ozone ou ODP (Ozone Depletion Potential). C'est une grandeur relative qui exprime la réduction à l'équilibre de la couche d'ozone calculée pour une émission annuelle permanente dans l'atmosphère d'une masse unité du constituants considéré, rapportée à la réduction obtenue pour une émission annuelle permanente d'une masse unité de CFC-11. Le calcul des valeurs des ODP implique donc l'utilisation de modèles de simulation incluant l'ensemble des processus chimiques, dynamiques et radiatifs qui régissent l'équilibre de la couche d'ozone. Une limitation principale à l'emploi de la notion d'ODP est alors liée aux nombreuses incertitudes dans la connaissance quantitative des processus et en particulier au fait que ne sont pas pris en compte les mécanismes de chimie hétérogène mis en évidence au pôle sud. De plus, l'ODP étant calculé à l'équilibre, sa valeur ne donne pas d'indication sur les phénomènes transitoires qui peuvent jouer un rôle prépondérant, en particulier pour les constituants à durée de vie courte.

La non prise en compte dans le calcul des ODP des processus de chimie hétérogène qui dominant l'équilibre de l'ozone dans les régions de haute latitude a conduit à introduire une nouvelle grandeur, le potentiel de charge en chlore ou CLP (Chlorine Loading Potential), qui permet d'évaluer l'impact maximum d'un constituant organo-halogéné sur la couche d'ozone. Le CLP est également une grandeur relative, définie comme la quantité totale de chlore transportée dans la stratosphère par l'émission d'une masse unité du constituant considéré rapportée à la quantité totale de chlore transportée dans la stratosphère par l'émission d'une masse unité de CFC-11. En ce sens, le CLP est directement proportionnel au nombre d'atomes de chlore contenus dans chaque molécule du constituant considéré, à sa durée de vie dans l'atmosphère et à son poids moléculaire. Les valeurs des CLP sont en général supérieures aux valeurs des ODP et ce pour deux raisons principales. D'une part, certains des CFC et HCFC considérés, comme le HCFC-22, sont photodissociés de façon incomplète dans la stratosphère et ne libèrent donc pas la totalité de leurs atomes de chlore. D'autre part, l'effet de ces constituants sur la couche d'ozone est évidemment sensible à la distribution verticale du chlore libéré, paramètre pris en compte dans le calcul des ODP mais non dans celui des CLP, puisque dans ce dernier cas tous les atomes libérés sont censés jouer le même rôle sur la couche d'ozone.

Le tableau suivant résume, pour les constituants organo-halogénés actuellement en usage et dont certains sont effectivement réglementés par le Protocole de Montréal, les valeurs les plus récentes des ODP et CLP (Document PNUE/OMM)

Constituant	Durée de vie (années)	ODP	CLP
CFC-11	60.0	1.0	1.0
CFC-12	120.0	0.9-1.0	1.5
CFC-113	90.0	0.8-0.9	1.11
CFC-114	200.0	0.6-0.8	1.8
CFC-115	400.0	0.4-0.5	2.0
HCFC-22	15.3	0.04-0.05	0.14
CCl4	50.0	1.0-1.2	1.0
CH3CCl3	6.3	0.10-0.12	0.11
Halon-1301		8-13	
Halon-1211		2-3	
Halon-1202		0.3	
Halon-2402		6.2	

Scénarii d'évolution de la charge en chlore et de l'impact sur la couche d'ozone pour les constituants organo-halogénés actuellement en usage.

Plusieurs scénarii d'évolution de la charge en chlore de la stratosphère peuvent être envisagés, dont l'impact sur la couche d'ozone sera mesuré au moyen des grandeurs précédemment définies. Ils sont résumés dans le tableau suivant (Document PNUE/OMM).

Scénario	Diminution des CFC (1996 -2000)	Augmentation compensatoire du HCFC-22	Augmentation des Emissions		
			HCFC-22 (MT/an/an)	CCI4 (pptv/an)	CH3CCI3 (pptv/an)
A	0%	0%	7	+1	+4
B	50%	50%	7	+1	+4
C	85%	50%	7	+1	+4
D	95%	50%	7	+1	+4
E	95%	50%	7	fixé (1985)	
F	95%	0%	7	fixé (1985)	
G1	100%	50%	7	+1	+4
G2	100%	50%	7	fixé (2000)	
G3	100%	50%	7	arrêt (2000)	
G4	100%	0%	7	arrêt (2000)	
G5	100%	0%	fixé(2000)	arrêt (2000)	
G6	100%	0%	arrêt (2000)	arrêt (2000)	
G7	100%	- 50% (2030)	arrêt (2030)	arrêt (2000)	

Scénario de référence : dans ce scénario (A) les flux des CFC (11,12, 113, 114, 115) et des halons (1211, 1301, 2402) contrôlés par le Protocole de Montréal, sont maintenus constants au niveau de production de 1986. Les concentrations des autres constituants sources sont supposées augmenter à leur rythme actuel : CCI4 (1% par an), CH3CCI3 (3% par an), CH4 (0.9% par an), N2O (0.25% par an), CO2 (0.4% par an). Pour le HCFC 22 le taux d'augmentation de 5% par an pour un émission totale en 1985 de 140 Ktonnes par an est compatible avec la teneur actuellement observée dans l'atmosphère.

La teneur en chlore dans l'atmosphère augmente alors de 3.0 ppbv en 1985 à 4.5 ppbv en l'an 2000, 7.1 ppbv en 2030 et 9.2 ppbv en 2060. La teneur en brome passe de 13 pptv en 1985 (dont 10 pptv dus aux émissions naturelles de CH3Br) à 31 pptv en 2060. Pour les modèles qui prennent en compte l'effet radiatif du CO2 dans la stratosphère, les variations de la colonne totale d'ozone sont alors les suivantes : de - 0% à - 1.5% dans les tropiques, de - 4% à -8% dans les hautes latitudes en hiver. La réduction de la concentration d'ozone à 40 km est de l'ordre de - 25 à - 50 %. Elle conduit à une diminution de la température locale de 10 à 20°C.

Scénarii prenant en compte une réduction des émissions des CFC : plusieurs scénarii ont été considérés dans lesquels les émissions des CFC et des halons, réglementés par le Protocole de Montréal, sont réduites entre 1995 et 2000. Afin de tenir compte des besoins de consommation, on suppose que ces diminutions sont compensées par une augmentation de la production du HCFC 22 égale à 50% des émissions totales au niveau de 1985. Le tétrachlorure de carbone CCl₄, et le trichloroéthane CH₃CCl₃ sont supposés augmenter au même rythme que dans le scénario de référence A, puisque non contrôlés par le protocole de Montréal.

Lorsque les émissions des CFC sont réduites de 50% (scénario B), la charge totale en chlore en 2060 atteint 7.2 ppbv et la charge en brome 22 pptv. Les réductions prédites de la quantité totale d'ozone représentent alors 65% de celles calculées dans le scénario de référence.

Si les émissions de CFC sont réduites de 85% (scénario C), les charges totales en chlore et en brome en 2060 sont respectivement de 5.5 ppbv et 16 pptv. Les réductions de l'ozone représentent alors 50% de celles calculées dans le scénario de référence.

Si les émissions de chlore sont réduites de 95% (scénario D), les charges totales en chlore et en brome sont alors de 5.4 ppbv et 14 pptv respectivement. Les réductions de la colonne d'ozone ne dépassent pas 40 à 50% de celles calculées dans le scénario de référence.

Si, en plus (scénario E), on gèle les émissions de CH₃CCl₃ et de CCl₄ au niveau actuel (1985), et si les émissions des CFC réglementés sont diminuées de 95%, la charge totale en chlore en 2060 est réduite à 4.2 ppbv.

Si enfin (scénario F), on gèle non seulement les émissions de CH₃CCl₃ et CCl₄, mais également celles du HCFC 22 au niveau 1985, alors la charge totale en chlore diminue par rapport à sa valeur actuelle (3.9 ppbv en 1990) pour atteindre 3.6 ppbv en 2060. Cette diminution, due essentiellement au changement dans la teneur du HCFC 22, n'affecte que très marginalement les réductions prédites de colonne totale et de concentration d'ozone par rapport au scénario précédent. En effet la majeure partie du chlore émis dans l'atmosphère par le HCFC 22 n'est pas émis dans la moyenne stratosphère où les effets des constituants chlorés liés à la chimie homogène sont maximum. Rappelons encore une fois que les modèles utilisés pour ces simulations ne prennent pas en compte la chimie hétérogène dont les effets maxima sont attendus aux altitudes comprises entre 20 et 30 km.

Charge totale en chlore : Dans tous ces scénarii la charge totale en chlore, correspondant à la somme pondérée de tous les composés halogénés dans la troposphère, est toujours supérieure au niveau observé en 1985 (3 ppbv). Il est cependant intéressant de voir quels scénarii pourraient conduire à une réduction du contenu en chlore et en particulier s'il est possible de redescendre à l'horizon 2060 en dessous du niveau de 2 ppbv qui correspond à la teneur observée lors de l'apparition du trou d'ozone antarctique (1979). Les résultats de ces scénarii (G1 à G7) sont résumés dans le tableau suivant.

Année	A	B	C	D	E	F	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
1985	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98
2000	4.52	4.41	4.33	4.31	4.07	3.98	4.30	4.30	4.30	4.21	4.21	4.21	4.30
2030	7.09	5.93	5.12	4.89	4.17	3.66	4.77	4.29	3.52	2.98	2.84	2.58	3.38
2060	9.16	7.15	5.75	5.35	4.15	3.55	5.15	4.19	3.30	2.67	2.27	1.95	2.13
2090	10.72	8.09	6.25	5.73	4.05	3.42	5.47	4.03	3.07	2.41	1.88	1.55	1.59

S'il est possible par différentes combinaisons de ramener la charge en chlore en dessous de 3 ppbv, la seule solution pour parvenir à une charge totale inférieure à 2 ppbv en 2060 correspond à une réduction totale des émissions des CFC, HCFC 22, CCl4 et CH3CCl3 en l'an 2000. Dans ce cas les diminutions éventuelles de la couche d'ozone seraient alors uniquement liées aux émissions de CH4, N2O, CO2. Une telle projection doit cependant prendre en compte les impératifs économiques et il est donc nécessaire, pour qu'un tel scénario ait un sens, de considérer le remplacement des CFC par différents produits de substitution (HCFC, CFC) dont l'impact sur la couche d'ozone sera étudié en détail au chapitre 8.

Changements induits du rayonnement UV à la surface

Les variations du flux solaire ultra-violet peuvent être calculées à la fois pour les changements déjà observés de la couche d'ozone et pour les changements prédits en fonction des différents scénarii adoptés précédemment. Dans ces calculs, à nouveau extraits du document PNUE/OMM 1990, les flux ultra-violets ont été moyennés pour tenir compte du spectre d'action de l'ADN et des plantes.

Les changements passés sont évalués à partir des données TOMS en termes d'ozone total au cours de la dernière décennie : 0 à -4% dans les tropiques, -4 à -8% dans les régions de haute latitude de l'hémisphère nord en hiver, de -8 à -30% dans les régions de haute latitude de l'hémisphère sud pour prendre en compte les phénomènes liés au trou d'ozone. L'augmentation du rayonnement UV susceptible d'avoir une action néfaste sur l'ADN et les plantes est alors de +2 à +5% dans l'hémisphère nord, de +2 à +10% entre 30 et 60 degrés de latitude sud, de +10 à +60% dans les régions du trou d'ozone antarctique.

Dans le cas du scénario de référence, en négligeant les processus de chimie hétérogène et les contre-réactions liées aux processus dynamiques et radiatifs, l'augmentation maximum en valeur absolue du rayonnement ultra-violet au cours de la période 1960-2060 se produit dans les régions de moyenne latitude au cours du printemps. L'augmentation relative maximum se produit, elle, dans les régions de haute latitude au début du printemps, où elle atteint de 20 à 40%. Dans le cas d'un scénario correspondant à une réduction de 95% des émissions, les augmentations calculées du flux solaire ultra-violet sont divisées par 2.

Effet de serre additionnel

Les constituants organo-halogénés qui influent sur l'équilibre de la couche d'ozone sont également, du fait de leurs caractéristiques spectrales dans le domaine des longueurs d'onde infra-rouge, des gaz à effet de serre à l'image du méthane, de l'oxyde nitreux ou de l'ozone dans la troposphère. Ils jouent un rôle d'autant plus important dans l'effet de serre additionnel que leur pouvoir de réchauffement de la surface est, à concentration égale dans l'atmosphère, supérieur de plusieurs ordres de grandeur à celui du gaz carbonique. Le tableau suivant indique ainsi pour chacun de ces constituants le pouvoir de réchauffement DQ de la surface exprimé de façon relative par rapport au gaz carbonique. Les valeurs sont données en terme d'unité moléculaire (1ère colonne) et d'unité de masse (2ème colonne).

Constituant	DQ par molécule	DQ par unité de masse
CO2	1	1
CH4	21	58
N2O	206	206
CCl4	5720	1640
CH3CCl3	2730	900
CFC-11	12400	3970
CFC-12	15800	5750
CFC-113	15800	3710
CFC-114	18300	4710
CFC-115	14500	4130
HCFC-22	10700	5440
CH3Br	16000	4730

Ces valeurs doivent bien entendu être pondérées par l'abondance relative de chacun de ces constituants dans l'atmosphère et par leur durée de vie dans le réservoir atmosphérique. Le tableau suivant donne ainsi la contribution relative de l'ensemble de ces constituants à l'effet de serre additionnel pour l'année de référence 1990.

Constituant	Contribution relative (1990)
CO2	55 %
CH4	15 %
N2O	4 %
O3 (troposphère)	2 %
CFC-11	7 %
CFC-12	12 %
Autres CFC	2 %
Autres	3 %

Les chlorofluorocarbures sont donc déjà responsables de près de 20% de l'effet de serre additionnel observé en 1990. Afin de mesurer leur influence future, on introduit une nouvelle grandeur, le potentiel de réchauffement global ou GWP (Global Warming Potential). Défini de façon analogue à l'ODP, il exprime le rapport entre le réchauffement global calculé à l'équilibre pour une émission annuelle permanente d'une masse unité du constituant considéré et le réchauffement global calculé à l'équilibre pour une émission annuelle permanente d'une masse unité de CFC-11. Il correspond donc à nouveau à une grandeur intégrée qui traduit un effet relatif maximum. Le GWP est proportionnel à la durée de vie du constituant et à son poids moléculaire (par rapport au CFC-11). Le tableau suivant donne les valeurs des GWP pour les constituants organo-halogénés actuellement en usage (Document PNUE/OMM).

Constituant	Durée de vie (années)	GWP
CFC-11	60.0	1.0
CFC-12	120.0	3.0
CFC-113	90.0	1.4
CFC-114	200.0	4.0
CFC-115	400.0	7.5
HCFC-22	15.3	0.35
CCl ₄	50.0	0.35
CH ₃ CCl ₃	6.3	0.025

Compte tenu des valeurs élevées du pouvoir de réchauffement des CFC et autres constituants chlorés à durée de vie longue, qui se traduit par des valeurs élevées de leur GWP, il est clair que l'augmentation de leur concentration atmosphérique ne peut qu'influencer de façon tout à fait significative l'effet de serre additionnel. Les CFC sont ainsi accusés au double titre de la destruction de la couche d'ozone et du réchauffement global de la planète, et la justification des mesures de réglementation prises dans le cadre du protocole de Montréal pour sauvegarder la couche d'ozone, ne peut qu'être fortement renforcée si l'on considère l'importance de leur rôle potentiel dans l'effet de serre additionnel.

8. PRODUITS DE SUBSTITUTION : EVOLUTION DE LA CHARGE EN CHLORE DE LA STRATOSPHERE ET IMPACT SUR LA COUCHE D'OZONE ET L'EFFET DE SERRE ADDITIONNEL

Les scénarii envisagés précédemment (chapitre 7) font référence aux constituants chlorés d'origine anthropogénique actuellement en usage dans l'industrie du froid, des mousses synthétiques, des aérosols, et dans l'industrie électronique. Compte tenu de leur durée de vie particulièrement longue dans l'atmosphère de la terre, toute utilisation, même partielle de ces CFC entraîne au mieux un maintien au niveau actuel du contenu en équivalent chlore de la stratosphère. Il est donc impératif de prévoir, en fonction des différents impératifs économiques, le remplacement à terme de ces constituants par des produits de substitution, de durée de vie plus courte et donc moins nocifs pour l'environnement, en termes de dégradation de la couche d'ozone et d'effet de serre additionnel. Ces produits de substitution commencent à être disponibles sur le marché et le Groupe de Travail sur les aspects techniques du marché des substituts (Rapport PNUE/OMM) estime que d'ores et déjà 30% du marché des CFC (soit environ 350 milliers de tonnes par an -kt/an) peuvent être remplacé par des produits de substitution. La croissance de ce nouveau marché serait voisine de 3% par an. Les estimations fournies par l'industrie chimique elle-même permettent de confirmer ces chiffres (DuPont Magazine, Vol. 83, 1989). Pour les constituants organo-chlorés autres que les CFC, actuellement en usage (HCFC-22, CCl₄, CH₃CCl₃), leur remplacement pourrait se faire par des composés non halogénés et donc inoffensifs pour la couche d'ozone (mais non pour l'effet de serre additionnel). En comparaison de l'émission potentielle totale de constituants organo-chlorés, prise par référence au niveau d'émission de 1985 (1000 kt/an de CFC, 80 kt/an de CCl₄, 140 kt/an de HCFC-22, 600 kt/an de CH₃CCl₃), c'est donc près de 20% d'un marché total de 1850 kt/an qui pourrait être remplacé dès maintenant.

Mais le déséquilibre actuel du système atmosphérique, qui se traduit par une différence d'un facteur 5 entre l'intensité des sources anthropogéniques de chlore et la capacité de l'atmosphère à éliminer les constituants chlorés, entraîne une très grande sensibilité des scénarii d'évolution aux types de produits de substitution adoptés, à leur date de mise sur le marché et aux dates d'entrée en vigueur des différentes mesures de réglementation concernant les constituants actuellement en usage (CFC, CCl₄, CH₃CCl₃). Il est donc nécessaire d'évaluer avec précision l'impact des produits de substitution sur la couche d'ozone et l'effet de serre additionnel et d'étudier les conséquences de divers scénarii de remplacement. On peut d'ailleurs noter que, compte tenu des constantes de temps mises en jeu, l'effet sur la couche d'ozone est déterminant dans l'évaluation de l'impact à court terme des différents scénarii. C'est donc cet effet qui sera considéré en priorité dans l'analyse des différents scénarii.

En dehors des incertitudes déjà soulignées qui résultent de notre connaissance imparfaite des processus qui régissent l'équilibre de la couche d'ozone dans l'atmosphère, et notamment la non-prise en compte des processus de chimie hétérogène récemment mis en évidence, deux autres facteurs peuvent influencer la précision de l'évaluation de la charge en équivalent chlore de l'atmosphère terrestre au cours des prochaines décennies. Le délai de réponse de l'atmosphère à l'émission des composés organo-halogénés reste imprécise du fait des incertitudes sur leur durée de vie, les temps de mélange et de transport. Cette incertitude se chiffre à quelques années, en particulier si des changements rapides, résultant de mesures de réglementation drastiques, interviennent pour les concentrations troposphériques. Une seconde source d'incertitude est l'omission quasi-systématique dans les modèles d'évolution du délai qui sépare la production et l'émission des constituants organo-halogénés. Celle-ci dépend largement du mode d'utilisation. Ainsi le CFC-11 utilisé dans les mousses synthétiques ne s'échappera en moyenne qu'au bout de 10 ans, le CFC-12 utilisé dans les circuits de réfrigération au bout de 20 ans. Par contre les CFC 113 et le CH₃CCl₃, utilisés comme produits de nettoyage dans l'industrie électronique, seront émis dans l'atmosphère dès leur production. Un document récent de la Chemical Manufacturers Association (1987 Production and Sales of Chlorofluorocarbons CFC-11 and CFC-12, 1988) permet d'estimer, en prenant comme instant initial l'année 1987, que la quantité totale de CFC contenue dans des produits dont le délai séparant production et émission est supérieur à 2 ans, reste inférieure à deux années de production totale des CFC.

Les produits de substitution

La propriété fondamentale des produits de substitution, qui les rend plus acceptables pour l'environnement que les composés organo-halogénés utilisés jusqu'à présent, est leur durée de vie plus courte dans l'atmosphère (< 50 ans). Celle-ci empêche une accumulation conduisant à des concentrations élevées à l'équilibre. Cette propriété est fondée sur le fait que ces produits de substitution, HCFC ou HFC, contiennent un ou plusieurs atomes d'hydrogène. Ils peuvent alors réagir dans la basse atmosphère avec le radical hydroxyle OH et être ainsi partiellement éliminé de l'atmosphère. De plus certains de ces constituants (HFC) ne contiennent plus de chlore et n'auront donc un effet sur l'environnement global qu'en termes d'effet de serre additionnel. Du fait du remplacement potentiel des CFC par les HCFC et les HFC, il devient alors nécessaire d'évaluer la cinétique et les mécanismes qui peuvent conduire à une destruction de ces constituants dans la troposphère, leur effet potentiel sur la couche d'ozone et leur contribution relative au réchauffement global.

Si les vitesses de réaction des HCFC et HFC avec le radical OH sont connues aujourd'hui avec une précision suffisante, d'autres incertitudes empêchent une évaluation précise de leur

taux de destruction. Tout d'abord, il n'existe pas actuellement de données expérimentales sur les chaînes de réaction qui se produisent après le mécanisme primaire de réaction des HCFC et HFC avec le radical OH. Par analogie avec des constituants ayant les mêmes propriétés chimiques, on peut prédire que les principaux produits résultant de ces chaînes de réaction seront des carboniles et des halides. Parmi ceux-ci, quatre seulement pourraient effectivement être considérés comme des sources potentielles de chlore dans la stratosphère : CCIFO, CF₃CCIO, CCIF₂CO₃NO₂, CCI₂FCO₃NO₂. Les processus physiques d'élimination et en particulier la dissolution dans la phase liquide, diminueront probablement cette source potentielle, mais ceux-ci sont loin d'être connus aujourd'hui avec précision.

Le potentiel d'oxydation de la troposphère est essentiellement déterminé par l'abondance du radical OH. Le manque de données expérimentales n'a toujours pas permis de valider de façon convaincante les modèles qui permettent de restituer les champs tridimensionnels de ce constituant dans la troposphère. Ceux-ci sont en général déduits des observations du trichloroéthane CH₃CCl₃ ou du bilan global de l'isotope ¹⁴C du carbone. En moyenne la concentration à la surface de OH est estimée à $(6 \pm 2) \cdot 10^5$ radicaux.cm⁻³. A partir de ces valeurs des concentrations du radical OH, il est alors possible de calculer la durée de vie dans la troposphère des HFC et HCFC. Celles-ci vont de 0.25 à 40 ans, mais les incertitudes relatives peuvent être estimées à 50%.

La concentration du radical OH dans la basse atmosphère est, de plus, susceptible d'évoluer au cours des prochaines décennies sous l'influence des activités humaines. Elle est en effet directement fonction du contenu en ozone de la troposphère et des émissions des précurseurs de l'ozone troposphérique que sont le méthane, le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote et les hydrocarbures non méthaniques. Les modèles actuels d'évolution de la troposphère prédisent qu'une augmentation à terme de 50% de l'ozone troposphérique liée aux émissions accrues des précurseurs dans l'hémisphère nord, conduirait à une diminution de 25% de la concentration du radical OH. Cette diminution du pouvoir d'oxydation par OH dans la troposphère se traduirait alors par une augmentation de la durée de vie dans l'atmosphère des HCFC et HFC.

Caractéristiques des produits de substitution en termes d'impact sur la couche d'ozone et l'effet de serre additionnel

Les grandeurs caractéristiques définies au chapitre 7 - Ozone Depleting Potential (ODP), Chlorine Loading Potential (CLP) et Global Warming Potential (GWP) - peuvent être utilisées pour quantifier l'impact relatif des émissions des produits de substitution. La différence fondamentale par rapport aux effets potentiels déjà décrits des principaux CFC et constituants

organo-halogénés actuellement utilisés, tient essentiellement à la durée de vie courte de ces produits de substitution et au fait que certains d'entre eux (HFC) ne contiennent pas de chlore. Cette différence est illustrée en terme d'ODP par la figure 8.1 qui représente le changement de la colonne totale d'ozone calculé pour une émission annuelle de 5 millions de tonnes de CFC-11, HCFC-22 et HCFC-123, mettant en évidence l'effet principal lié à la durée de vie des constituants. L'ODP correspond alors à la surface totale comprise sous chacune des courbes qui traduisent l'évolution dans le temps de la réduction de la couche d'ozone. De façon analogue l'effet relatif sur le réchauffement global, pour les mêmes constituants, est illustré en termes de GWP sur la figure 8.2.

Le tableau suivant résume, pour l'ensemble des constituants organo-halogénés, les valeurs les plus récentes des ODP, CLP, GWP (Document PNUE/OMM).

Constituant	Durée de vie (années)	ODP	CLP	GWP
CFC-11	60.0	1.0	1.0	1.0
CFC-12	120.0	0.9-1.0	1.5	3.0
CFC-113	90.0	0.8-0.9	1.11	1.4
CFC-114	200.0	0.6-0.8	1.8	4.0
CFC-115	400.0	0.4-0.5	2.0	7.5
HCFC-22	15.3	0.04-0.05	0.14	0.35
HCFC-123	1.6	0.013-0.016	0.016	0.020
HCFC-124	6.6	0.016-0.018	0.04	0.10
HFC-125	28.1	0	0	0.55
HFC-134a	15.5	0	0	0.27
HCFC-141b	7.8	0.07-0.08	0.10	0.09
HCFC-142b	19.1	0.05-0.06	0.14	0.36
HFC-143a	41.0	0	0	0.76
HFC-152a	1.7	0	0	0.03
CCl4	50.0	1.0-1.2	1.0	0.35
CH3CCl3	6.3	0.10-0.12	0.11	0.025
Halon-1301	100.0	8-13		
Halon-1211	15.0	2-3		
Halon-1202	1.5	0.3		
Halon-2402	28.0	6.2		

Scénarii d'évolution de la charge en chlore de l'atmosphère prenant en compte les produits de substitution (HCFC, HFC)

Plusieurs objectifs peuvent être considérés dans l'évaluation de l'impact de mesures réglementaires de production et d'émission des composés organo-halogénés. L'objectif ultime serait de ramener les niveaux en équivalent chlore de l'atmosphère aux niveaux pré-industriels liés aux seules émissions de chlorure de méthyle, soit 0.6 ppbv. Un objectif moins ambitieux mais tout aussi déterminant, viserait à ramener ce niveau en dessous de la valeur seuil de 2 ppbv qui correspond à l'apparition du trou d'ozone antarctique (1979). Enfin un troisième objectif serait de minimiser la valeur maximum de charge en équivalent chlore de l'atmosphère qui sera atteint au cours des prochaines décennies, ceci afin d'éviter l'apparition de diminutions de plus grande ampleur de la couche d'ozone notamment dans les régions arctiques où les résultats expérimentaux les plus récents ont mis en évidence un pré-conditionnement de la stratosphère polaire.

Pour évaluer l'influence de différents scénarii conjuguant mesures réglementaires et mises sur le marché des produits de substitution, et compte tenu des incertitudes qui existent, tant sur le plan économique que sur le plan scientifique, deux types de produits de substitution "moyens" ont été choisis dans les calculs qui suivent, extraits d'un article récent fondé sur les travaux des groupes de travail du Rapport PNUE/OMM (Stratospheric ozone depletion and future levels of atmospheric chlorine and bromine, Prather and Watson, Nature, 344, 729, 1990). Le premier (X) a une durée de vie de 15 ans (comparable à celle du HCFC-22) et un CLP de 0.10 (valeur relative par rapport au CFC-11). Le second, noté Y a une durée de vie de 6 ans (comparable à celle du HCFC-124) et un CLP de 0.04.

Un scénario de référence a été choisi qui correspond à une évaluation optimiste des futurs niveaux en équivalent chlore de l'atmosphère puisqu'il prend en compte, les niveaux d'émission de 1985, une croissance moyenne de 4% par an de 1986 à 1990 pour tous les composés organo-chlorés d'origine industrielle (CFC, CCl₄, CH₃CCl₃, HCFC-22), un gel des émissions au niveau 1990 jusqu'en l'an 2000 et une suppression totale à la fin de l'année 2000. Les principales grandeurs utilisées pour caractériser les futures émissions sont rappelées dans le tableau suivant. La durée de vie des constituants correspond ici au rapport entre leur abondance totale dans l'atmosphère et le taux annuel de destruction par les processus atmosphériques; les flux d'émissions sont fondés sur les estimations de production correspondant à l'année 1985; leur croissance correspond à une augmentation moyenne de 4%

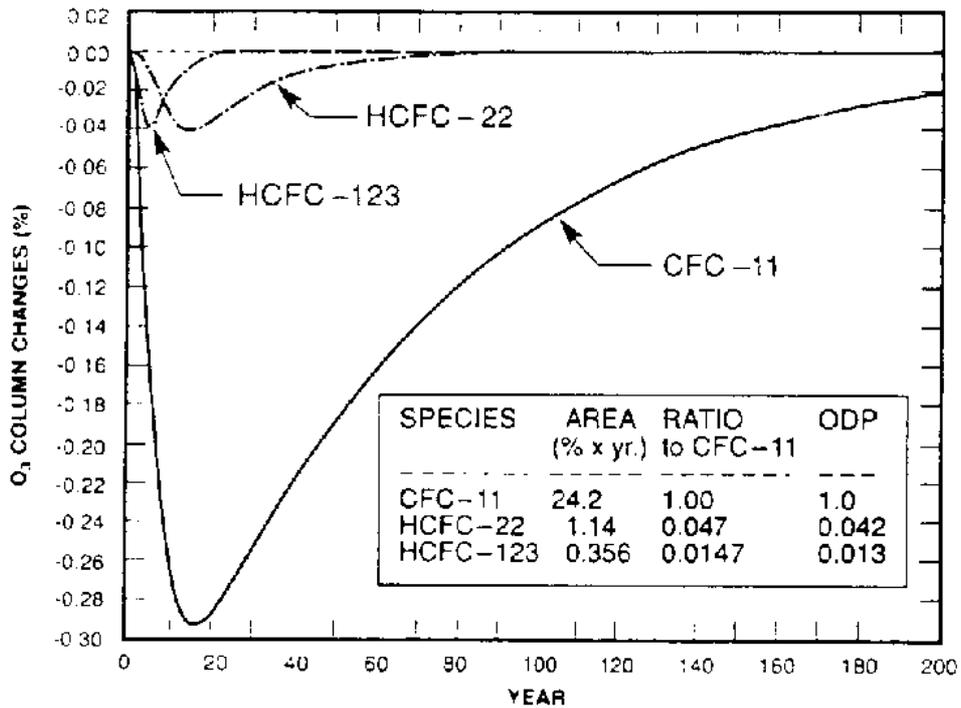


Figure 8.1 - Variation comparée de la quantité intégrée d'ozone pour une émission ponctuelle de 5 millions de tonnes de différents constituants organo-halogénés.

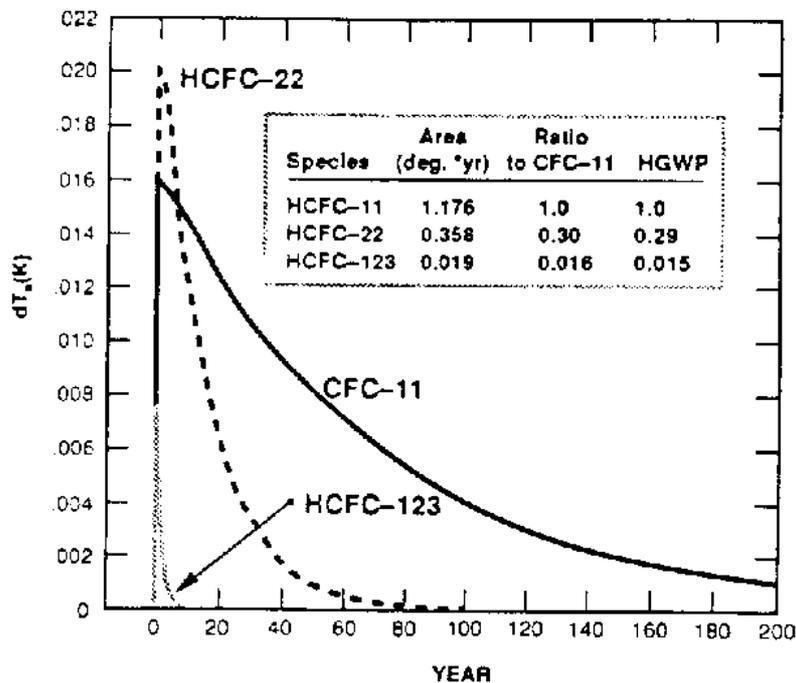


Figure 8.2 - Variation comparée de la température de surface pour une émission de 5 millions de tonnes de différents constituants organo-halogénés.

par an; les valeurs des concentrations sont fondées sur les mesures des niveaux actuels dans la troposphère; la dernière colonne (facteur de conversion) exprime le rapport entre le contenu total exprimé en kT et la concentration relative exprimée en pptv.

Constituant	Durée de vie (an)	Flux émis (kt/an)	Taux de croissance (kt/an)	Concentration (pptv)	Facteur de conversion (kt/pptv)
CFC-11	60	360	14.4	220	23.2
CFC-12	120	450	18.0	375	20.4
CFC-113	90	165	6.6	30	31.6
CFC-114	200	15	0.6	5	28.9
CFC-115	400	10	0.4	4	26.1
HCFC-22	15	140	5.6	80	14.6
CCl4	50	80	3.2	100	25.9
CH3CCl3	6	600	24.0	130	22.4
CH3Cl	1.5			600	
CH3Br	1.5			15	
Halon-1211	15	10	0.40	1.5	27.9
Halon-1301	110	9	0.36	1.7	25.1
Substitut X	15			0	19.3
Substitut Y	6			0	19.3

Plusieurs scénarii peuvent alors être envisagés pour évaluer l'importance relative des mesures de réglementation à la fois en termes quantitatif (intensité des émissions) et en termes de constantes de temps (année d'entrée en vigueur des différentes mesures). Remarquons tout d'abord que l'objectif visant à ramener la charge totale en chlore au niveau pré-industriel de 0.6 ppbv, ne peut être atteint avant plusieurs siècles du fait de la durée de vie des CFC déjà émis. Pour le scénario de référence, un tel objectif ne serait atteint qu'en 2190. On se concentrera donc dans la suite sur les second et troisièmes objectifs qui paraissent plus réalistes.

Scénario 1 : Sensibilité à la date d'entrée en vigueur de mesures réglementaires pour les CFC, CCl₄, CH₃CCl₃, HCFC-22

Ces résultats sont présentés sur la figure 8.3. Ils montrent qu'un délai de cinq ans (1995, 2000, 2005) dans la date de suppression des émissions de ces constituants se traduit par une augmentation de 0.5 ppbv de la charge maximum en chlore, due pour 87% aux seuls CFC, et un délai de 18 ans sur la date à laquelle le contenu en chlore repasse sous le seuil de 2 ppbv (2055 pour une suppression totale en 1995, 2073 pour 2000, 2091 pour 2005). On retrouve ici le facteur voisin de 5 déjà évoqué. Le facteur critique qui détermine le seuil de 2 ppbv est la date de suppression des constituants à durée de vie longue (CFC et CCl₄) et non celle du HCFC-22 et du CH₃CCl₃. Il est utile de rappeler que le tétrachlorure de carbone CCl₄ n'a pas fait l'objet de réglementation dans le cadre du Protocole de Montréal.

Scénario 2 : Effet d'une suppression partielle des émissions des CFC, CCl₄, CH₃CCl₃, HCFC-22

On envisage ici une réduction partielle des émissions de ces différents constituants à des niveaux de 90%, 80% et 50% par rapport aux émissions de 1985 et prenant effet à la fin de l'année 2000. Le scénario sans réduction perpétue les niveaux d'émission de 1990 jusqu'en 2100. On constate que pour des réductions supérieures à 80%, la charge totale en équivalent chlore diminue à partir de la date d'entrée en vigueur de ces réductions (figure 8.4). L'impact maximum concerne le seuil des 2 ppbv qui n'est atteint qu'en 2175 pour une réduction de 90% (au lieu de 2073 dans le scénario de référence) et n'est jamais atteint pour une réduction de 80% (valeur limite de 2.8 ppbv). Une réduction de 50% conduit après une brève diminution au début du prochain siècle à une charge totale en équivalent chlore de 5.3 ppbv en 2100. En l'absence de réduction, celle-ci atteint 10.5 ppbv, soit trois fois la valeur actuelle à la fin du prochain siècle.

Scénario 3 : Effet d'une substitution par les composés X et Y à durée de vie courte après une suppression totale des CFC, CCl₄, CH₃CCl₃.

On suppose ici que la suppression totale des CFC, CCl₄ et CH₃CCl₃ est compensée par l'émission de produits de substitution du type X et Y. Plusieurs cas sont envisagés : substitution constante à hauteur de 25% et 100%, substitution initiale de 50% avec un taux de croissance de 3% par an notée 50% X*). La période de substitution est en général fixée à 30 ans, les cas 45 ans et substitution indéfinie étant également étudiés pour certains scénarii. Dans

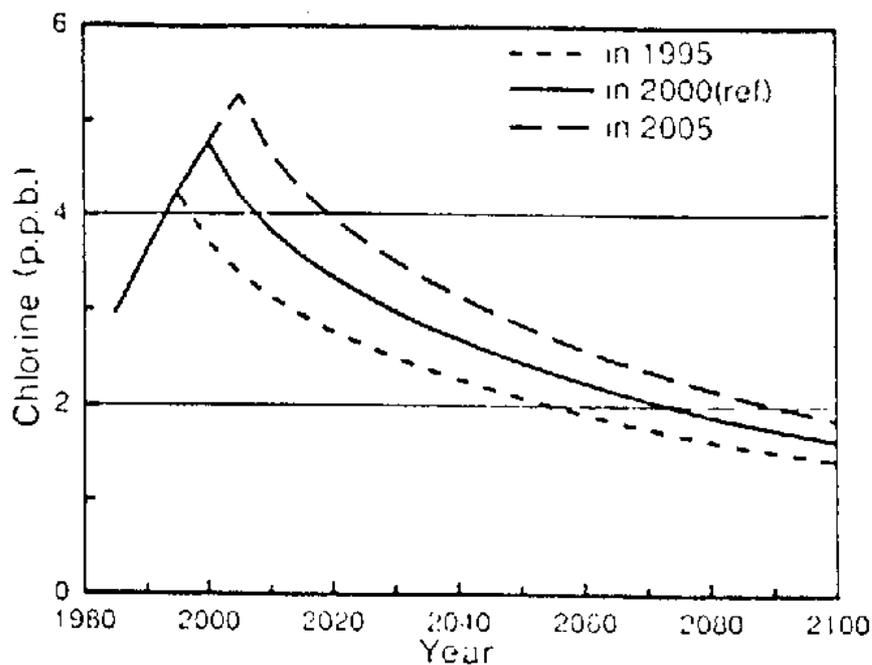


Figure 8.3 - Effet sur la charge totale en équivalent chlore d'une réduction de 100 % des émissions des composés organo-chlorés.

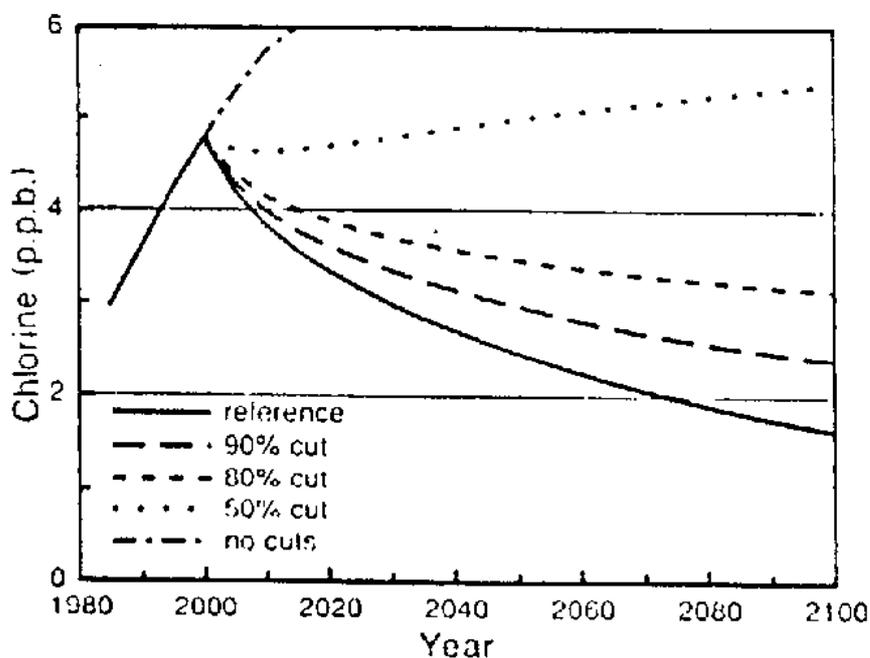


Figure 8.4 - Effet sur la charge totale en équivalent chlore d'une réduction partielle des émissions des composés organo-chlorés.

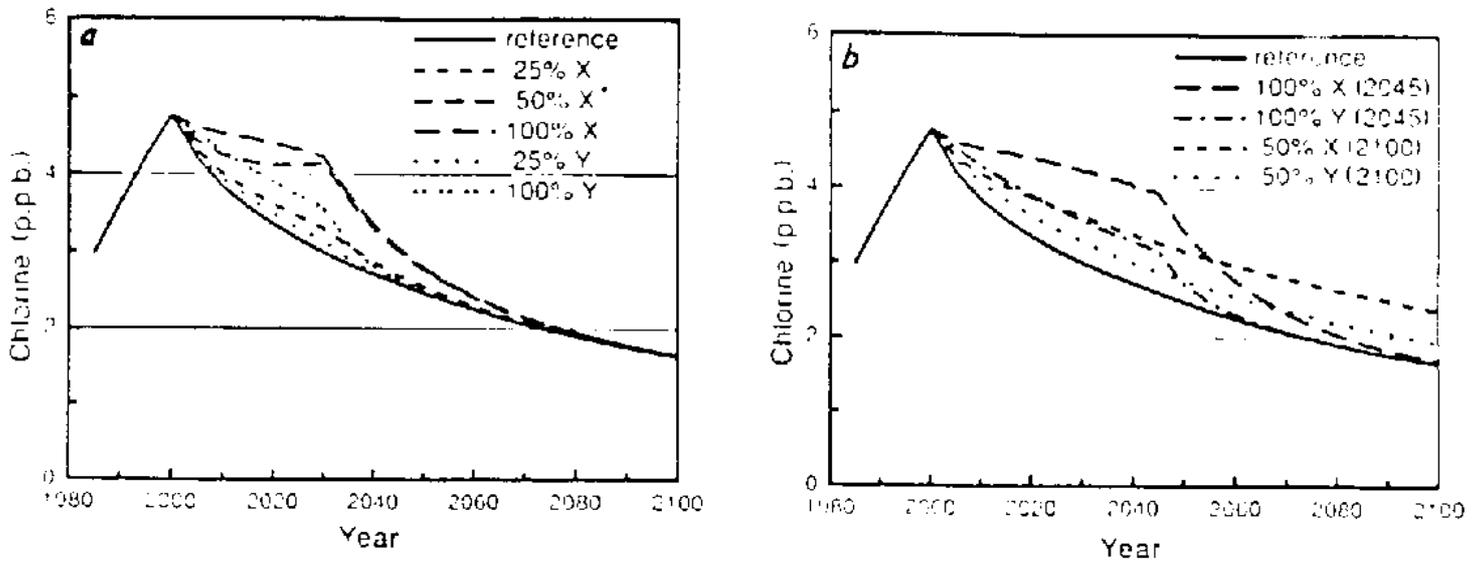


Figure 8.5 - Effet sur la charge totale en équivalent chlore de l'utilisation pendant 30 ans (a) et 45 ans (b) des produits de substitution à durée de vie courte après une suppression complète des CFC en l'an 2000.

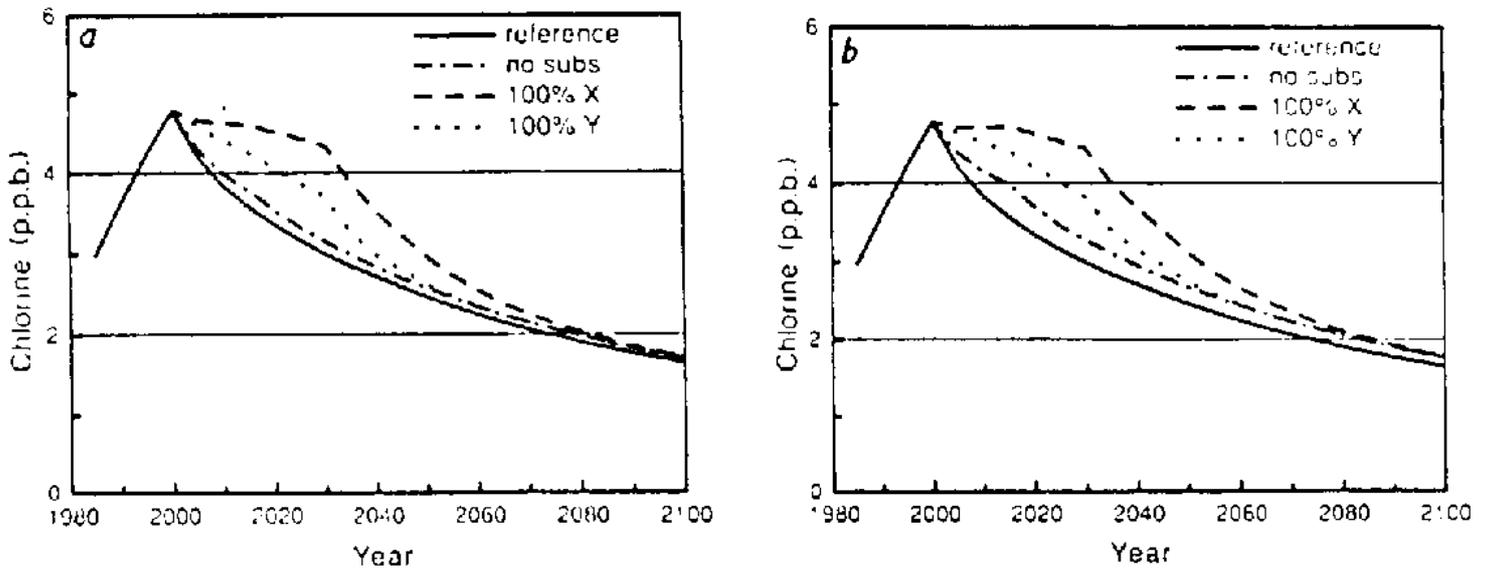


Figure 8.6 - Effet sur la charge totale en équivalent chlore de l'utilisation des produits de substitution pour une suppression retardée de 15 ans de 10 % (a) et 20 % (b) des émissions des CFC.

la plupart des cas (figure 8.5), la charge maximale en équivalent chlore est atteinte lors de la suppression totale des CFC, l'augmentation ne dépassant jamais dans le pire des cas 0.3 ppbv. Même des substitutions à des niveaux modestes (25% pour X, 50% pour Y) conduisent à une diminution de la charge en chlore dès l'an 2000. On note cependant qu'une substitution même totale par le composé X (durée de vie de 15 ans) conduit à maintenir une charge en chlore élevée de 4 ppbv jusqu'en

Si les produits de substitution sont à leur tour supprimés, à l'échéance 2030 ou 2045, la charge en chlore diminue rapidement du fait de leur durée de vie courte. Toutefois, pour un niveau indéfini de substitution de 50%, le seuil critique des 2 ppbv n'est pratiquement jamais atteint.

Scénario 4 : Effet d'une substitution par les composés X et Y sur une suppression partielle des CFC, CCl₄, CH₃CCl₃.

On suppose dans ce scénario que les émissions des CFC, CCl₄, CH₃CCl₃ sont réduites de 80% à 90% en l'an 2000 et que les 20% à 10% restant sont effectivement émis jusqu'en 2015. La substitution par les constituants X et Y prend en compte ce délai de 15 ans pour les fractions correspondantes des émissions. Ce délai de 15 ans repousse la date où est atteint le seuil critique de 2 ppbv de 6 ans (suppression de 90%) ou de 11 ans (suppression de 80%) par rapport au scénario de référence (figure 8.6). Les niveaux de la charge totale en chlore sont peu affectés en valeur absolue, l'effet principal de ce délai de 15 ans sur l'élimination totale des CFC, CCl₄ et CH₃CCl₃ étant de prolonger jusqu'en 2030-2040 la durée pendant laquelle la charge totale en chlore reste voisine de 4 ppbv.

Scénario 5 : Sensibilité à une suppression par étapes des CFC, CCl₄, CH₃CCl₃, HCFC-22.

On considère une réduction en deux étapes de CFC, CCl₄, CH₃CCl₃, HCFC-22 correspondant à une réduction de 50% en 1995 et une réduction de 100% en l'an 2000. La substitution par les composés X et Y est en phase avec ces différentes étapes. Il s'agit là d'un scénario complexe qui pourrait cependant correspondre à une approche réaliste de la révision du Protocole de Montréal, prenant en compte la possibilité d'une suppression partielle des CFC dès 1995. La charge maximum en chlore correspond alors au niveau de 4.24 ppbv atteint en 1995, et le seuil de 2 ppbv est atteint en 2063 soit dix ans avant le scénario de référence (figure 8.7).

Scénario 6 : Poursuite de la production de CH₃CCl₃.

Dans la mesure où le trichloroéthane CH₃CCl₃ a une durée de vie courte (6 ans) comparable à celle des produits de substitution, il peut être intéressant d'envisager des scénarii correspondant à une poursuite de la production de ce constituant. La suppression du trichloroéthane en l'an 2000 dans le scénario de référence contribue pour une large part à la diminution de la charge en chlore puisque ce constituant représente environ 13% de la charge actuelle totale en équivalent chlore (0.5 ppbv) et est éliminé rapidement du fait de sa courte durée de vie. Cependant, une utilisation continue du CH₃CCl₃ pendant 30 ans, jusqu'en 2030, n'entraîne pas d'augmentation dans la valeur maximum de la charge en chlore et un délai inférieur à 2-3 ans dans la date d'obtention du seuil de 2 ppbv (figure 8.8).

Scénario 7 : Sensibilité aux incertitudes sur la durée de vie des différents composés organo-chlorés.

On cherche ici à évaluer l'effet sur la charge totale en chlore d'une incertitude de $\pm 25\%$ sur la durée de vie des composés organo-chlorés. Il s'agit pour certains de ces constituants, notamment les CFC, d'une fourchette maximum d'incertitude. Lorsque la durée de vie des constituants est réduite de 25%, leur destruction plus rapide dans la basse atmosphère conduit à une diminution d'environ 0.3 ppbv de la charge maximum en équivalent chlore et rapproche la date où est atteint le seuil de 2 ppbv d'environ 20 ans (2053). Si au contraire la durée de vie est augmentée de 25%, la charge maximum en équivalent chlore augmente de 0.2 ppbv et le franchissement du seuil de 2 ppbv est repoussé à 2095 (figure 8.9).

Scénario 8 : Effet des émissions des halons sur la charge totale en brome.

Ces émissions sont dues principalement aux halons 1301 (CF₃Br) et 1211 (CF₂ClBr). Les scénarii envisagés correspondent à des réductions de 100%, 80% et 50% par rapport aux niveaux d'émission de 1985, et à un gel de la production au niveau 1990. En 1985, les émissions des halons 1301 et 1211 correspondaient à environ 15% de la charge totale en brome de l'atmosphère (18 pptv). Pour un simple gel des émissions, la charge en brome atteindra 53 pptv en 2100, dont 38 pptv (72%) dus aux halons (figure 8.10). Bien que de nombreuses incertitudes subsistent quant à la compréhension du rôle des constituants bromés dans les équilibres atmosphériques, et notamment dans les régions polaires, on peut estimer que l'efficacité de destruction de l'ozone par les constituants bromés est environ 30 fois supérieure à celle des constituants chlorés (dans une marge d'incertitude comprise entre 10 et 50 fois). Une

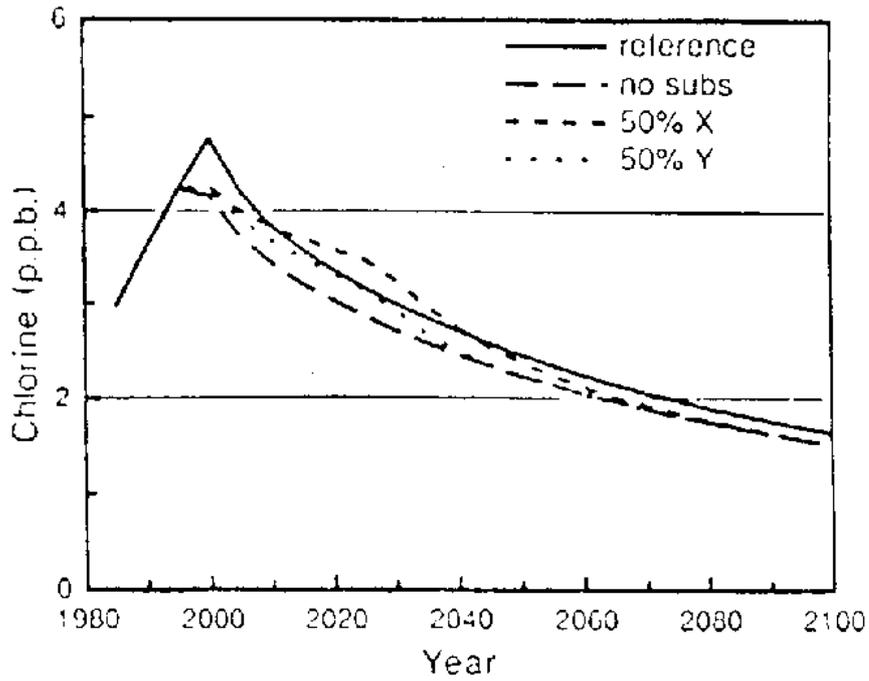


Figure 8.7 - Effet sur la charge totale en équivalent chlore d'une réduction en deux étapes des émissions des composés organo-chlorés : diminution de 50% en 1995 et suppression totale en 2000.

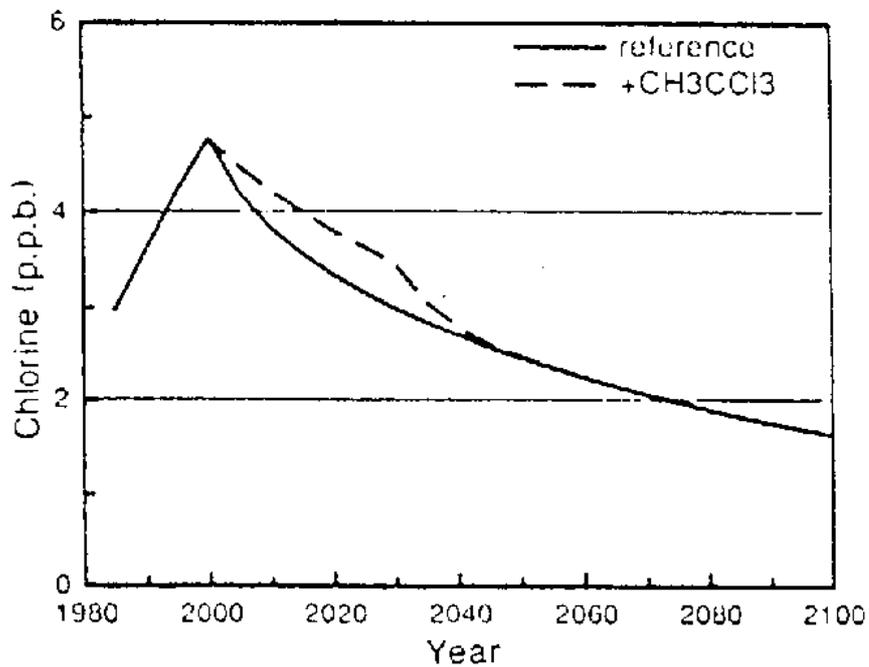


Figure 8.8 - Effet sur la charge totale en équivalent chlore de la poursuite des émissions de CH₃CCl₃ jusqu'en 2030.

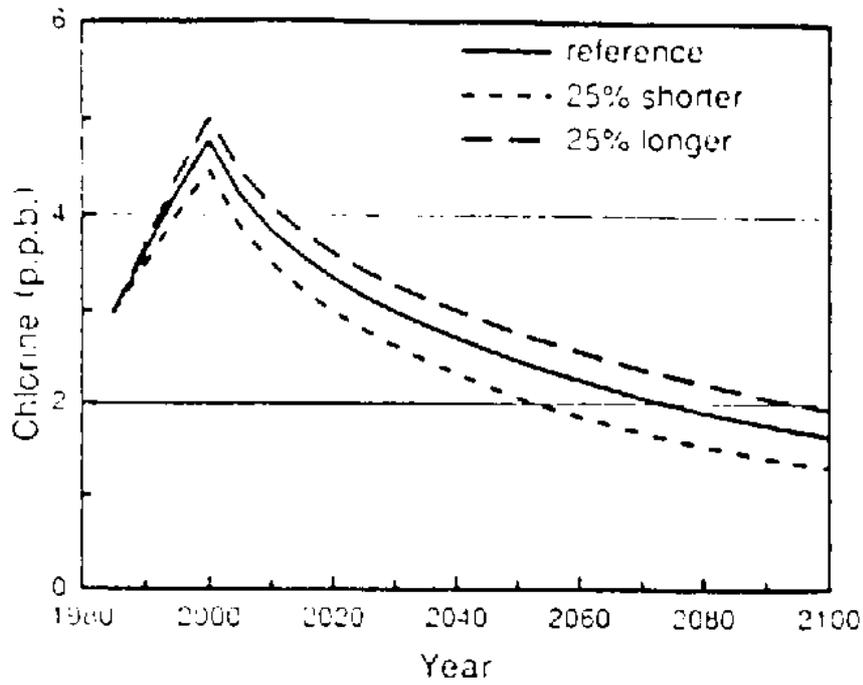


Figure 8.9 - Sensibilité de la charge totale en équivalent chlore aux incertitudes sur la durée de vie des composés organo-halogénés.

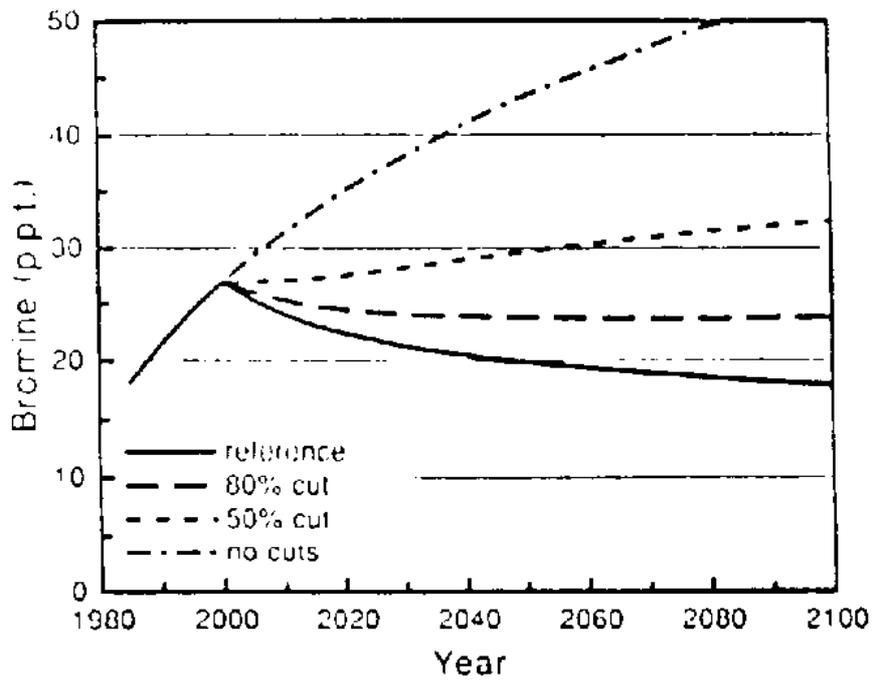


Figure 8.10 - Effet sur la charge totale en brome des réductions des émissions des halons.

augmentation de 35 pptv de la charge en brome, correspondant au gel des émissions au niveau de 1990, est alors équivalent à une augmentation de 1 ppbv de la charge en chlore.

Conclusion

Les résultats des différents scénarii envisagés au cours de cette étude sont résumés dans le tableau suivant.

Scénario	Charge maximum en chlore (ppbv)	Seuil 2ppbv
1. réduction de 100% en 1995	4.24	2055
réduction de 100% en 2000 (réf.)	4.78	2073
réduction de 100% en 2005	5.28	2091
2. réduction de 90% en 2000	4.78	2175
réduction de 80% en 2000	4.78	jamais
4. réduction 90%(2000), 10%(2015)	4.78	2079
réduction 80%(2000), 20%(2015)	4.78	2084
5. réduction 50%(1995), 50%(2000)	4.24	2063
7. durée de vie - 25%	4.07	2053
durée de vie + 25%	5.01	2095

Ils démontrent que l'objectif d'une diminution de la charge totale en chlore en dessous du niveau critique de 2 ppbv d'apparition du trou d'ozone au pôle sud avant la fin du siècle prochain, ne peut être atteint que moyennant une suppression totale des émissions des CFC et du tétrachlorure de carbone. L'idéal, du point de vue de l'environnement, consiste à faire intervenir cette suppression immédiatement, chaque année supplémentaire se traduisant par une augmentation de 0.1 ppbv de la charge totale maximum en équivalent chlore atteinte et un délai de 3.6 ans sur le franchissement du seuil de 2 ppbv.

Un scénario optimum, fondé sur ces différentes études, devrait donc conduire à une suppression totale le plus rapidement possible des CFC et du tétrachlorure de carbone, quitte à les remplacer par des constituants à durée de vie plus courte. Il est en particulier important de

remarquer que le maintien d'une production égale ou supérieure à 20% de la production actuelle des CFC conduit à une augmentation et à une stabilisation à long terme de la charge équivalente en chlore incompatible avec la disparition du "trou d'ozone" dans l'antarctique. Cette remarque est particulièrement importante si l'on considère le cas des pays en voie de développement comme l'Inde et la Chine qui n'ont pas ratifié le Protocole de Montréal, faute d'un accès rapide aux technologies nouvelles de production des produits de substitution. Toutefois, un délai d'une quinzaine d'années sur la production d'une faible fraction des CFC (10% à 20 %) peut être envisagé, surtout s'il conduit à une élimination totale à ce terme de 15 ans. La diminution rapide de la charge totale en chlore, qui peut permettre d'éviter les phénomènes de réduction potentielle dans la stratosphère polaire arctique, peut être obtenue par une réduction des émissions de constituants à durée de vie courte comme le trichloroéthane.

En ce qui concerne la suppression à terme des produits de substitution chlorés, les différents scénarii envisagés ne permettent pas de déterminer sur une base scientifique, une date optimum à l'échelle des années 2020 - 2045. En effet, l'inconnue principale dans ce domaine reste la réponse de la stratosphère arctique à un niveau d'équivalent chlore compris entre 3.5 et 5 ppbv. Dans la mesure où les CFC auront effectivement été supprimés à très court terme, il est alors probable que les impératifs économiques seront les principaux facteurs de décision quant à cette date limite, le déclenchement d'un phénomène de grande ampleur dans l'arctique restant toutefois susceptible, à tout moment, de bouleverser ces données socio-économiques.

Il semble également impératif, compte tenu de leur efficacité relative dans la destruction catalytique de la couche d'ozone, de procéder à une réduction importante des émissions de constituants bromés (80% ou plus) pour stabiliser le plus rapidement possible le niveau équivalent de brome dans l'atmosphère.

En ce qui concerne l'effet de serre additionnel, les valeurs estimées des GWP montrent que le remplacement des composés à durée de vie longue - CFC, CCl₄ - par les HCFC ou HFC à durée de vie plus courte devrait diminuer d'environ un ordre de grandeur l'impact relatif potentiel des constituants organo-halogénés. Il n'en reste pas moins que pour certains des produits de substitution comme les HCFC-22, HCFC-142b, HFC-125, HFC-134a et HFC-143a, les valeurs des GWP ne sont inférieures que d'un facteur compris entre 2 et 3 à celle des CFC actuellement utilisés. Il importera donc de prendre en compte ces effets potentiels lors de l'étude des mesures éventuelles de réglementation des gaz à effet de serre.

9. REEVALUATION DU PROTOCOLE DE MONTREAL

Depuis la signature de l'accord de Montréal en 1987, un certain nombre d'éléments scientifiques nouveaux concernant l'impact des CFC sur l'équilibre de l'atmosphère sont intervenus, qui ont été exposés en détail dans les chapitres qui précèdent. La nocivité relative de chacune des espèces a pu être établie et des scénarii de ce qui pourrait se produire aux cours des années à venir ont été étudiés. En voici un résumé synthétique présenté sous forme d'argumentaire.

1. Destruction de l'ozone et effet de serre

L'augmentation de la concentration des CFC, constatée dans l'atmosphère; représente une menace tout à la fois pour l'équilibre de l'ozone stratosphérique et pour le climat par effet de serre. Tous les éléments intervenus depuis 1987 tendent à confirmer l'importance de ces risques.

La destruction de l'ozone stratosphérique est déjà amorcée. Elle est principalement due au phénomène de réduction de d'ozone polaire au printemps par des mécanismes de chimie hétérogène faisant intervenir à la fois les radicaux chlorés et bromés et les particules de glace présentes dans les nuages stratosphériques polaires. Elle est plus marquée dans l'hémisphère austral où aux latitudes supérieures à 55°, la diminution moyenne observée sur 8 ans (1978-1986) est de l'ordre de 10%. Le phénomène de destruction d'ozone est également maintenant observé dans l'hémisphère boréal. Du fait d'une circulation générale tout à fait différente, il se manifeste par l'apparition de trous de quelques milliers de kilomètres de diamètre au sein desquels l'ozone semble se détruire et qui se diluent rapidement. A l'échelle de l'hémisphère nord, leur impact global observé jusqu'en 1986, était encore réduit (2% sur huit ans) mais pourrait croître rapidement si les observations de 1990 se confirment. La mise en parallèle de l'augmentation des chlores dans la stratosphère et de l'aggravation rapide de la destruction de l'ozone d'une année sur l'autre, montre que la menace se place à brève échéance.

Bien que d'une part, la température moyenne de l'atmosphère terrestre ces dernières années soit plus élevée de 0.6°C par rapport à celle du début du siècle et que d'autre part la concentration des gaz à effet de serre soit en augmentation rapide, il n'est pas possible d'affirmer sans ambiguïté qu'une dérive climatique d'origine anthropogénique se soit déjà produite. Seuls les modèles de simulation encore bien imparfaits, permettent d'estimer la menace que représenterait l'accroissement de la concentration des gaz à effet de serre. Suivant ceux-ci la température globale de l'atmosphère en 2020 pourrait être de 1.8°C plus élevée qu'à l'ère pré-industrielle. Parmi tous les gaz à effet de serre responsables de l'échauffement, les

CFC ne contribueraient que pour une part inférieure à 20% environ. Les CFC qui représentent le risque le plus élevé sont les mêmes que ceux qui entraînent la destruction de l'ozone, c'est à dire prioritairement les espèces à longue durée de vie. Les réglementations de production en application ou en discussion pour l'ozone sont donc également bénéfiques pour le climat et par conséquent en ce qui concerne les seuls CFC, l'échauffement de l'atmosphère n'est pas la menace la plus urgente.

2. Prévision de destruction de l'ozone

La complexité et les incertitudes sur les mécanismes de destruction de l'ozone par chimie hétérogène rend toute tentative de prédiction aujourd'hui illusoire. La notion d'ODP (Ozone Potential Destruction) ne peut que permettre une classification des CFC entre eux à l'état d'équilibre. Pour l'instant la charge en chlore ou CLP (Chlorine Loading Potential) demeure le critère le plus direct de quantification de la menace de destruction de l'ozone. L'échelle expérimentale de la destruction de l'ozone en fonction de la charge en chlore est la suivante:

- 0.6 ppbv (partie par milliard en volume): ère pré-industrielle;
- 2 ppbv (1979): apparition des premiers signes de destruction de l'ozone en Antarctique;
- 3 ppbv (1985): accroissement de la surface et de la profondeur du trou d'ozone Antarctique;
- 3.7 ppbv (1989): destruction totale de l'ozone entre 12 et 22 km au printemps dans le vortex polaire Antarctique, apparition d'une destruction de l'ozone en Arctique.
- Au delà, il n'existe aucune référence. Comme l'indique l'échelle précédente le phénomène n'est pas linéaire et chaque année est une nouvelle expérience. Un risque de dégradation rapide de la couche d'ozone dans l'hémisphère nord à brève échéance de peut notamment pas être exclu.

3. Le rôle des bromes

Bien que la chimie du brome soit moins bien connue que celle du chlore, les estimations indiquent que le potentiel de destruction de l'ozone par le brome serait de l'ordre de 30 fois supérieur à celui du chlore: 35 pptv (partie par trilliard) de brome équivaldrait à 1 ppbv de chlore.

4. La charge en chlore de la stratosphère

La charge en chlore (et en brome) ne cesse de croître. L'application des accords de Montréal ne pourra inverser la tendance qu'au mieux après l'an 2000. L'amplitude du maximum inéluctable, est évaluée suivant les scénarios à une valeur comprise entre 4.2 et 5.2 ppbV. Elle est principalement due à l'émission des espèces de longue durée de vie dont les principaux sont CFC11, CFC12, CCl4 (ce dernier non réglementé) et le halon 1301, et partiellement au HCFC-22 et au trichloroéthane, en particulier si leur production venait à augmenter plus rapidement que les estimations. Un retard de un an dans l'application de la réglementation entraîne une maximum de charge en chlore plus élevé de 0.1 ppbV.

5. Le retour à l'état antérieur

Du fait de la durée de vie des espèces déjà émises dans l'atmosphère, un retour de la charge en chlore de la stratosphère, équivalente à celle qui était présente lors de l'apparition des premiers signes de destruction de l'ozone polaire (2 ppbV), ne peut être attendu au mieux avant le milieu du siècle prochain. La date de franchissement de ce seuil est en tout premier lieu fonction de la date du bannissement total des CFC de longue durée de vie mais également des quantités de HCFC 22 et CH₃CCl₃ qui seront produites. Un retard de 1 an dans le bannissement des espèces de longue durée de vie entraîne un retard de 3.6 ans pour le retour au seuil de 2 ppbv.

Aussi bien sur le plan de la destruction de l'ozone que sur celui de l'effet de serre additionnel, la difficulté d'estimer de nombreux paramètres, tels le refroidissement de la stratosphère qui accompagnerait le réchauffement de la troposphère par effet de serre, l'augmentation de l'ozone dans la troposphère qui entraînerait une réduction de la concentration du radical oxydrique OH, rend les prévisions à l'échéance de 50 ans tout à fait aléatoires.

6. Les substituts aux CFC

Du strict point de vue de la protection de la couche d'ozone les meilleurs substituts sont les gaz qui ne contiennent ni chlore ni brome. Cependant dans les limites des estimations actuelles de production, les gaz à brève durée de vie (inférieure à 5 ans), ne présentent pas de danger pour la couche d'ozone ni pour l'effet de serre au moins à court terme, cependant qu'à plus long terme (50 ans) certains substituts peuvent néanmoins contribuer significativement à l'effet de serre.

7. La réglementation d'emploi des CFC

A court terme, l'objectif majeur nous semble être d'inverser aussi tôt que possible la courbe d'évolution de la charge en chlore afin de minimiser le risque de destruction massive de l'ozone sur un période d'une ou deux décennies.

Ceci impose tout d'abord un bannissement aussi rapide que possible de l'emploi des gaz chlorés et bromés de longue durée de vie, CFC 11, CFC 12, CFC 113, CFC114, CFC 115 et Halons 1211, 1301 et 2402 déjà réglementés aux quels il faut ajouter CCl₄ et ensuite une réglementation en terme de production des espèces de durée de vie moyenne: HCFC 22 et CH₃CCl₃.

Les observations d'ozone dans l'hémisphère nord au cours du printemps 1990 ne permettent pas d'exclure totalement la nécessité à brève échéance, d'avoir à réduire également la production de ces deux dernières espèces.

A plus long terme, l'objectif est de revenir à une charge en chlore acceptable par l'atmosphère c'est à dire tout d'abord à celle de 1985-86, de l'ordre de 3 ppbv, qui limite la présence du trou à l'Antarctique, puis par la suite à 2 ppbv qui verrait la disparition de ce trou. Au delà de la suppression des espèces de longue durée de vie supposée acquise, ceci impose un scénario assez strict de réduction de l'emploi de HCFC 22 et de CH₃CCl₃. Dans l'état des connaissances actuelles, la détermination d'une date précise pour l'arrêt total de l'emploi de ces derniers composés est très hypothétique.

8. Recherches Atmosphériques

A court terme, l'objectif prioritaire est la compréhension en détail du mécanisme rapide de destruction de l'ozone et non élucidé tel qu'il a été observé en Scandinavie en 1990. Il pourra être atteint par un renforcement des mesures depuis le sol et in-situ en avion et en ballon et des recherches sur la chimie hétérogène de laboratoire, qui peuvent être organisées rapidement.

A plus long terme, il est nécessaire de se donner les moyens d'étude des mécanismes plus globaux et de surveillance de la chimie de la stratosphère et de la troposphère. Il s'agit du réseau NDSC (Network for Detection of Stratospheric Changes) et des moyens spatiaux qui doivent être décidés rapidement, même si leur délais de mise en oeuvre ne permettent pas d'en attendre des résultats immédiats.

10. LES MOYENS DE LA RECHERCHE

Les recherches qui concernent plus particulièrement le domaine de la couche d'ozone stratosphérique sont étroitement couplées à l'ensemble des recherches sur l'environnement global. Celles-ci correspondent sans aucun doute à l'un des enjeux scientifiques et socio-économiques majeurs des prochaines décennies. Elles doivent dans le domaine des sciences dites "exactes" conduire le plus rapidement possible à une amélioration des connaissances afin de fonder les prévisions sur un ensemble cohérent de données indiscutables. Par ailleurs, dans le domaine des sciences économiques et sociales, elles doivent préparer les réponses politiques, sociales et économiques à l'évolution prévisible du climat et de l'environnement global sous l'effet des activités humaines. Il s'agit d'ailleurs dans ce cas de réfléchir à une véritable gestion de l'incertitude, puisque, quelque soit l'effort de recherche consacré à ces problèmes au cours des prochaines années, il est illusoire de penser réduire à zéro les marges d'incertitude qui marqueront notre connaissance de l'environnement terrestre.

Les recherches en environnement sont caractérisées dans le domaine des sciences exactes d'une part par leur caractère pluridisciplinaire, d'autre part par une coopération internationale que la globalité des problèmes rend indispensable. Pluridisciplinaire car chaque communauté scientifique concernée - météorologues, climatologues, physiciens, chimistes, océanographes, aéronomes, spécialistes de la biosphère - se doit aujourd'hui d'élargir son champ de réflexion pour intégrer les problématiques des phénomènes globaux et assurer le suivi à long terme de l'observation des différentes composantes de l'environnement terrestre. Internationale, puisque les groupes d'étude et les programmes relatifs à l'évolution de l'environnement et du climat planétaire sont organisés par de nombreux organismes internationaux. Ainsi pour ce qui concerne les aspects climatiques, le Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC) est piloté conjointement par l'Organisation Météorologique Mondiale et le Conseil International des Unions Scientifiques ICSU, International Council of Scientific Unions). Pour l'environnement global, le Programme International Géosphère Biosphère, proposé par l'ICSU constituera au cours de la prochaine décennie le pôle principal des recherches relatives à l'évolution de l'environnement et du climat. Les interactions de l'homme avec la biosphère sont prises en compte de façon plus spécifique par le Programme Man and Biosphere de l'UNESCO et par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement.

Plusieurs composantes de ces programmes traitent de façon plus particulière du problème de la couche d'ozone et constituent les bases de la coopération internationale dans ce domaine. Celle-ci inclut aussi bien l'organisation de campagnes coordonnées de mesures, de comparaison des codes numériques utilisés pour la modélisation que la présentation de rapports scientifiques permettant d'élaborer un consensus minimum au sein de la communauté sur l'état

des connaissances. Cette coopération est bien entendu marquée par le poids des pays disposant de moyens importants de recherche, notamment les Etats-Unis qui sont par exemple les seuls actuellement à disposer de la composante spatiale dans le domaine de l'observation de la couche d'ozone. Depuis 1988 un effort de coordination important est accompli en Europe dans le cadre d'une "task force" mise en place au sein du COST 611 par la Commission des Communautés Européennes et les différents pays de la Communauté et de l'Association Européenne de Libre Echange. Articulé autour d'un Comité Scientifique de quinze membres et d'une Unité de Coordination située à Cambridge, au Royaume-Uni, ce programme européen est financé dans le cadre des Programmes STEP (Science et Technologie pour la Protection de l'Environnement) et EPOCH (Programme Européen en matière de Climatologie et de Risques Naturels).

En France, les problèmes de l'évolution de la couche d'ozone et de son impact sur le climat et sur l'environnement constituent le thème scientifique principal du Programme Atmosphère Moyenne (PAMOY). Ce programme est l'un des cinq Programmes mis en place dans le cadre des Programmes internationaux PMRC et PIGB (Programme National d'Etude de la Dynamique du Climat, Programme Flux Océanique, Programme Phase Atmosphérique des Grands Cycles Biogéochimiques, Programme Interaction des Ecosystèmes Terrestres et Littoraux avec le Climat, Programme Atmosphère Moyenne). Le financement du PAMOY est assuré par le Centre National d'Etudes Spatial, l'Institut National des Sciences de l'Univers, le SRETIE du Secrétariat d'Etat à l'Environnement. Complété par les financements des organismes et laboratoires impliqués dans ces recherches (CNRS, Direction de la Recherche et des Etudes Doctorales du MENJS) et par le Ministère de la Recherche et de la Technologie, le budget total hors salaire est de 3.42 MF en 1989. Le nombre de chercheurs (équivalent temps plein) travaillant dans ce domaine est estimé à une trentaine de personnes, provenant en grande majorité du CNRS et de l'Université. Le budget -salaires compris - peut alors être estimé à environ 20 MF (base 1989).

L'enjeu principal de ces recherches est de prévoir avec un maximum de garanties les évolutions de l'environnement terrestre et donc d'observer et de modéliser pour comprendre, de comprendre pour prévoir, de prévoir pour mieux gérer. Face à cette demande sociale croissante, il est clair que la communauté française devra disposer à terme de moyens supplémentaires qui viendront s'ajouter à ceux des programmes en cours. Cette augmentation des moyens concerne aussi bien les moyens matériels que les moyens humains et ne peut donc être conduite avec succès que si la dimension formation en est une partie intégrante. Quelques uns de ces aspects principaux sont détaillés dans la suite de ce chapitre. Ils s'appliquent à l'effort français en restant conscient que la plupart de ces activités ne peuvent être dissociées d'un contexte de coopération européen et international.

Observations

Une des conditions indispensables de la compréhension du système de l'environnement est l'obtention de séries continues d'observations fiables, cohérentes et pertinentes. Celle-ci se fonde sur une approche complémentaire alliant observations depuis l'espace, qui seules permettent d'appréhender les processus dans leur globalité, et observations au sol, qui seules, compte tenu des échelles locales mises en jeu, permettent d'étudier les processus élémentaires. Seule cette approche, qui inclut également l'utilisation de moyens aéroportés -avion, ballon - peut permettre de résoudre le problème de l'intégration des échelles spatiales et temporelles commun à toutes les disciplines de l'environnement.

Observations spatiales

Dans le domaine spatial, la France et l'Europe ont jusqu'à présent été totalement absentes de l'effort d'observation de la stratosphère. Les instruments opérationnels de surveillance de l'ozone (TOMS, SBUV, voir chapitre 6) sont embarqués sur les satellites américains de la NOAA et la mission scientifique UARS (Upper Atmospheric Research Satellite), dont le lancement est prévu en 1991 est une mission de la NASA à laquelle la France n'est associée que par une expérience conduite en coopération avec le Canada et une participation au programme de validation sol. A l'échelle internationale, et en dehors des instruments opérationnels qui ne mesurent que l'ozone, rien n'est d'ailleurs prévu pour prendre la suite de l'expérience UARS avant les projets de plate-forme polaire qui, en ce qui concerne les études de la physico-chimie de l'atmosphère, ne seront vraisemblablement pas concrétisés avant la fin de ce siècle. Il y donc là un trou de sept à huit ans qui semble d'autant plus important à combler, que l'expérience UARS elle-même a été conçue à une époque où les phénomènes d'ozone polaires n'avaient pas encore été découverts et que les instruments opérationnels s'ils permettent une surveillance de la couche d'ozone, ne permettent pas par contre de comprendre les processus responsables de cette diminution.

Afin de pallier ce manque de mission scientifique, la communauté française a proposé au CNES de soutenir un projet de mission scientifique sur un satellite dédié, GLOBSAT, destiné à l'étude des interactions chimiques dans la troposphère et la stratosphère et à celle du couplage entre l'atmosphère et la biosphère continentale et marine. Ce projet qui pourrait, compte tenu des instruments prévus, être lancé dans les années 1995 - 1996 permettrait une première approche des bilans globaux des principaux constituants responsables des modifications du climat et de l'environnement global (CO₂, CH₄, O₃, N₂O, CO) et une meilleure prise en compte des phénomènes d'ozone polaire. Il se place dans la suite logique des projets spatiaux mis en oeuvre par, ou proposés au CNES. En effet, après une décennie (1970 - 1980)

consacrée à la compréhension des processus météorologiques et donc à la circulation atmosphérique, le projet TOPEX-POSEIDON, développé dans un cadre de coopération bilatérale avec la NASA et dont le lancement est prévu en 1992, permettra d'étudier la circulation océanique de moyenne et grande échelle. GLOBSAT constituerait alors la première mission scientifique d'étude de bilan et précéderait le projet BEST (pour Bilan d'Energie du Système Tropical), actuellement étudié par le CNES pour les années 1999 - 2000 et dont l'objectif principal est la compréhension et la quantification du cycle de l'eau, moteur principal du climat terrestre. Le coût de chacun de ces projets est de l'ordre de 2 à 3 milliards de francs. La recherche de coopérations, bilatérale ou dans le cadre de l'Agence Spatiale Européenne, peut permettre de limiter l'investissement national à des sommes de l'ordre de 1 milliard de francs. Il est fondamental que ces projets soient soutenus et conçus en termes de mission scientifique et que leurs objectifs scientifiques priment sur l'aspect opérationnel souvent mis en avant dans les missions d'observation de la terre. Celui-ci ne pourra prendre toute sa valeur pour assurer la nécessaire continuité des observations que dans une deuxième étape.

Observations depuis le sol

La communauté française a joué un rôle majeur au niveau international dans la définition de la stratégie des mesures sol et dans la mise au point d'une nouvelle génération d'instruments de télédétection pour la mesure de la structure physique et de la composition chimique de la stratosphère (voir chapitre 6). L'ensemble de ces instruments a ainsi été mis en place à la Station Géophysique de l'Observatoire de Haute Provence, qui vient d'être sélectionnée pour être la première station du réseau dit NDSC (Network for the Detection of Stratospheric Changes - voir chapitre 6) actuellement en cours d'implantation. La France est d'ailleurs particulièrement bien armée pour jouer un rôle important dans ce réseau, grâce aux projets actuellement en cours de développement en Antarctique (base de Dumont d'Urville et, à terme, station du Dôme C) et dans l'hémisphère sud (Ile de la Réunion). Cette avance prise par la communauté française dans le domaine des Observatoires de la stratosphère devra être confortée, principalement sur le plan des moyens humains nécessaires pour maintenir des observations systématiques de qualité.

L'instrumentation mise au point dans les laboratoires français et la capacité nationale de lancements de ballon grâce au Centre National d'Etudes Spatiales permettent également à la communauté nationale de jouer un rôle très actif dans le domaine des observations embarquées sur ballon. De même, le développement d'expérience de télédétection sur l'Avion de Recherche Atmosphérique et de Télédétection (ARAT) et les programmes coopératifs entre le CNES et la NASA préparent la France à jouer un rôle moteur dans la mise en oeuvre d'un avion gros

porteur de plus grande autonomie dont la Communauté Européenne devrait impérativement se doter pour étudier les processus d'échelle régionale.

Campagnes coordonnées

Un exemple d'application de l'ensemble de ces méthodes d'observation - réseaux sol, expériences embarquées sur avion et ballon - sera certainement la campagne européenne d'observation de l'ozone dans l'arctique actuellement en cours de définition et qui se déroulera de novembre 1991 à mars 1992. L'objectif scientifique principal sera de comprendre non seulement les processus particuliers qui régissent l'équilibre de l'ozone dans les régions polaires mais également de quantifier l'impact de ces processus sur l'évolution de la couche d'ozone observée aux latitudes moyennes. Le coût total de cette campagne est estimé à 120 MF, dont environ 50% devraient être couverts dans le cadre des programmes de la Communauté Européenne, les 50% restant étant à trouver sur les financements nationaux.

Modélisation numérique

La communauté française dispose aujourd'hui d'un noyau d'équipes ayant mis au point des modèles multi-dimensionnels de la stratosphère et de la troposphère. Certains mécanismes physico-chimiques ont déjà été intégrés ou sont intégrables à moyen terme dans des modèles globaux de dynamique du climat. Toutefois les modèles les plus élaborés de physico-chimie n'ont pour l'instant été couplés qu'avec des modèles simplifiés de la dynamique atmosphérique. Il importe donc de poursuivre cet effort de modélisation afin que la communauté française puisse disposer des outils intégrateurs, qui seuls permettront de décrire de façon complète et par là-même de prédire l'évolution future de l'environnement terrestre. Ceci implique notamment une utilisation croissante des calculateurs vectoriels les plus performants, la mise en place prioritaire d'un réseau de communication informatique à très grand débit et dont l'accès reste à un coût limité pour les utilisateurs scientifiques et une augmentation des moyens informatiques mis à la disposition des laboratoires.

Formation et recrutement

La poursuite et l'amplification des programmes de recherche sur la couche d'ozone nécessitent très certainement des moyens financiers complémentaires afin de mener à bien les différents projets rappelés ci-dessus. Mais tous ces efforts seront vains s'ils ne s'accompagnent pas également d'une politique de croissance des moyens humains mis à la disposition de la communauté scientifique. Le manque total de création, et même la suppression, de postes d'ingénieurs et de techniciens au cours des dernières années se fait

aujourd'hui sentir de façon dramatique dans un secteur où l'apport expérimental est l'une des conditions nécessaires au succès des programmes. Ceci est vrai aussi bien pour les développements expérimentaux, la conception et la réalisation des projets spatiaux et le support informatique aux expériences comme aux programmes de modélisation.

Par ailleurs ces programmes ne pourront être menés à bien que s'ils sont soutenus par un flux permanent de jeunes chercheurs compétents, ouverts à l'ensemble des disciplines de l'environnement. Il apparaît indispensable aujourd'hui d'introduire dans la formation de 3ème cycle une vision globale de l'environnement prenant en compte les différentes composantes physiques, chimiques et biologiques. Cet effort doit se concrétiser par une augmentation raisonnable des postes de chercheurs et d'enseignants chercheurs mis à la disposition de cette communauté. Enfin, l'importance prise par la nécessité de surveiller à long terme l'environnement implique que ces activités de type "Observatoire" soit reconnues pour les études atmosphériques et océaniques et se concrétisent par une création accrue de postes dans le cadre du corps universitaire des Observatoires et Instituts de Physique du Globe.

11. BIBLIOGRAPHIE

Commission des Communautés Européennes

Evaluation of the effects of chlorofluorocarbons on atmospheric ozone, Present Status of Research, Workshop Report, Bruxelles 13/15 Janvier 1981

Comité d'Etudes sur les conséquences de Vols Stratosphériques (COVOS), Activités 1972-1976, Rapport de synthèse. Société Météorologique de France, Paris 1977.

Comité d'Etudes sur les conséquences de Vols Stratosphériques (COVOS), Etudes des réactions chimiques de l'ozone dans la stratosphère, M. Nicolet, Institut Royal Météorologique de Bruxelles, Bruxelles, 1982.

Geophysical Research letters

Special Issue on Antarctic Ozone Hole, Vol 13, Nov 1986.

Geophysical Research letters

Special Issue on the Airborne Arctic Stratospheric Experiment, Vol 17, Mars 1990.

German Bundestag

Protecting the Earth's Atmosphere, Interim Report 1989, German Bundestag Ed.

Journal of Geophysical Research

Special issue on the Airborne Antarctic Ozone Expedition (AAOE part I) vol 94, D9, Aout 1989

Journal of Geophysical Research

Special issue on the Airborne Antarctic Ozone Expedition (AAOE part II) vol 94, D14, Novembre 1989

National Aeronautics and Space Administration (NASA)

The Stratosphere - Present and Future- NASA Reference Publication 1049, Greenbelt, MD, 1979.

National Aeronautics and Space Administration (NASA)

Present state of Knowledge of the Upper Atmosphere 1988, An Assessment Report, NASA Reference Publication 1208, Greenbelt, MD, 1988.

National Academy of Science (NAS)

Halocarbons - Effects on the Stratospheric Ozone, National Academy Press, Washington DC, 1976.

National Academy of Science (NAS)

Causes an effects of changes in stratospheric ozone, National Academy Press, Washington DC, 1984.

National Research Council (NRC)

Protection against depletion of stratospheric ozone by chlorofluorocarbons. Committee on Impacts of Stratospheric changes , National Academy of Sciences, Washington DC, 1979.

National Research Council (NRC)

Changing Climate: Report of the Carbon Dioxide Assessment Committee, CDAC, National Academy Press, Washington DC, 1983.

National Research Council (NRC)

Causes and effects of changes in stratospheric ozone: update 1983, National Academy Press, Washington DC, 1983.

National Research Council (NRC)

Global Tropospheric Chemistry, A plan for Action. National Academy Press, Washington DC, 1984.

National Aeronautics and Space Administration (NASA)

Proceedings of the Polar Ozone Workshop, NASA Reference Publication 10014, Snowmass, Colorado, May 1988.

United Environment Programme (UNEP)

The Greenhouse Gases. Nairobi, UNEP, 1987.

United Environment Programme (UNEP)

The Ozone Layezr. Nairobi, UNEP, 1987.

United Kingdom Stratospheric Ozone Review Group

Department of the Environment and the Meteorological Office, Sept 1988.

World Meteorological Organization (WMO)

The Stratosphere 1981. Theory and Measurements. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Report n°11, WMO, Geneva, 1982.

World Meteorological Organization (WMO)

Report of the WMO Meeting of Experts on potential climatic effects of ozone and other minor trace gases, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Report n°14, WMO, Geneva, 1983.

World Meteorological Organization (WMO)

Atmospheric Ozone 1985, Assessment of our understanding of the processes controlling its present distribution and changes. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Report n°16, WMO, Geneva, 1985.

World Meteorological Organization (WMO)

Scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Report n°20, WMO, Geneva, 1990.