



**STABILISATION DES GAZ
ATMOSPHÉRIQUES À EFFET DE SERRE :
CONSÉQUENCES PHYSIQUES,
BIOLOGIQUES ET SOCIO-ÉCONOMIQUES**

Document technique III du GIEC



GROUPÉ D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT



Stabilisation des gaz atmosphériques à effet de serre : conséquences physiques biologiques et socio-économiques

Publié sous la direction de

John T. Houghton

L. Gylvan Meira Filho

David J. Griggs

Kathy Maskell

Le présent document technique du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a été élaboré à la demande des parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Les éléments d'information rassemblés ici ont été vérifiés par des experts et divers gouvernements, mais n'ont pas été examinés par le Groupe aux fins d'une éventuelle acceptation ou approbation.

Février 1997

Ce document a été préparé sous les auspices du Groupe de travail I du GIEC, coprésidé par Sir John T. Houghton du Royaume-Uni et L. Gylvan Meira Filho du Brésil.

© 1997, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

ISBN: 92-9169-202-6

Table des matières

<i>Préface</i>	v
Résumé	3
1. Introduction	7
1.1 Objectifs	7
1.2 Points essentiels	8
1.2.1 Quelques éléments fondamentaux concernant les gaz à effet de serre et les aérosols troposphériques (pour de plus amples détails, voir la contribution du Groupe de travail I au Deuxième Rapport d'évaluation)	8
1.2.2 Stabilisation de la concentration de CO ₂ (pour de plus amples détails, voir la contribution du Groupe de travail I au Deuxième Rapport d'évaluation)	8
1.2.3 Prise en compte des effets climatiques d'autres gaz à effet de serre et aérosols : la notion d'équivalent CO ₂	8
1.2.4 Conséquences pour la température et le niveau de la mer de la stabilisation des gaz à effet de serre ..	9
1.2.5 Incidences	9
1.2.6 Coût de la stabilisation des émissions de CO ₂	10
1.2.7 Intégration de l'information sur les incidences et sur les coûts de l'atténuation	10
1.3 Guide du présent document	11
1.3.1 Stratégie adoptée	11
1.3.2 Cadres décisionnels	12
2. Conséquences géophysiques de la stabilisation des gaz à effet de serre	13
2.1 Principes généraux de la stabilisation : stabilisation du dioxyde de carbone et d'autres gaz	13
2.2 Profil des concentrations, scénarios concernant d'autres gaz à l'état de trace et calcul de l'équivalent CO ₂ ..	13
2.2.1 Conséquences de la stabilisation pour les émissions	13
2.2.1.1 Profil des concentrations conduisant à une stabilisation	13
2.2.1.2 Conséquences de la stabilisation de la concentration de CO ₂ pour les émissions	14
2.2.1.3 Principales incertitudes relatives au cycle du carbone	16
2.2.2 Stabilisation du CH ₄ , N ₂ O et d'autres gaz	17
2.2.3 Scénarios de référence concernant la stabilisation	18
2.2.4 Stabilisation de la concentration d'équivalent CO ₂	19
2.2.5 Sensibilité de l'équivalent CO ₂	21
2.3 Conséquences pour la température et le niveau de la mer de la stabilisation de la concentration de CO ₂	24
2.3.1 Analyse de la température et du niveau de la mer : méthodologie	24
2.3.2 Conséquences pour la température et le niveau de la mer de la stabilisation des gaz à effet de serre ..	25
3. Incidences et coût de la stabilisation des gaz à effet de serre	29
3.1 Incidences liées à diverses trajectoires des émissions	29
3.1.1 Importance des incidences pour la prise de décisions concernant la stabilisation	29
3.1.2 Evaluation des incidences biophysiques éventuelles dans la contribution du Groupe de travail II au Deuxième Rapport d'évaluation	30
3.1.3 Evaluation économique des incidences	31
3.1.4 Incertitudes relatives à la projection des incidences de diverses trajectoires	32
3.2 Coût de la stabilisation de la concentration de CO ₂	33
3.2.1 Considérations économiques liées à la stabilisation de la concentration de CO ₂	33
3.2.1.1 Quantité de carbone à éliminer	33
3.2.1.2 Objectif en matière de stabilisation	34
3.2.1.3 Différence de prix entre les combustibles fossiles et les solutions sans carbone	34

3.2.1.4	Itinéraire suivi par les émissions	35
3.2.2	Modélisation du coût de la stabilisation de la concentration de CO ₂	37
3.2.2.1	Etudes disponibles au moment de la parution de la contribution du Groupe de travail III au Deuxième Rapport d'évaluation	37
3.2.2.2	Limites des études existantes	38
3.2.3	Autres considérations importantes	38
3.3	Intégration de l'information sur les incidences et sur les coûts de l'atténuation	39
3.3.1	Introduction	39
3.3.2	Nécessité de la cohérence et d'une vaste perspective	40
3.3.3	Gamme optimale de mesures	40
3.3.4	Prise de décisions successives	41
Références		43
Appendices		45
1	Incidences de la stabilisation de la concentration de CO ₂ sur la température et le niveau de la mer de 1990 à 2300	45
2	Glossaire	47
3	Acronymes et abréviations	51
4	Unités	52
5	Institutions auxquelles appartiennent les auteurs principaux	53
6	Liste des publications du GIEC	54

Préface

Le présent document technique du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), intitulé "Stabilisation des gaz atmosphériques à effet de serre : conséquences physiques, biologiques et socio-économiques" est le troisième publié dans la série des documents techniques du GIEC et a été élaboré à la demande de l'Organe subsidiaire de conseil scientifique et technologique (SBSTA) qui relève de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

Les documents techniques du GIEC sont élaborés soit à la demande des organes de la Conférence des Parties, et agréés par le Bureau du GIEC, soit sur la propre initiative du GIEC. Ils s'inspirent de textes contenus dans les rapports d'évaluation et les rapports spéciaux du GIEC et sont rédigés par des auteurs principaux sélectionnés dans ce but. Une fois le projet de texte établi, il est soumis simultanément à des experts et aux divers gouvernements pour révision, puis une nouvelle fois aux gouvernements pour vérification finale; dans le cas particulier, des observations ont été fournies par 93 personnes représentant 27 pays. Le Bureau du GIEC tient le rôle de comité de rédaction et veille à ce que les auteurs principaux, lors de la mise au point définitive du document, tiennent dûment compte des remarques issues des révisions.

Lors de sa douzième session (Genève, 3-5 février 1997), le Bureau du GIEC a examiné les principales remarques que les gouvernements avaient communiquées après vérification finale. Les auteurs principaux ont ensuite terminé le document technique à sa demande et en tenant compte de ses observations. Le Bureau du GIEC a constaté que les règles établies en la matière avaient été respectées et il a donné son autorisation pour que ce document technique soit communiqué au SBSTA, puis publié.

Nous devons une grande reconnaissance aux auteurs principaux, qui ont très généreusement consacré leur temps à ce document et qui, malgré de courts délais, l'ont terminé en temps voulu. Nous remercions John Houhgton et Gylvan Meira Filho, coprésidents du Groupe de travail I du GIEC, qui ont supervisé les efforts déployés à cet égard, les graphistes du *Meteorological Office* du Royaume-Uni, qui ont préparé les figures pour la publication, Christy Tidd qui a assisté l'auteur principal pour la préparation du document, et en particulier David Griggs, Kathy Maskell et Anne Murrill, du Service d'appui technique du Groupe de travail I du GIEC, qui ont veillé à la qualité de l'ensemble et au respect des délais.

B. Bolin
Président du GIEC

N. Sundararaman
Secrétaire général du GIEC

Stabilisation des gaz atmosphériques à effet de serre : conséquences physiques biologiques et socio-économiques

Ce document a été préparé sous les auspices du Groupe de travail I du GIEC.

Auteurs principaux :

David Schimel, Michael Grubb, Fortunat Joos, Robert Kaufmann, Richard Moss, Wandera Ogana, Richard Richels, Tom Wigley

Contributeurs :

Regina Cannon, James Edmonds, Erik Haites, Danny Harvey, Atul Jain, Rik Leemans, Kathleen Miller, Robert Parkin, Elizabeth Sulzman, Richard van Tol, Jan de Wolde

Auteurs de modèles :

Michele Bruno, Fortunat Joos, Tom Wigley

RÉSUMÉ

Introduction

Il est essentiel de comprendre les contraintes qu'implique la stabilisation de la concentration de gaz à effet de serre pour formuler une politique correspondant aux objectifs de la Convention-cadre et permettant sa mise en œuvre. Le présent document technique présente :

- une étude sur la stabilisation des gaz à effet de serre, sur l'évaluation du forçage radiatif et sur la notion d'«équivalent CO_2 » (concentration de CO_2 conduisant à un forçage radiatif qui correspond à l'augmentation prévue de tous les gaz à effet de serre lorsqu'on considère un ensemble de gaz);
- un ensemble de profils de base de stabilisation du CO_2 conduisant, par l'intermédiaire de deux itinéraires distincts, à une stabilisation entre 350 et 750 ppmv, un seul profil amenant à une stabilisation à 1 000 ppmv (voir la figure 1);
- les émissions déduites des profils de stabilisation ci-dessus;
- une analyse de la stabilisation de gaz à effet de serre autres que le CO_2 ;

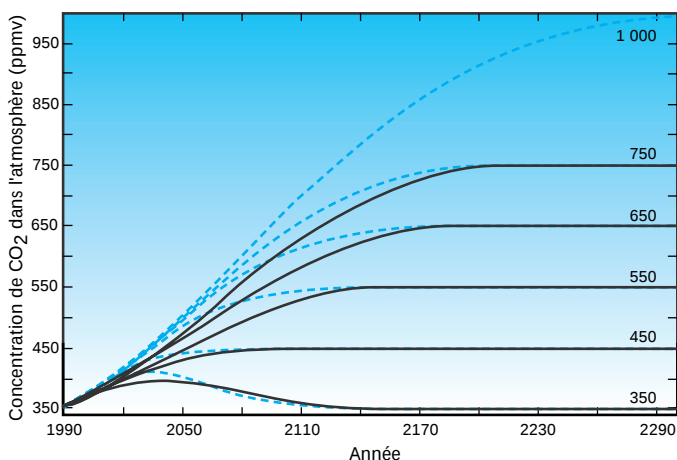


Figure 1. Profils du CO_2 aboutissant à une stabilisation de la concentration s'échelonnant de 350 à 1000 ppmv. A titre de comparaison, la concentration de CO_2 était voisine de 280 ppmv à l'époque préindustrielle et atteint approximativement 360 ppmv de nos jours. Avant de parvenir à une stabilisation pour une concentration comprise entre 350 et 750 ppmv, deux itinéraires différents sont indiqués : les profils S (tirés de GIEC94) et les profils WRE correspondant à une situation où les émissions de CO_2 suivent le scénario IS92a jusqu'en l'an 2000 ou au-delà (selon le niveau de stabilisation). Un seul profil est indiqué dans le cas d'une stabilisation à 1000 ppmv. Ces deux ensembles de profils constituent simplement des exemples tirés d'un éventail d'évolutions possibles vers la stabilisation qu'on peut définir.

- l'évolution de la température et du niveau de la mer moyens mondiaux correspondant aux profils ci-dessus pour une fourchette d'émissions, en posant des hypothèses pour le CH_4 , le N_2O et le SO_2 et en introduisant diverses valeurs dans les modèles pour les paramètres relatifs à la sensibilité du climat et à la fonte des glaces afin de caractériser les incertitudes;
- une analyse des incidences possibles pour l'environnement de l'évolution calculée de la température et du niveau de la mer;
- une étude des facteurs influant sur le coût de l'atténuation;
- une description de la méthode employée pour intégrer les effets de l'évolution du climat et du niveau de la mer et le coût de l'atténuation afin d'obtenir un tableau plus complet des conséquences de l'altération de la composition de l'atmosphère.

Éléments fondamentaux

Le présent document est axé essentiellement sur le CO_2 , car, à ce jour et selon les projections, c'est celui des gaz à effet de serre qui a l'effet le plus prononcé sur le forçage radiatif. Nous considérons aussi les effets d'autres gaz à effet de serre et nous faisons une série d'hypothèses quant à leurs futures émissions éventuelles.

Nous envisageons aussi les effets des aérosols, qui ont tendance à refroidir la planète. Les aérosols troposphériques (particules microscopiques en suspension dans l'air) résultant de la combustion de combustibles fossiles, de la combustion de la biomasse et d'autres sources anthropiques ont conduit à un forçage négatif dont la valeur est hautement incertaine. Comme les aérosols ont une courte durée de vie dans l'atmosphère, leur répartition — donc leurs effets radiatifs immédiats — possèdent un caractère très régional.

Quelques incidences de la stabilisation des gaz à effet de serre

Parmi les cas de stabilisation du CO_2 étudiés, il est à noter que les émissions d'origine humaine cumulées de 1991 à 2100 s'établissent approximativement entre 630 GtC et 1410 GtC pour un niveau de stabilisation situé entre 450 et 1000 ppmv. Notons à titre de comparaison que, dans le cas des scénarios IS92 du GIEC, les émissions cumulées correspondantes vont de 770 à 2 190 GtC.

Nous présentons le calcul des émissions de CO_2 correspondant à une série de niveaux de stabilisation et d'itinéraires fondés sur des modèles et des paramètres disponibles et généralement acceptés à l'époque de la publication du Deuxième Rapport d'évaluation du GIEC. La rétroaction des écosystèmes et des

¹ On trouvera une définition du forçage radiatif dans l'appendice 2.

océans pourrait réduire le stockage du carbone dans le sol et les océans à un niveau quelque peu inférieur à celui défini dans les modèles mondiaux simplifiés du cycle du carbone employés ici et dans le Deuxième Rapport d'évaluation. Les incertitudes dues au fait qu'on a omis certains processus potentiellement essentiels relatifs aux océans et à la biosphère en cours d'évolution du climat pourraient avoir des incidences sensibles sur les conclusions concernant les émissions associées à la stabilisation.

Sous réserve de certaines incertitudes concernant la "sensibilité du climat", la future évolution du climat résultant d'activités humaines est déterminée par la somme de tous les forçages positifs et négatifs dus à l'ensemble des gaz à effet de serre et des aérosols d'origine humaine, et non par le niveau du seul

CO₂. Dans les scénarios concernant le forçage envisagés ici, nous faisons appel à la somme des forçages radiatifs imputables à l'ensemble des gaz à l'état de trace (CO₂, CH₄, O₃, etc.) et des aérosols. Nous considérons le forçage total comme s'il découlait d'une concentration "équivalente" de CO₂. Ainsi, la concentration de l'"équivalent CO₂" est la concentration de CO₂ qui conduirait à la même quantité de forçage radiatif que le mélange considéré de CO₂, d'autres gaz à effet de serre et d'aérosols.

La différence entre le niveau de l'équivalent CO₂ et le niveau du CO₂ seul dépend du niveau auquel sont stabilisées les concentrations d'autres gaz et aérosols actifs sur le plan radiatif. Comme les effets des gaz à effet de serre sont additifs, la stabilisation de la concentration de CO₂ à n'importe quel niveau situé au-dessus de 500 ppmv environ est susceptible de conduire à des variations dans l'atmosphère correspondant au moins au doublement de la concentration de gaz à effet de serre par rapport à l'époque préindustrielle.

Les projections relatives à la température et au niveau de la mer dépendent de la sensibilité supposée du climat, de l'objectif et de l'itinéraire choisis pour la stabilisation de la concentration de CO₂ et des scénarios adoptés pour le forçage dû à d'autres gaz à effet de serre et aux aérosols. Dans les cas de référence, où l'on suppose que les émissions de gaz autres que le CO₂ et de SO₂ restent constantes à leur niveau de 1990, l'augmentation de la température moyenne mondiale par rapport à 1990 se situe entre 0,5 et 2,0 °C en 2100 (figure 2), mais cette fourchette est sensible aux hypothèses concernant les autres gaz et les aérosols. Pour obtenir l'évolution par rapport à l'époque préindustrielle, il faut ajouter 0,3 à 0,7 °C. Le rythme d'augmentation de la température au cours des 50 prochaines années se situe entre 0,1 et 0,2 °C par décennie. L'élévation du niveau de la mer prévue entre 1990 et 2100 se situe entre 25 et 50 cm (figure 2). Cette élévation présente une sensibilité semblable aux hypothèses concernant les autres gaz et les aérosols.

Ce document présente l'évolution de la température et du niveau de la mer à laquelle pourraient conduire divers niveaux de stabilisation des gaz à effet de serre. Il serait cependant possible, moyennant de nouveaux calculs, de déterminer le niveau de stabilisation des gaz à effet de serre nécessaire pour atteindre des objectifs de principe correspondant à une évolution de la température ou du niveau de la mer liée plus directement aux incidences des changements climatiques.

Incidences de l'évolution du climat

On sait beaucoup de choses de la sensibilité et de la vulnérabilité potentielles de certains systèmes et secteurs. A cet égard, il est possible d'identifier des risques importants et des avantages possibles. Actuellement, cependant, notre capacité à intégrer ces informations dans une évaluation des incidences correspondant à divers niveaux de stabilisation ou à diverses trajectoires des émissions est relativement limitée.

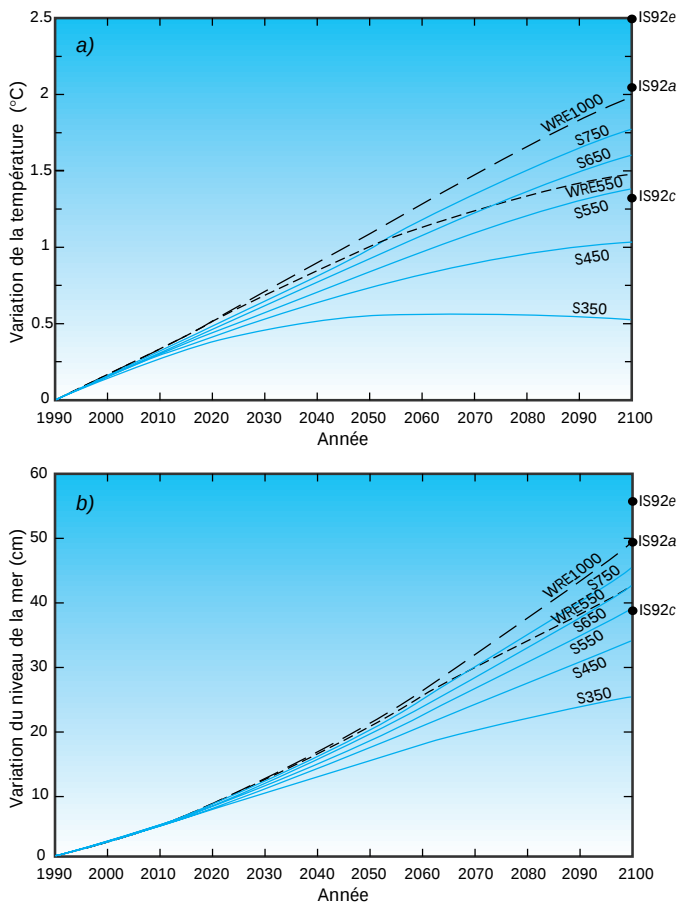


Figure 2. a) Température moyenne mondiale projetée en cas de stabilisation de la concentration de CO₂ selon les profils S et WRE550 et 1000. On suppose que les émissions de CH₄, de N₂O et de SO₂ restent à leur niveau de 1990 et que la concentration d'hydrocarbures halogénés évolue selon un scénario conforme aux objectifs du Protocole de Montréal. On a supposé que la sensibilité du climat s'établissait à une valeur moyenne de 2,5 °C. A titre de comparaison, on a indiqué les résultats obtenus pour l'année 2100 selon les scénarios d'émission IS92a, c et e. Les valeurs sont indiquées par rapport à 1990. Pour obtenir les changements anthropiques par rapport à l'époque préindustrielle, il faut ajouter 0,3 à 0,7 °C de plus. b) Comme en a), sauf en ce qui concerne la modification du niveau de la mer à l'échelle du globe et les valeurs centrales des paramètres relatifs à la fonte des glaces.

Si l'on connaît mal la configuration régionale des futurs changements climatiques, il est clair que la modification du caractère du forçage radiatif associée aux émissions d'origine humaine va altérer sensiblement les climats régionaux et aura des effets différents sur les conditions climatiques des diverses régions. Les changements qu'on observera sur le plan local et régional vont nécessairement porter sur la durée des saisons de croissance, sur la disponibilité d'eau et sur l'incidence du régime des perturbations (phénomènes extrêmes liés à des températures élevées, inondations, sécheresses, incendies et pullulation de parasites). Ces changements auront eux-mêmes des incidences considérables sur la structure et la fonction des milieux naturels et aménagés par l'homme. Les systèmes et activités particulièrement sensibles à l'évolution du climat et du niveau de la mer sont les forêts; les écosystèmes montagnards, aquatiques et côtiers; l'hydrologie et la gestion des ressources en eau (y compris la cryosphère); la production alimentaire et de fibres; l'infrastructure humaine et la santé humaine.

Les incidences ne sont pas directement fonction de l'ampleur et du rythme d'évolution du climat. Pour certaines espèces — donc pour certains systèmes —, il existe des seuils de variation de la température, des précipitations et d'autres facteurs au-delà desquels il risque de se produire des changements discontinus de viabilité, de structure ou de fonction. Il est impossible, actuellement, de regrouper les incidences de façon à obtenir une évaluation globale, en raison d'incertitudes concernant les variations régionales du climat et les réactions régionales, de la difficulté à évaluer les incidences sur les systèmes naturels et la santé humaine et de questions d'équité régionale et intergénérationnelle.

La concentration ultime de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et le rythme d'augmentation de cette concentration risquent d'influer sur les incidences, un rythme plus lent d'évolution du climat laissant davantage de temps aux systèmes pour s'adapter. Cependant, nos connaissances ne sont pas suffisantes, actuellement, pour que nous puissions définir avec précision un rythme et une ampleur des changements constituant un seuil.

Coût de la stabilisation de la concentration de CO₂

Les facteurs qui influent sur les coûts d'atténuation du CO₂ sont les suivants :

- a) futures émissions en l'absence d'intervention ("scénarios de référence");
- b) objectif en matière de concentration et itinéraire à suivre pour aboutir à la stabilisation, qui déterminent le bilan du carbone disponible pour les émissions;
- c) comportement du cycle naturel du carbone, qui influe sur le bilan du carbone disponible pour un objectif et un itinéraire donnés en matière de concentration;

- d) différence de prix entre les combustibles fossiles et les solutions sans carbone et entre divers combustibles fossiles;
- e) progrès techniques et vitesse d'adoption de techniques qui émettent moins de carbone par unité d'énergie produite;
- f) frais transitoires associés à la rotation des immobilisations corporelles, qui augmentent en cas de réforme anticipée;
- g) degré de coopération internationale, qui détermine la mesure dans laquelle des solutions peu coûteuses d'atténuation sont mises en œuvre dans diverses régions du monde;
- h) hypothèses concernant le taux d'actualisation employé pour comparer les coûts à divers moments.

Le coût de la réduction des émissions dépend du scénario de référence adopté, autrement dit de la façon dont l'on prévoit l'évolution des émissions en l'absence de toute intervention. Plus ce scénario est élevé, plus il faudra éliminer de carbone pour atteindre un objectif donné en matière de stabilisation, donc plus l'intervention nécessaire sera lourde. Le coût de la réduction des émissions dépend également de l'objectif fixé en matière de stabilisation de la concentration. En première approximation, cet objectif définit une quantité de carbone pouvant être émis entre aujourd'hui et la date à laquelle l'objectif doit être atteint ("bilan du carbone"). La valeur de ce bilan est un facteur important des coûts d'atténuation. Plus l'objectif est bas en matière de stabilisation, plus le bilan du carbone est faible et plus le degré d'intervention requis est élevé.

Le coût de la stabilisation de la concentration de CO₂ dépend également du prix des combustibles fossiles par rapport aux solutions sans carbone. Le prix à payer pour atteindre un objectif en matière de stabilisation augmente généralement avec la différence de prix entre les combustibles fossiles et les solutions sans carbone. Une grande différence de prix implique que les consommateurs devront dépenser nettement plus pour l'énergie afin qu'on puisse réduire les émissions en remplaçant les combustibles fossiles par des solutions sans carbone. La différence de prix entre les combustibles fossiles non traditionnels et les solutions sans carbone sera sans doute plus faible que la différence de prix entre les combustibles fossiles traditionnels et les solutions sans carbone. Si le pétrole et le gaz continuent à contribuer sensiblement à l'ensemble des sources d'énergie au moment où les émissions mondiales de CO₂ devront être réduites pour atteindre un objectif de stabilisation donné, les frais de conversion seront plus élevés que si le pétrole et le gaz représentent une faible partie de l'énergie consommée. Bien que le supplément de prix à payer pour des solutions sans carbone doive être plus faible pour des niveaux de stabilisation plus élevés, il n'est pas possible de prévoir comment cette différence de prix va évoluer dans le temps. En outre, la demande totale d'énergie devant être d'autant plus importante

que le niveau de stabilisation est élevé, l'effet net sur le prix de la conversion pour divers niveaux de stabilisation est loin d'être clair.

Un même objectif en matière de concentration peut être atteint en faisant passer les émissions par plusieurs itinéraires. On peut équilibrer les émissions à court terme par rapport aux émissions à long terme. Il existe, pour un niveau de stabilisation donné, un "bilan" autorisé d'émissions cumulatives de carbone, le choix de l'itinéraire conduisant à la stabilisation pouvant être considéré comme le problème de la meilleure manière (c'est-à-dire de la façon offrant la plus grande efficacité économique et les plus faibles incidences dommageables) de répartir ce bilan dans le temps. Pour un niveau de stabilisation donné, les différences entre les itinéraires des émissions sont importantes, car les coûts sont différents selon les itinéraires. Plus les émissions sont élevées au départ, plus il est difficile de les corriger par la suite.

Les immobilisations liées à l'énergie ayant généralement une longue durée de vie, une réforme anticipée de celles-ci risque d'être coûteuse. Pour éviter une réforme anticipée, il faut répartir les actions d'atténuation plus également dans le temps et l'espace. Pour réduire le coût de tout objectif en matière de stabilisation, il faut investir dans de nouveaux biens de production et remplacer ceux-ci à la fin de leur durée de vie utile (c'est-à-dire au moment de la rotation des immobilisations). Il s'agit d'un processus continu.

Le coût d'un itinéraire de stabilisation dépend aussi de la façon dont la technologie influe sur le coût de la réduction des émissions à un moment donné et dans le temps. En général, le coût d'un tel itinéraire augmente avec la quantité d'émissions à réduire en un instant donné. L'évolution des techniques nécessaire pour abaisser le coût de la réduction des émissions va exiger un ensemble de mesures. Un net élargissement de la recherche-développement d'Etat, la levée des obstacles que le marché impose au développement et à la diffusion des techniques, des appuis explicites accordés aux marchés, des incitations fiscales et des contraintes appropriées imposées aux émissions vont sans doute avoir un effet global qui stimulera la technologie nécessaire pour abaisser le coût de la stabilisation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère.

Un taux positif d'actualisation ferait baisser le montant actuel des coûts de l'atténuation du fait du moindre poids accordé aux futurs investissements. En effet, plus une charge économique (la réduction des émissions en l'occurrence) est différée, plus les coûts actuels sont faibles. Dans un contexte plus large, l'actualisation réduit le poids imputé aux futures incidences sur l'environnement par rapport aux avantages de la consommation actuelle d'énergie. Cette consommation fait paraître légers de sérieux obstacles — tels que la conversion rapide des systèmes

énergétiques à l'avenir — en dollars d'aujourd'hui et pourrait influencer sur la façon d'envisager l'équité intergénérationnelle.

Intégration des informations concernant les incidences et les coûts de l'atténuation

Le présent document sert de cadre pour intégrer les informations sur le coût, les avantages et les incidences de l'évolution du climat. Les profils de stabilisation supposant une politique inchangée en matière d'émissions pendant quelques décennies ou davantage n'impliquent pas qu'il convient de ne rien faire pendant une telle période. En fait, les études indiquent que même dans le cas d'une politique inchangée pendant un certain temps, il faudra quand même prendre des mesures pour faire baisser sensiblement les émissions pendant cette période. Les stratégies de création de "gammes" de mesures entraînant des réductions immédiates ou futures au-dessous du niveau qui correspond à une politique inchangée sont abordées ci-après.

Il existe de nombreuses possibilités d'initiatives qui facilitent l'adaptation à l'évolution du climat, permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre et aboutissent à la création de techniques susceptibles de réduire les émissions à l'avenir. Un niveau de stabilisation donné, exprimé par rapport à l'équivalent CO₂ ou au forçage radiatif total, peut être obtenu grâce à diverses combinaisons de mesures de réduction des émissions des différents gaz et à l'accroissement des puits de gaz à effet de serre. Les gouvernements devront décider de l'importance des ressources à consacrer à ces mesures et de la combinaison de mesures qui, selon eux, seront les plus efficaces. Il est indiqué dans le Deuxième rapport d'évaluation GTIII² qu'il existe de nombreuses possibilités de mesures "sans regrets"³. Vu qu'actuellement, les politiques sans regrets sont avantageuses, les gouvernements vont devoir décider s'ils vont appliquer la gamme complète des mesures sans regrets et comment ils vont le faire et, dans l'affirmative, s'ils iront au-delà de mesures strictement sans regrets, quand ils le feront et jusqu'à quel point. Le risque d'incidences nettes globales qu'entraîne l'évolution du climat, la prise en compte de l'aversion pour le risque et l'application du principe de précaution justifient des mesures allant au-delà des mesures sans regrets.

² Dénommé ci-après DRE GTIII.

³ Les mesures "sans regrets" sont celles dont les avantages — réduction du prix de l'énergie et réduction des émissions de polluants sur le plan local ou régional, par exemple — sont égaux ou supérieurs à leur prix pour la société, à l'exclusion des avantages d'une atténuation des changements climatiques.

1. INTRODUCTION

1.1 Objectifs

Le présent document technique, fondé sur la contribution des Groupes de travail I, II et III au Deuxième Rapport d'évaluation du GIEC (1996),⁴ approfondit et clarifie les questions scientifiques et techniques que pose l'interprétation de l'objectif de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Cet objectif est exposé dans l'article 2 de la Convention-cadre (Nations Unies, 1992) :

“L'objectif ultime de la présente Convention et de tous instruments juridiques connexes que la Conférence des Parties pourrait adopter est de stabiliser, conformément aux dispositions pertinentes de la Convention, les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable.”

L'article 2 exige donc la stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre. Nous mettons ici l'accent sur le CO₂, mais nous considérons également plusieurs autres gaz pour illustrer les incertitudes associées à un objectif plus général de stabilisation de gaz multiples et pour souligner ce qu'il est possible d'affirmer avec une relative confiance.

Le rapport historique évident établi entre les émissions de CO₂ et l'évolution de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère ainsi que notre connaissance étendue du cycle du carbone impliquent que si l'on continue d'employer des combustibles fossiles, de produire du ciment et de dégager du CO₂ dans le cadre de l'exploitation du sol, au rythme passé ou actuel ou à un rythme plus rapide à l'avenir, la concentration de ce gaz dans l'atmosphère va s'élever. Pour comprendre comment va évoluer la concentration de CO₂ à l'avenir, il convient de quantifier le rapport qui existe entre les émissions de ce gaz et sa concentration dans l'atmosphère en employant des modèles du cycle du carbone.

Le présent document s'inspire de renseignements présentés dans DRE GTI, GTII et GTIII. Nous commençons par analyser les résultats d'un ensemble de calculs normalisés (présentés dans le Rapport 1994 du GIEC⁵ et dans DRE GTI) ayant servi à analyser les rapports existant entre les émissions et les concentrations à plusieurs niveaux de stabilisation du CO₂ dans l'atmosphère, en suivant deux itinéraires distincts

pour atteindre chaque niveau. Nous nous penchons ensuite sur les effets d'autres gaz à effet de serre et aérosols sulfatés (dus aux émissions de SO₂) et nous évaluons les variations de la température et du niveau de la mer liées aux divers niveaux de stabilisation considérés. Enfin, nous passons rapidement en revue les incidences éventuelles, positives ou négatives, des variations de la température et du niveau de la mer projetées et nous abordons le coût de mesures de stabilisation des gaz à effet de serre.

Les projections quant à l'évolution de la température et à l'élévation du niveau de la mer sont établies à partir des modèles simplifiés présentés dans DRE GTI. Ces modèles ont été étalonnés par rapport à des modèles plus complexes. Ces derniers n'ont pas été utilisés pour les analyses présentées ici, car il eût été trop onéreux et trop long de les faire tourner pour le grand nombre de cas étudiés, et du fait que les résultats moyens mondiaux auxquels ils aboutissent peuvent être représentés correctement au moyen de modèles plus simples (voir le document technique II du GIEC : Introduction aux modèles climatiques simples employés dans le Deuxième rapport d'évaluation du GIEC).

Une série de variantes des profils de concentration a été employée dans DRE GTI pour évaluer les conséquences climatiques éventuelles a) de la stabilisation de la concentration de CO₂ en passant par divers itinéraires, b) de scénarios plausibles des futures émissions pour des gaz à l'état de trace autres que le CO₂, et c) des futures émissions de SO₂ à divers niveaux (impliquant divers niveaux pour les aérosols). Dans le contexte de l'article 2 de la Convention-cadre, il est important d'étudier une série de profils d'émissions de gaz à effet de serre susceptibles de conduire à la stabilisation de leur concentration dans l'atmosphère afin de pouvoir envisager diverses possibilités et incidences. En outre, l'analyse de divers profils évite de porter un jugement sur le rythme ou l'ampleur de l'évolution à considérer comme une “perturbation dangereuse”. Etant donné qu'il est essentiel de comprendre les contraintes qu'implique la stabilisation des gaz à effet de serre pour formuler une politique relative aux objectifs de la Convention-cadre et à sa mise en œuvre, nous présentons ici un guide et une évaluation approfondie des calculs sur la stabilisation présentés dans GIEC94 et dans DRE GTI et GTIII.

Plus précisément, nous allons :

- a) présenter un guide sur la stabilisation des gaz à effet de serre, l'évaluation du forçage radiatif et la notion d'“équivalent CO₂” (concentration de CO₂ conduisant à un forçage radiatif moyen mondial qui correspond à l'augmentation prévue de tous les gaz si l'on considère un ensemble de gaz);

⁴ Que nous dénommerons ci-après DRE GTI, DRE GTII et DRE GTIII.

⁵ GIEC, 1995. Cet ouvrage sera désormais dénommé GIEC94.

- b) présenter un ensemble de référence de profils de stabilisation du CO_2 qui, en passant par deux types d'itinéraires, conduiront à une stabilisation située entre 350 et 750 ppmv, un seul profil conduisant à une stabilisation à 1 000 ppmv;
- c) présenter les émissions qu'entraîneraient les profils de stabilisation évoqués ci-dessus;
- d) envisager la stabilisation de facteurs de forçage radiatif autres que le CO_2 ;
- e) calculer (à partir d'un modèle simplifié du climat) l'évolution de la température et du niveau de la mer moyens mondiaux correspondant aux divers profils établis pour le CO_2 , en faisant appel à une série d'hypothèses en ce qui concerne les émissions de CH_4 , de N_2O et de SO_2 et à diverses valeurs pour la sensibilité du climat et les paramètres des modèles de fonte des glaces afin de qualifier les incertitudes (des modèles climatiques simples sont présentés dans le document technique II du GIEC);
- f) aborder les conséquences éventuelles pour l'environnement de l'évolution calculée de la température et du niveau de la mer;
- g) présenter les facteurs qui influent sur le coût de l'atténuation;
- h) examiner la méthode employée pour intégrer les effets de l'évolution du climat et du niveau de la mer et les coûts d'atténuation afin d'obtenir un tableau plus complet des conséquences de l'évolution de la composition de l'atmosphère.

1.2 Points essentiels

1.2.1 Quelques éléments fondamentaux concernant les gaz à effet de serre et les aérosols troposphériques (pour de plus amples détails, voir la contribution du Groupe de travail I au Deuxième Rapport d'évaluation)

Le présent document est axé essentiellement sur le CO_2 , car, à ce jour et selon les projections, c'est celui des gaz à effet de serre qui a l'effet le plus prononcé sur le forçage radiatif ($1,56 \text{ W m}^{-2}$ pour le CO_2 contre $0,47 \text{ W m}^{-2}$ pour le CH_4 , $0,14 \text{ W m}^{-2}$ pour le N_2O et $0,27 \text{ W m}^{-2}$ pour les hydrocarbures halogénés en 1990). On trouvera un exposé sur l'utilité du forçage radiatif pour les études sur l'évolution du climat dans GIEC94 (chapitre 4) et dans le document technique II du GIEC. Nous considérons aussi, dans ce document, les conséquences d'une série d'hypothèses pour les futures émissions d'autres gaz à effet de serre et de SO_2 , précurseur important des aérosols (les aérosols pouvant avoir une action de refroidissement de la planète).

En ce qui concerne les aérosols troposphériques (particules microscopiques en suspension dans l'air) résultant de la combustion de combustibles fossiles, de la combustion de la biomasse et

d'autres sources anthropiques, on a fixé le chiffre très incertain de $-0,5 \text{ W m}^{-2}$ pour le forçage direct (fourchette : de $-0,25$ à $-1,0 \text{ W m}^{-2}$) établi comme moyenne mondiale pour les 100 dernières années. Il pourrait y avoir également un forçage indirect négatif — par modification des nuages — qui reste très difficile à quantifier (voir DRE GTI, chapitre 2). Comme les aérosols ont une courte durée de vie dans l'atmosphère, leur répartition — donc leurs effets radiatifs immédiats — possèdent un caractère très régional. Localement, le forçage négatif dû aux aérosols peut être suffisamment important pour surcompenser le forçage positif imputable aux gaz à effet de serre. Cependant, bien que le forçage négatif soit concentré dans des régions et zones subcontinentales particulières, il a des effets d'échelle continentale à hémisphérique sur le climat en raison de couplages dans la circulation atmosphérique.

1.2.2 Stabilisation de la concentration de CO_2 (pour de plus amples détails, voir la contribution du Groupe de travail I au Deuxième Rapport d'évaluation)

Parmi les cas de stabilisation étudiés, les émissions d'origine humaine cumulées de 1991 à 2100 se situent entre 630 GtC pour une stabilisation à 450 ppmv et 1410 GtC pour une stabilisation à 1000 ppmv. Notons à titre de comparaison que, dans le cas des scénarios IS92 du GIEC, les émissions cumulées correspondantes se situent entre 770 et 2 190 GtC.

Pour chaque niveau de stabilisation établi de 350 à 750 ppmv, deux séries d'itinéraires sont envisagées : les itinéraires "S", qui s'écartent immédiatement du scénario IS92a, et les itinéraires "WRE", qui, au départ, collent à ce scénario. Un seul itinéraire conduisant à une stabilisation à 1000 ppmv est envisagé. Dans les itinéraires WRE, on a prévu des émissions plus importantes à courte échéance, mais une évolution plus précoce et plus rapide allant d'une augmentation à une diminution des émissions, suivie ultérieurement d'émissions plus faibles.

La rétroaction des écosystèmes et des océans pourrait réduire le stockage du carbone dans le sol et les océans à un niveau quelque peu inférieur à celui établi dans les modèles mondiaux simplifiés du cycle du carbone employés ici et dans le Deuxième Rapport d'évaluation. Les incertitudes dues au fait qu'on a omis certains processus potentiellement essentiels relatifs aux océans et à la biosphère en cours d'évolution transitoire du climat pourraient avoir des incidences sensibles sur les conclusions concernant les émissions associées à la stabilisation.

1.2.3 Prise en compte des effets climatiques d'autres gaz à effet de serre et aérosols : la notion d'équivalent CO_2

Sous réserve de certaines incertitudes concernant la "sensibilité du climat" (voir ci-après), la future évolution du climat résultant d'activités humaines est déterminée par la somme de tous les forçages positifs et négatifs dus à l'ensemble des gaz à effet de

serre et des aérosols d'origine humaine, et non par le niveau du seul CO_2 . Les scénarios concernant le forçage employés dans nombre des sorties de modèles représentent la somme des forçages radiatifs imputables à l'ensemble des gaz à l'état de trace (CO_2 , CH_4 , O_3 , etc.) et des aérosols. On peut considérer le forçage total comme s'il découlait d'une concentration "équivalente" de CO_2 . Ainsi, la concentration d'"équivalent CO_2 " est la concentration de CO_2 qui conduirait à la même quantité de forçage radiatif moyen mondial que le mélange considéré de CO_2 , d'autres gaz à effet de serre et d'aérosols.

La différence entre le niveau de l'équivalent CO_2 et le niveau du CO_2 proprement dit dépend du niveau auquel sont stabilisées les concentrations d'autres gaz et aérosols actifs sur le plan radiatif. Le niveau de stabilisation choisi pour le CH_4 , le N_2O et le SO_2 peut influencer sensiblement sur l'équivalent CO_2 . Si les émissions de ces gaz restaient constantes aux niveaux d'aujourd'hui, l'équivalent CO_2 se stabiliserait à un niveau compris entre 26 ppmv environ (S350) et 74 ppmv (WRE 1000) au-dessus du niveau du seul CO_2 . Comme les effets des gaz à effet de serre sont additifs, la stabilisation de la concentration de CO_2 à n'importe quel niveau situé au-dessus de 500 ppmv environ est susceptible de conduire à des variations dans l'atmosphère correspondant au moins au doublement de la concentration de gaz à effet de serre par rapport à l'époque préindustrielle.

1.2.4 Conséquences pour la température et le niveau de la mer de la stabilisation des gaz à effet de serre

Dans le présent document, nous faisons appel à deux indices simples de l'évolution du climat : la température et l'élévation du niveau de la mer moyennes mondiales. L'évolution de la température moyenne mondiale est le principal facteur qui détermine l'élévation du niveau de la mer. Il s'agit également d'un indicateur utile de l'évolution globale du climat. Il faut voir, cependant, que cette évolution ne va pas se produire de façon uniforme sur l'ensemble du globe. Les variations de température et d'autres variables climatiques telles que précipitations, nébulosité et fréquence des phénomènes extrêmes vont fluctuer considérablement selon les régions. Pour pouvoir évaluer les conséquences des changements climatiques, il faut considérer la variabilité de tous les facteurs dans l'espace : forçage climatique, réaction du climat et vulnérabilité des ensembles régionaux de ressources humaines et naturelles. Cependant, l'étude des détails régionaux dépasse la portée du présent document.

La configuration dans l'espace de certains agents de forçage radiatif, notamment les aérosols, est très hétérogène et accroît la variabilité dans l'espace des changements climatiques. Nous présentons ici le forçage dû aux aérosols par rapport à des moyennes mondiales de façon que le lecteur puisse se faire une idée de son ampleur globale, de son effet sur la température moyenne mondiale et de son incidence sur l'élévation du niveau de la mer. L'effet du forçage imputable aux aérosols sur des changements climatiques détaillés risque, en termes de moyenne

mondiale, d'être très différent de l'effet d'un forçage comparable dû aux gaz à effet de serre. En ce qui concerne l'évolution régionale du climat et les incidences sur celui-ci, par conséquent, il ne faut pas considérer que le forçage négatif — ou refroidissement — imputable aux aérosols compense simplement le forçage dû aux gaz à effet de serre.

Les projections relatives à la température et au niveau de la mer dépendent de la sensibilité supposée du climat, de l'objectif et de l'itinéraire choisis pour la stabilisation de la concentration de CO_2 et des scénarios adoptés pour le forçage dû à d'autres gaz à effet de serre et aux aérosols. L'importance relative de ces facteurs est fonction de l'intervalle de temps pendant lequel ils sont comparés. Jusqu'en 2050, les différences entre les itinéraires choisis pour la concentration de CO_2 dans le cas d'un objectif unique de stabilisation sont aussi importantes que le choix de cet objectif. A plus longue échéance, en revanche, le choix de l'objectif devient nécessairement plus important. Les autres gaz à effet de serre et notamment les émissions de SO_2 ont aussi davantage d'importance que le choix de l'objectif, du moins jusqu'en 2050. Cependant, un facteur l'emporte sur tous les autres : il s'agit de la sensibilité du climat, dont l'incertitude, dans toutes les projections, est dominante par rapport aux autres incertitudes.

1.2.5 Incidences

On sait beaucoup de choses de la sensibilité et de la vulnérabilité potentielles de certains systèmes et secteurs. A cet égard, il est possible d'identifier des risques importants et des avantages possibles. Actuellement, cependant, notre capacité à intégrer ces informations dans une évaluation des incidences correspondant à divers niveaux de stabilisation ou à diverses trajectoires des émissions est relativement limitée.

Si l'on connaît mal la configuration régionale des futurs changements climatiques, il est clair que la modification du caractère du forçage radiatif associée aux émissions d'origine humaine va altérer sensiblement les climats régionaux et aura des effets différents sur les conditions climatiques des diverses régions. Les changements qu'on observera sur le plan local et régional vont nécessairement porter sur la durée des saisons de croissance, sur la disponibilité d'eau et sur l'incidence du régime des perturbations (phénomènes extrêmes liés à des températures élevées, inondations, sécheresses, incendies et pullulation de parasites). Ces changements auront eux-mêmes des incidences considérables sur la structure et la fonction des milieux naturels et aménagés par l'homme. Les systèmes et activités particulièrement sensibles à l'évolution du climat et du niveau de la mer sont les forêts; les écosystèmes montagnards, aquatiques et côtiers; l'hydrologie et la gestion des ressources en eau (y compris la cryosphère); la production alimentaire et de fibres; l'infrastructure humaine et la santé humaine. La plupart des études d'impact actuelles consistent en des analyses des conséquences de l'évolution du climat à l'équilibre en cas de doublement de la concentration d'équivalent CO_2 . Peu

d'études, à ce jour, portent sur les réactions dans le temps à des conditions plus réalistes supposant une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre.

Les incidences ne sont pas directement fonction de l'ampleur et du rythme de l'évolution du climat. Pour certaines espèces — donc pour certains systèmes —, il existe des seuils de variation de la température, des précipitations et d'autres éléments au-delà desquels il risque de se produire des changements discontinus de viabilité, de structure ou de fonction.

Il est impossible actuellement de regrouper les incidences de façon à obtenir une évaluation globale, en raison de notre connaissance insuffisante des variations régionales du climat et des réactions régionales, de la difficulté à évaluer les incidences sur les systèmes naturels et la santé humaine et de questions d'équité interrégionale et intergénérationnelle.

La concentration ultime de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et le rythme d'augmentation de cette concentration risquent d'influer sur les incidences, un rythme plus lent d'évolution du climat laissant davantage de temps aux systèmes pour s'adapter. Cependant, nos connaissances ne sont pas suffisantes, actuellement, pour que nous puissions définir avec précision un rythme et une ampleur des changements constituant un seuil.

1.2.6 Coût de la stabilisation des émissions de CO₂

Les facteurs qui influent sur les coûts d'atténuation du CO₂ sont les suivants :

- futures émissions en l'absence d'intervention ("scénarios de référence");
- objectif en matière de concentration et itinéraire à suivre pour aboutir à la stabilisation, qui déterminent le bilan du carbone disponible pour les émissions;
- comportement du cycle naturel du carbone, qui influe sur le bilan du carbone disponible pour un objectif et un itinéraire donnés en matière de concentration;
- différence de prix entre les combustibles fossiles et les solutions sans carbone et entre divers combustibles fossiles;
- progrès techniques et vitesse d'adoption de techniques qui émettent moins de carbone par unité d'énergie produite;
- frais transitoires associés à la rotation des immobilisations corporelles, qui augmentent en cas de réforme anticipée;
- degré de coopération internationale, qui détermine la mesure dans laquelle des solutions peu coûteuses d'atténuation sont mises en œuvre dans diverses régions du monde;

- h) hypothèses concernant le taux d'actualisation employé pour comparer les coûts à divers moments.

1.2.7 Intégration de l'information sur les incidences et sur les coûts de l'atténuation

Le présent document sert de cadre pour intégrer les informations sur le coût, les avantages et les incidences de l'évolution du climat. Il convient d'abord de noter que les profils de stabilisation supposant une politique inchangée en matière d'émissions pendant quelques décennies ou davantage n'impliquent pas qu'il convient de ne rien faire pendant une telle période. En fait, les études indiquent que même dans le cas d'une politique inchangée pendant un certain temps, il faudra quand même prendre des mesures pour faire baisser sensiblement les émissions pendant cette période. Les stratégies de création de "gammes" de mesures entraînant des réductions immédiates ou futures au-dessous du niveau qui correspond à une politique inchangée sont abordées ci-après.

Nous cherchons à montrer ici comment il est possible de réunir des informations sur le coût, les incidences et les avantages de la stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Une telle analyse, qui se prête à divers modes de prise de décisions, comporte deux volets. Le premier volet, qui porte sur les incidences, consiste à rassembler des informations sur l'évolution prévue de la concentration puis à évaluer les changements climatiques éventuels et leurs conséquences. Le deuxième volet, qui porte sur l'atténuation, consiste à regrouper des informations sur les émissions et sur le coût des mesures d'atténuation devant aboutir à une série d'itinéraires et de niveaux de stabilisation. Il faut combiner ces deux volets pour obtenir une évaluation intégrée des changements climatiques et de la stabilisation (figure 3).

Un niveau de stabilisation donné, exprimé par rapport à l'équivalent CO₂ ou au forçage radiatif total, peut être obtenu grâce à diverses combinaisons de mesures de réduction des

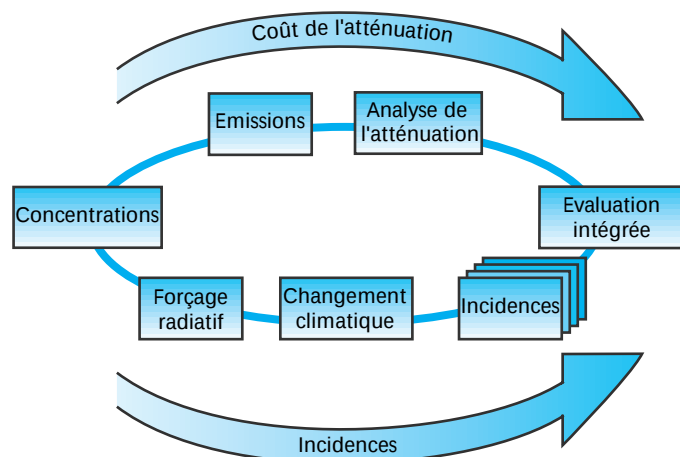


Figure 3 Aperçu de la structure et de l'agencement logique du présent document technique.

émissions des différents gaz et à l'accroissement des puits de gaz à effet de serre. Il devrait être possible d'abaisser le coût de l'atténuation si l'on analyse l'ensemble de ces solutions et si l'on choisit les moins onéreuses tout en tenant compte des sources et des puits. Pour obtenir une répartition optimale des mesures, il faudra recueillir des informations sur les conséquences pour la concentration et le climat des diverses stratégies concernant les émissions, sur le coût de l'atténuation et d'autres caractéristiques des diverses solutions, et sur les échelles de temps et les indices climatiques et non climatiques des incidences à utiliser pour comparer les divers gaz. En raison d'une forte incertitude, il faudra, dans le cadre d'un processus évolutif, réévaluer et modifier ces ensembles de mesures dès que de nouvelles informations seront disponibles.

Afin de mettre en œuvre une gamme de mesures pour faire face à l'évolution du climat, les gouvernements devront décider de l'importance des ressources à consacrer à ces mesures et de la combinaison de mesures qui, selon eux, seront les plus efficaces. Vu qu'actuellement, les politiques sans regrets sont avantageuses, les gouvernements vont devoir décider s'ils vont appliquer la gamme complète des mesures sans regrets et comment ils vont le faire et, dans l'affirmative, s'ils iront au-delà de mesures strictement sans regrets, quand ils le feront et jusqu'à quel point. Le risque d'incidences nettes globales qu'entraîne l'évolution du climat, la prise en compte de l'aversion pour le risque et l'application du principe de précaution justifient des mesures allant au-delà des mesures sans regrets (DRE GTIII).

Il existe de nombreuses possibilités d'initiatives qui facilitent l'adaptation à l'évolution du climat, permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre et aboutissent à la création de techniques susceptibles de réduire les émissions à l'avenir : réduction immédiate des émissions afin de ralentir l'évolution du climat; recherche-développement sur de nouvelles techniques d'approvisionnement et de conservation visant à abaisser les futurs coûts d'atténuation; poursuite des recherches visant à réduire les incertitudes scientifiques critiques; investissement dans des mesures qui aideront les sociétés humaines et les écosystèmes à s'adapter à l'évolution du climat grâce à l'atténuation des incidences négatives et aux avantages résultant de l'augmentation du CO₂ (par ex. grâce à l'accroissement de l'efficacité avec laquelle certaines cultures à haute teneur en CO₂ utilisent l'eau ou les éléments nutritifs). Il s'agit non pas de choisir entre "tout ou rien", mais d'opter pour une répartition correcte de diverses mesures, prises dans leur ensemble et successivement. Cette répartition va varier dans le temps selon l'objectif défini en matière de concentration, qui pourra lui-même être ajusté à la lumière des nouvelles connaissances scientifiques et économiques. La gamme de mesures appropriée, qui va également varier selon les pays, dépendra des marchés de l'énergie, de considérations économiques, de la structure politique et de la réceptivité de la société.

1.3 Guide du présent document

1.3.1 Stratégie adoptée

La figure 3 illustre l'organisation du présent document. Cette organisation a pour objet de réunir des informations importantes intéressant un grand nombre de décideurs à propos de la mise en œuvre de l'objectif de la CCNUCC. Ces informations s'inscrivent dans deux grandes catégories (ou "volets"), nécessaires pour comprendre quels sont les coûts et les avantages de la stabilisation. Dans la première catégorie, nous avons rassemblé des renseignements sur l'évolution du climat et sur ses conséquences. Dans la deuxième, nous avons réuni des renseignements sur les émissions et sur le coût de leur atténuation. Les renseignements sur la stabilisation de la concentration de gaz à effet de serre, recueillis dans DRE GTI, GTII et GTIII, sont à exploiter dans le cadre d'une analyse plus intégrée.

La stratégie que nous avons adoptée découle de DRE GTI. Les auteurs de ce document se sont fondés sur une série de profils des concentrations pour calculer les émissions d'origine humaine conformément à la physique et à la biologie des écosystèmes océaniques et terrestres, bien que sous une forme simplifiée (voir la section 2.2.1.3 sur les incertitudes). A partir des profils des concentrations, nous avons déterminé, en employant les modèles climatiques simplifiés présentés dans DRE GTI (section 6.3), la température et le niveau de la mer moyens mondiaux qu'entraînerait la concentration de CO₂ considérée dans les profils (section 2.3). Nous avons également effectué des analyses de sensibilité indiquant les effets des autres gaz et aérosols sur les analyses centrales relatives au CO₂. L'évolution moyenne mondiale de la température et du niveau de la mer sert de cadre à l'étude des conséquences pour les ressources naturelles, les infrastructures, la santé humaine et d'autres éléments sur lesquels influe le climat (section 3.1). C'est ainsi que se termine le volet "incidences" de l'analyse (voir la figure 3). On notera que cette analyse ne présente qu'un tableau moyen mondial simplifié des conséquences. Pour obtenir un tableau plus détaillé, il faut considérer l'évolution du climat et la vulnérabilité des systèmes sur un plan régional (sujet abordé dans DRE GTI, chapitre 6, ainsi que dans DRE GTII).

Le volet "coût des mesures d'atténuation" de cette analyse a également pour point de départ les profils des concentrations (voir la figure 3). Ces profils sont utilisés parallèlement à des modèles du cycle du carbone (voir DRE GTI, section 2.1 et GIEC94, section 1.5) pour calculer les émissions anthropiques conformément à ces modèles (section 2.2.1). Si l'on part des hypothèses appropriées, les émissions calculées peuvent servir dans des modèles économiques pour évaluer à combien il reviendrait de suivre le profil de stabilisation plutôt qu'une trajectoire supposant une politique inchangée (section 3.2). Il est possible de calculer le coût de l'atténuation pour un grand nombre de profils de stabilisation, à l'aide de multiples modèles économiques, ce qui donnera une idée de la fourchette des coûts d'atténuation envisageables pour un objectif et un

itinéraire de stabilisation donnés. On notera que dans toutes ces analyses, on tient compte des coûts économiques de la stabilisation correspondant à des profils de concentration donnés. Ainsi, les trajectoires ne sont pas “optimales” et ne constituent pas des recommandations. Elles servent plutôt à illustrer les liens existant entre les concentrations et les émissions, donc le coût de l’atténuation.

Théoriquement, les deux volets se rejoignent à la fin de la section sur l’intégration de l’information relative aux incidences et aux coûts de l’atténuation (section 3.3). Ni l’un ni l’autre de ces volets ne constitue une base complète pour la prise de décisions. Ce type général de problème se prête à une grande variété de cadres de prise de décisions, dans lesquels il est possible d’intégrer cette information de multiples façons (voir DRE GTIII, chapitre 4).

1.3.2 Cadres décisionnels

S’il est important de réunir des informations sur les coûts et les avantages de la stabilisation, cette opération ne revient pas à une simple analyse coûts-avantages. Le paradigme coûts-avantages est l’application décisionnelle la plus courante de la mise en équilibre des coûts et des avantages, mais il ne s’agit pas de la seule approche existante. Il existe en effet d’autres techniques : analyse d’efficacité, analyse multicritère et analyse des décisions (DRE GTIII, p. 151). Il convient, dans les cadres décisionnels, de considérer l’incertitude de l’évolution prévue

des concentrations, des effets sur le climat qui s’ensuivront et des conséquences pour les sociétés humaines et les écosystèmes. Il existe une vaste gamme de paradigmes tenant compte de cette incertitude, dont on trouvera le résumé dans DRE GTIII.

L’analyse des incertitudes biophysiques et économiques présentée dans le présent document ne constitue qu’un bref résumé de ces questions. Bien qu’on puisse en trouver un exposé plus détaillé dans DRE GTI, II et III, il reste à analyser dans son ensemble l’incertitude attachée à l’opération qui consiste à établir un lien entre les concentrations et leurs coûts et conséquences. Indépendamment de la technique employée dans le processus de décision, on peut utiliser les informations concernant les coûts et les avantages de l’atténuation des émissions pour améliorer la qualité des décisions de principe.

Dans le présent document, nous ne cherchons à juger ni les aspects pratiques de la mise en œuvre de stratégies d’atténuation des émissions, ni les problèmes d’impartialité et d’équité que posent ces questions. Si nous nous situons dans une perspective mondiale, c’est pour des questions méthodologiques et pédagogiques, ce qui n’implique nullement que l’aspect régional a moins d’importance. Il est clair qu’une politique climatique doit tenir compte d’un grand nombre de considérations nationales et internationales. Tout cela ajoute à la grande complexité des problèmes auxquels sont confrontés les décideurs.

2. CONSÉQUENCES GÉOPHYSIQUES DE LA STABILISATION DES GAZ À EFFET DE SERRE

2.1 Principes généraux de la stabilisation : stabilisation du dioxyde de carbone et d'autres gaz

Les aspects scientifiques de la stabilisation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère par rapport à la stabilisation de la concentration d'autres gaz prêtent à confusion, particulièrement en ce qui concerne la notion de "durée de vie". Les processus qui gouvernent la durée de vie des principaux gaz sont présentés en détail dans DRE GTI (chapitre 2) et dans GIEC94, documents contenant des renseignements essentiels pour cette brève étude.

La plupart des réservoirs de carbone échangent du CO_2 avec l'atmosphère : ils absorbent (océans) ou assimilent (écosystèmes) et dégagent (océans) ou respirent (écosystèmes) du CO_2 . Le point essentiel, ici, c'est que le carbone d'origine humaine émis dans l'atmosphère n'est pas *détruit* mais *s'ajoute* aux réservoirs de carbone, parmi lesquels il est *redistribué*. Les réservoirs en question échangent du carbone entre eux sur une vaste gamme d'échelles de temps déterminées par la durée de renouvellement de chacun d'entre eux. Les durées de renouvellement vont de quelques années ou décennies (renouvellement du carbone dans les plantes) à plusieurs millénaires (renouvellement du carbone en eau profonde et dans les nappes souterraines à longue durée de vie). Ces échelles de temps sont généralement nettement plus longues que la durée moyenne de séjour d'une molécule donnée de CO_2 dans l'atmosphère, qui n'est que de quatre ans. Le grand nombre des échelles de temps a une autre conséquence remarquable : il est impossible de qualifier par une seule constante de temps l'évolution d'une concentration perturbée de CO_2 dans l'atmosphère vers un nouvel équilibre. Ainsi, toute tentative de qualifier l'expulsion hors de l'atmosphère du CO_2 d'origine humaine par une seule constante de temps (par ex. 100 ans) ne peut être interprétée que dans un sens qualitatif. Une évaluation quantitative fondée sur une seule durée de vie serait erronée.

Contrairement au CO_2 , les aérosols et les gaz à effet de serre autres que le CO_2 tels que les hydrocarbures halogénés, le CH_4 et le N_2O sont détruits (par oxydation ou décomposition photochimique, ou alors, pour les aérosols, par dépôt sur le sol). Le temps qu'une molécule (ou particule) de ce type passe en moyenne dans l'atmosphère (c'est-à-dire sa durée de renouvellement) est égal ou à peu près semblable à la durée d'ajustement.

Le méthane, émis dans l'atmosphère par diverses sources (voir DRE GTI), est détruit principalement par oxydation par le radical hydroxyle (OH) dans l'atmosphère et par des micro-organismes dans le sol. La durée d'ajustement d'une perturbation du méthane atmosphérique est gouvernée par son oxydation (qui donne du CO_2 et de la vapeur d'eau) plutôt que par échange avec d'autres réservoirs, d'où l'éventualité d'une

réintroduction ultérieure de méthane dans l'atmosphère. Le calcul de la durée de vie du méthane est compliqué par les rétroactions qui se produisent entre le CH_4 et le radical OH : 1 % d'augmentation de la concentration de méthane modifie de -0,17 à +0,35 %. le taux d'élimination de ce gaz (DRE GTI, section 2.2.3.1). De nombreux autres processus de rétroaction qui se produisent dans le système $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-OH-NO}_x\text{-UV}$ influent également sur la durée de vie du méthane. Le méthane peut se stabiliser à l'échelle de sa durée de vie dans l'atmosphère : quelques décennies ou moins.

L'hémioxyde d'azote a une longue durée de vie : de 100 à 150 ans. Le N_2O est éliminé de la troposphère (où il a un effet de serre) par échange avec la stratosphère où il est lentement détruit par décomposition photochimique. Tout comme le méthane, il a une durée de vie gouvernée par sa vitesse de destruction. Comme le méthane également, il est détruit plutôt qu'échangé avec d'autres réservoirs de N_2O . Pour que la concentration de N_2O se stabilise, il faut que ses sources soient réduites. Une telle réduction doit s'étaler sur une longue période pour influencer la concentration de ce gaz, car il a une durée de vie d'environ 120 ans. Par ailleurs, la concentration en aérosols s'ajuste en quelques jours ou quelques semaines à la suite d'une variation des émissions d'aérosols ou de leurs précurseurs.

2.2 Profil des concentrations, scénarios concernant d'autres gaz à l'état de trace et calcul de l'équivalent CO_2

2.2.1 Conséquences de la stabilisation pour les émissions

2.2.1.1 Profil des concentrations conduisant à une stabilisation

Dans le présent document, nous évaluons les 11 profils caractéristiques de concentration du CO_2 (qui se stabilisent entre 350 et 1000 ppmv; il s'agit des profils dits "S" et "WRE") présentés dans DRE GTI. Ces profils définissent des itinéraires de concentration dans le temps qui conduisent progressivement à une stabilisation au niveau considéré (figure 4). Les profils WRE prévoient une concentration du CO_2 plus importante et plus précoce que les profils S, mais ils aboutissent au même niveau au moment de la stabilisation (Wigley *et al.*, 1996). Les profils peuvent également servir de paramètres pour calculer une fourchette d'émissions définies dans le temps. Les émissions ainsi calculées peuvent elles-mêmes servir de paramètres dans des modèles économiques servant à déterminer le coût d'atténuation qu'implique la réduction des émissions si l'on suit un profil de concentration donné. Il est à noter que cette approche ne permet pas de calculer l'itinéraire optimal des émissions ni d'en dire quoi que ce soit d'autre.

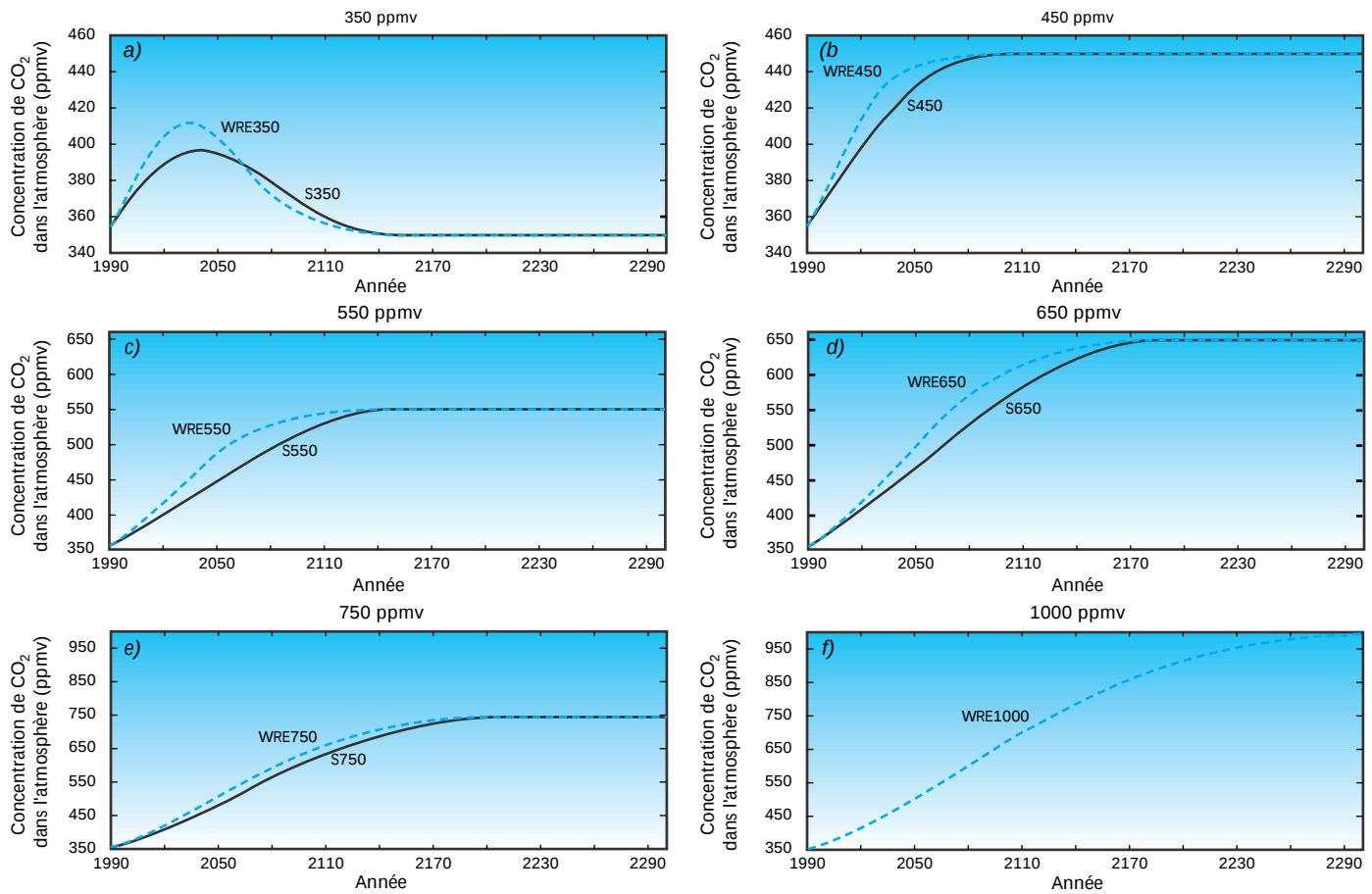


Figure 4. Profils du CO₂ aboutissant à une stabilisation de la concentration s'échelonnant de 350 à 1000 ppmv. A titre de comparaison, la concentration de CO₂ était voisine de 280 ppmv à l'époque préindustrielle et atteint approximativement 360 ppmv de nos jours. Avant de parvenir à une stabilisation pour une concentration comprise entre 350 et 750 ppmv, deux itinéraires différents sont indiqués : les profils S (tirés de GIEC94) et les profils WRE (Wigley, *et al.*, 1996) correspondant à une situation où les émissions de CO₂ suivent le scénario IS92a jusqu'en l'an 2000 ou au-delà (selon le niveau de stabilisation). Un seul profil est indiqué dans le cas d'une stabilisation à 1000 ppmv. Ces deux ensembles de profils constituent simplement des exemples tirés d'un éventail d'évolutions possibles vers la stabilisation qu'on peut définir.

2.2.1.2 Conséquences de la stabilisation de la concentration de CO₂ pour les émissions

Nous réétudions ici les profils S350-750 et WRE350-1000 présentés dans GIEC94 (chapitre 1) et dans DRE GTI (section 2.1), mais de façon plus approfondie qu'il n'a été possible de le faire dans ces documents. Nous présentons d'abord des graphiques montrant la concentration de CO₂ par rapport au temps (figure 4) et les émissions correspondantes par rapport au temps pour l'ensemble des 11 profils, ainsi, à titre de comparaison, que les scénarios IS92a, c et e (figure 5). On notera que les émissions de CO₂ prévues dans les scénarios IS92a et e sont plus élevées en 2050 que celles correspondant à tous les profils S et WRE (à l'exception du profil WRE1000, où l'on a adopté les concentrations définies dans le profil IS92a jusqu'en 2050). Le scénario IS92c indique des émissions plus faibles en 2050 que les profils S550 et WRE550 et que l'ensemble des profils correspondant à des niveaux plus élevés de stabilisation, quel que soit l'itinéraire des émissions.

On trouvera chez Enting *et al.* (1994) de plus amples informations concernant les hypothèses sur lesquelles sont fondés ces résultats et sur les différences entre les modèles. Pour les profils de stabilisation définis, une période d'augmentation des émissions est généralement suivie d'une diminution rapide jusqu'au niveau de stabilisation. On notera ici encore que ces caractéristiques ne s'appliquent pas aux profils S350 et WRE350, qui prévoient des émissions négatives pendant un certain temps, le niveau 350 ppmv étant plus bas que la concentration actuelle. La figure 5 montre que les profils WRE prévoient des émissions plus importantes dans un premier temps, suivies d'un passage plus rapide de l'augmentation à la diminution des émissions, ainsi que des émissions plus faibles par la suite, avant que les émissions correspondant aux profils S et WRE ne convergent. Nous ne nous attachons pas ici à définir un itinéraire optimal pour les émissions. Nous nous contentons de montrer quelles sont les conséquences pour les émissions d'itinéraires définis de la stabilisation des concentrations.

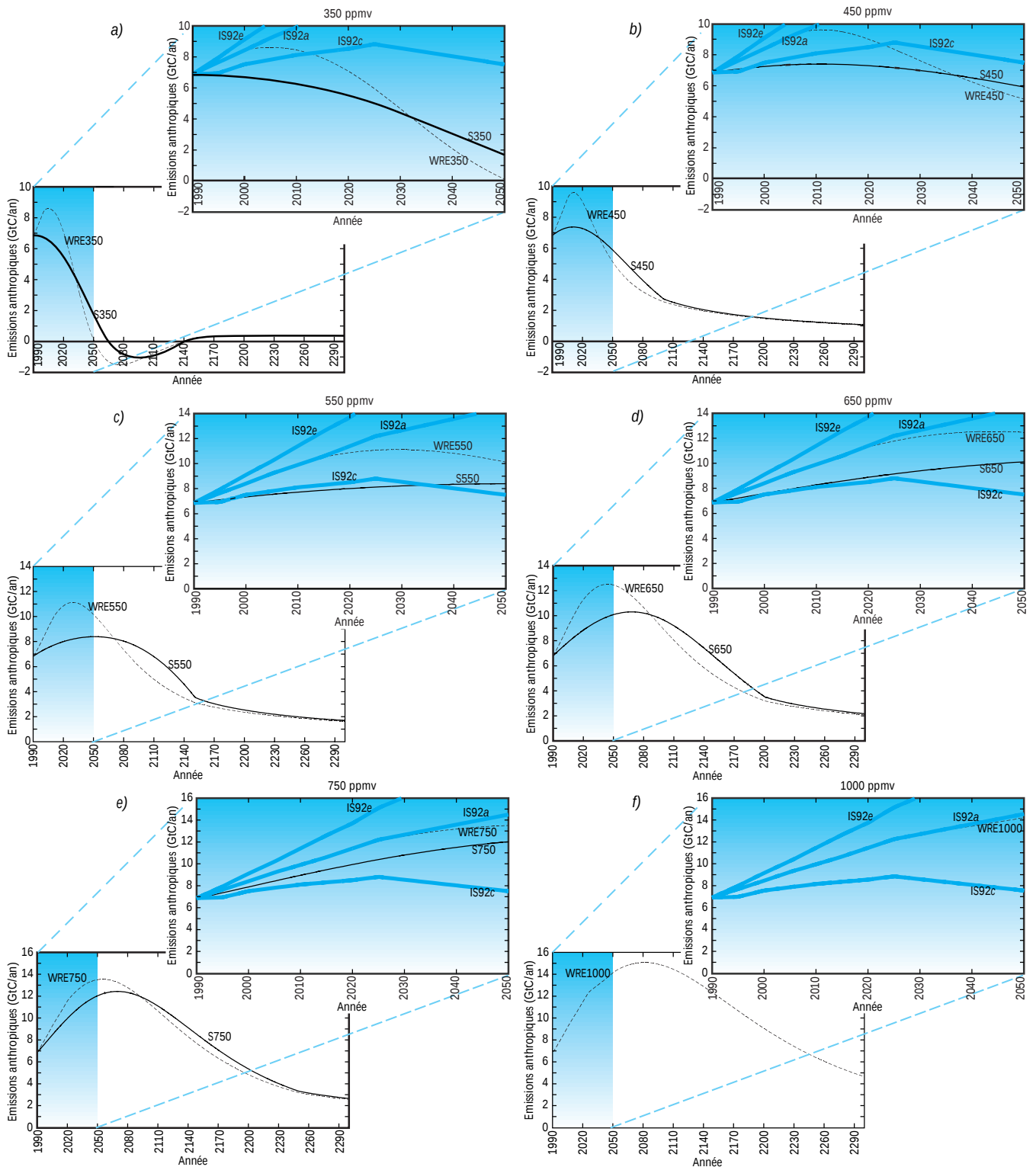


Figure 5. Evolution des émissions anthropiques de CO₂ (combustibles fossiles, ciment et utilisation des sols) de 1990 à 2300 aboutissant à une stabilisation de la concentration de CO₂ selon les profils calculés à l'aide du modèle du cycle du carbone de Berne (voir figure 4). La période 1990-2050 est illustrée plus en détail dans un diagramme élargi, où est indiquée, à titre de comparaison, l'évolution des émissions de CO₂ selon les scénarios IS92a, c et e. Les profils WRE, qui correspondent à une situation où les émissions de CO₂ suivent initialement le scénario IS92a, présentent un maximum supérieur à celui des profils S, mais aussi une transition plus rapide et plus aisée de la phase de progression des émissions à la phase de réduction. Les analyses réalisées dans GIEC94 et DRE GTI (section 2.1) indiquent que les résultats obtenus au moyen d'autres modèles peuvent différer de ± 15 % des résultats présentés ici. Une incertitude supplémentaire résulte de notre compréhension encore imparfaite des phénomènes en jeu et du fait que les modèles du cycle du carbone utilisés dans DRE GTI (section 2.1) ne tiennent pas compte de certains processus biosphériques

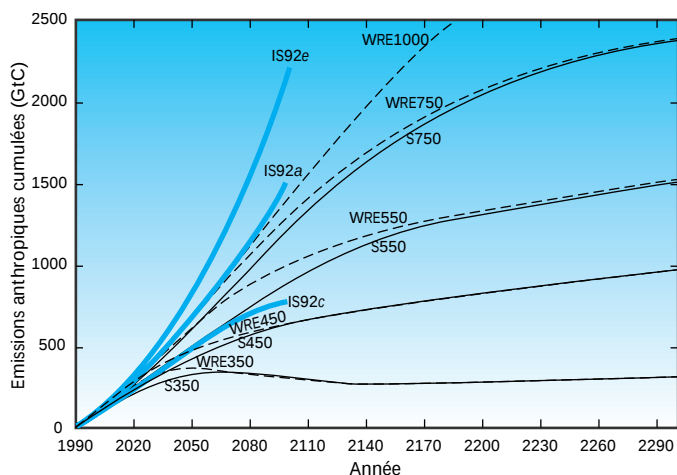


Figure 6. Émissions anthropiques de CO₂ cumulées à partir de 1990. Dans la phase initiale, les émissions cumulées correspondant aux profils S sont inférieures à celles qui correspondent aux profils WRE. Toutefois, à plus longue échéance, les deux types de profils finissent par converger, quel que soit le niveau de stabilisation. On notera que plus le niveau de stabilisation éventuel est élevé et les émissions cumulées (le "bilan du carbone" évoqué dans le texte) sont importantes, plus la convergence des deux profils a lieu tardivement. Ces résultats ont été obtenus à l'aide du modèle du cycle du carbone de Berne. Pour plus de précisions sur les incertitudes, on se reportera à la section 2.3.3 ainsi qu'à la légende de la figure 5.

La figure 6 présente les émissions de CO₂ cumulées dans le temps aboutissant à une stabilisation à 350, 450, 550, 750 et 1 000 ppmv et les émissions correspondantes dans les scénarios IS92a, e et c. Elle indique clairement qu'en 2100, les émissions cumulatives correspondant aux scénarios IS92a et e sont plus importantes que pour l'ensemble des profils S et WRE. Comme la figure 5, la figure 6 montre distinctement que les profils WRE prévoient des émissions nettement plus élevées dans un proche avenir mais qu'ultérieurement, les émissions cumulatives, dans les profils WRE, sont très semblables à celles prévues par les profils S. S'il en est ainsi, c'est que, pour un niveau de stabilisation donné, les émissions cumulées à long terme sont relativement insensibles à l'itinéraire emprunté pour aboutir à la stabilisation.

Les émissions calculées pour un profil de concentration donné aboutissant à une stabilisation définissent le "bilan du carbone" disponible pour les émissions d'origine humaine dues à la combustion de combustibles fossiles, à la fabrication de ciment, à l'évolution de l'occupation des sols et à d'autres activités. Plus les émissions cumulatives sont importantes (correspondant à des niveaux de stabilisation plus élevés), plus est important le bilan du carbone disponible pour des activités humaines (voir la section 3.2). L'importance du bilan du carbone est également sensible au choix de l'itinéraire, surtout au début (ce qu'illustrent les différences entre les profils S et WRE à la figure 6).

2.2.1.3 Principales incertitudes relatives au cycle du carbone

Les auteurs de DRE GTI (section 2.1) ont fait appel, pour le calcul d'émissions correspondant à une série de niveaux de

stabilisation et d'itinéraires, à des modèles et à des paramètres disponibles et généralement acceptés à l'époque. Ayant étudié ici les données produites dans le Deuxième Rapport d'évaluation, dont nous avons fait la synthèse, nous nous fions aux modèles présentés dans ce rapport. Cependant, des travaux exposés dans la section 2.1 et les chapitres 9 et 10 de celui-ci laissent entendre que des mécanismes dont on n'a pas tenu compte dans les modèles simplifiés du cycle mondial du carbone pourraient affecter sensiblement les résultats. Les incertitudes dues au fait qu'on a omis certains processus potentiellement essentiels relatifs aux océans et à la biosphère et l'effet de ces processus en cours d'évolution transitoire du climat pourraient avoir des incidences sensibles sur les conclusions concernant les incidences.

Dans les modèles du cycle du carbone employés dans DRE GTI et sur lesquels nous nous fondons ici, la stimulation de la croissance des plantes par le CO₂ est la seule interaction envisagée entre les conditions du milieu et le carbone terrestre. Comme l'indique DRE GTI (section 2.1 et chapitre 9), cette hypothèse a sans doute plusieurs défauts. D'abord, les rétroactions avec les écosystèmes pourraient moduler la sensibilité du stockage du carbone dans le sol, dont la quantité pourrait être moins importante que ce qu'on a supposé dans les modèles mondiaux simplifiés du carbone adoptés dans DRE GTI. Cette incertitude est illustrée par les diagrammes de DRE GTI (section 2.1) et de GIEC94 (chapitre 1). En deuxième lieu, la sensibilité au CO₂ peut varier par acclimatation, ce qui pourrait en affaiblir l'effet dans le temps. D'autres processus végétaux pourraient agir en sens inverse, le bilan en termes de fixation du carbone n'étant pas connu (DRE GTI, chapitre 9). Enfin, d'autres processus actuels et à venir pourraient influencer sur le stockage du carbone dans le sol. Il s'agit de la fertilisation par dépôt d'azote, de l'évolution du climat (Dai et Fung, 1993) et de l'évolution de l'occupation des sols (DRE GTI, section 2.1 et chapitre 9). Certains de ces mécanismes, comme le dépôt d'azote, pourraient avoir un effet "saturant" et même conduire à un dépérissement des forêts à l'avenir. Bien qu'on ait étudié la sensibilité à ces interactions (VEMAP, 1995, par exemple), il n'existe actuellement pas de consensus quant à la meilleure manière d'intégrer ce facteur à des modèles simplifiés. Selon la synthèse des résultats énoncés dans DRE GTI (section 2.1 et chapitre 9) et dans GIEC94 (chapitre 1), en cours de stabilisation, les échanges se produisant dans la biosphère pourraient modifier les émissions cumulatives de ± 100 GtC par rapport aux scénarios de référence présentés. L'incidence de ce facteur sur le coût de l'atténuation est abordée dans la section 3.2.

Dans le calcul des émissions découlant des concentrations effectués à partir de modèles du cycle du carbone, on n'a supposé l'existence d'aucune rétroaction du climat avec la circulation océanique, la biogéochimie et les écosystèmes terrestres. La théorie (Townsend *et al.*, 1992; GIEC94, chapitre 1) et l'observation indiquent une forte sensibilité à la température des émissions de CO₂ dans la biosphère (Keeling *et al.*, 1995). Cependant, une telle sensibilité varie sans doute géographiquement (GIEC94, chapitre 1) et ses effets globaux sont sensibles aux variations

régionales du climat plutôt qu'aux variations de la moyenne mondiale (voir la section 3.1). Le réchauffement et l'évolution des précipitations pourraient conduire à un exode à court terme du carbone présent dans les écosystèmes (Smith et Shugart, 1993; Townsend *et al.*, 1992; Schimel *et al.*, 1994; Keeling *et al.*, 1995; DRE GTI, chapitre 9), mais pourraient également entraîner son accumulation à long terme (VEMAP, 1995).

Les rétroactions climatiques pourraient aussi influencer sensiblement sur le cycle du carbone océanique. Dans GIEC94 (chapitre 1), on a évalué, selon des hypothèses concernant le futur rôle éventuel des processus biologiques dans les océans et en prenant le cas de deux océans distincts à l'équilibre, que l'incertitude à long terme concernant la fixation de carbone dans les océans se situe entre -120 ppmv et +170 ppmv. Cependant, les incidences des variations de la circulation océanique en cours de transition climatique (évoquées par ex. par Manabe et Stouffer, 1994) n'ont pas encore été étudiées. Les effets potentiels de variations du cycle du carbone dans les océans pourraient modifier sensiblement le niveau correspondant à une stabilisation des émissions dues à des fossiles. Il conviendrait de tenir compte de ces facteurs dans les analyses à venir.

2.2.2 Stabilisation du CH_4 , du N_2O et d'autres gaz

Les conséquences éventuelles sur la température et le niveau de la mer en moyenne mondiale des divers profils de stabilisation de la concentration de CO_2 sont abordées dans la section 2.2.4. Pour calculer ces conséquences, il faut poser des hypothèses concernant la façon dont les émissions et la concentration d'autres gaz pourraient évoluer à l'avenir, car le CO_2 n'est pas le seul facteur de forçage climatique d'origine humaine. Bien que l'article 2 de la CCNUCC vise la stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre en général, il n'indique ni les niveaux de stabilisation à atteindre ni les itinéraires à suivre pour atteindre ces niveaux. En outre, la Convention-cadre ne parle pas du SO_2 , grand précurseur des aérosols, ni des autres aérosols ou autres précurseurs des aérosols. C'est pourquoi nous envisageons ici une gamme de possibilités d'évolution à l'avenir d'autres gaz à l'état de trace.

Les gaz à effet de serre autres que le CO_2 à considérer sont ceux cités dans DRE GTI : le méthane (CH_4), l'hémioxyde d'azote (N_2O), les hydrocarbures halogénés et l'ozone troposphérique. La vapeur d'eau, qui est également un gaz à effet de serre, entre dans notre analyse dans le cadre des rétroactions climatiques (voir le document technique II du GIEC). Le méthane influe sur le climat directement, mais aussi par ses effets sur la chimie de l'atmosphère (en produisant de l'ozone troposphérique) et par oxydation. L'oxydation du méthane modifie la concentration du radical OH dans la troposphère, ce qui se répercute sur la capacité d'oxydation de l'atmosphère et, partant, sur la concentration d'autres gaz à l'état de trace. Cette oxydation augmente aussi la teneur de la stratosphère en vapeur d'eau. La déperdition d'ozone dans la basse stratosphère due aux hydrocarbures halogénés a également des conséquences sur le climat dont il faut tenir

compte (voir DRE GTI, section 2.4 et document technique II du GIEC). Enfin, les émissions de SO_2 (qui s'oxyde pour donner des sulfates) conduit à la production d'aérosols, qui refroidissent le climat en réfléchissant la lumière solaire (DRE GTI). Les particules sulfatées pourraient avoir l'effet de noyaux de condensation et modifier ainsi les propriétés radiatives de certains nuages.

Il est difficile d'évaluer les conséquences générales de l'article 2 de la Convention-cadre, qui prescrit la stabilisation de tous les gaz à effet de serre, et non du seul CO_2 , car nous manquons de fourchettes clairement délimitées en ce qui concerne les futures émissions probables de CH_4 , de N_2O , de SO_2 et d'autres gaz. On peut ainsi établir un nombre presque infini de combinaisons factorielles pour les divers gaz. Nous nous sommes efforcés de choisir certaines combinaisons caractéristiques pour démontrer la sensibilité potentielle du forçage radiatif et des réactions du climat à un ensemble de combinaisons de gaz et d'aérosols. Nous n'avons pas tenté de "limiter" le problème, car il n'existe aucun consensus quant à la fourchette probable des futures émissions de CH_4 et de N_2O , en raison des incertitudes concernant la biogéochimie et la sensibilité climatique des émissions de ces gaz. Il n'existe pas non plus de consensus quant à la fourchette des futures émissions de SO_2 , qui dépend de choix techniques, de l'activité économique et de la mesure dans laquelle des politiques de l'"air propre" prendront une dimension mondiale.

Les effets des aérosols sulfatés sont particulièrement difficiles à évaluer à cet égard. Les effets des aérosols, qui ont été importants jusqu'à maintenant (voir par ex. DRE GTI, chapitre 8; Penner *et al.*, 1995 et Mitchell *et al.*, 1995), devraient être pris en compte dans tout calcul par modèle des futurs changements climatiques, car l'ampleur de ces changements dépend du forçage radiatif supposé par le passé. Les incertitudes relatives aux aérosols ont une importance considérable pour les projections concernant la future évolution du climat. Ces incertitudes apparaissent pour deux motifs : en raison du rapport incertain existant entre les émissions de SO_2 et le forçage radiatif et en raison d'incertitudes concernant les futures émissions de SO_2 . Ces incertitudes sont abordées ici, car elles ont été envisagées dans les ouvrages cités dans DRE GTI : Raper *et al.* (1996) se penchent sur la première de ces incertitudes (en supposant l'existence de valeurs différentes pour le forçage dû aux aérosols en 1990), tandis que Wigley *et al.* (1996) considèrent la deuxième (en évaluant les scénarios d'avenir en cas d'émissions croissantes ou constantes de SO_2).

Dans les calculs sur la stabilisation présentés dans DRE GTI (section 6.3), on a adopté des scénarios précis mais arbitraires concernant ces autres gaz (émissions constantes de SO_2 et concentration constante de gaz à effets de serre autres que le CO_2 après 1990). Dans les calculs sur le climat effectués pour les scénarios IS92, les auteurs de DRE GTI ont envisagé une plus vaste gamme de scénarios d'avenir pour les aérosols et les gaz à effet de serre autres que le CO_2 . Pour les aérosols sulfatés, en particulier, ils ont prévu soit une évolution des émissions de SO_2 (conformément aux scénarios IS92) soit des émissions constantes de ce gaz après 1990.

Scénario	CO ₂ (W m ⁻²)	CH ₄ (W m ⁻²) (%)	N ₂ O (W m ⁻²) (%)	Hydrocarbures halogénés(W m ⁻²) (%)	Aérosols sulfatés valeur basse moyenne et haute(%)
IS92a	4,35	0,78 (18%)	0,37 (9%)	0,28 (6%)	-0,38 (-0,65) -0,93 9% (15%) 21%
IS92c	1,82	0,16 (9%)	0,28 (15%)	0,28 (15%)	+0,13 (+0,24) +0,34 7% (13%) 19%
IS92e	6,22	1,02 (16%)	0,42 (7%)	0,28 (4%)	-0,75 (-1,29) -1,82 12% (21%) 29%

Tableau 1. Contribution relative de différents gaz aux variations totales du forçage radiatif mondial de 1990 à 2100 selon les scénarios d'émissions IS92a, c et e. Les valeurs du forçage employées ici sont les mêmes que celles utilisées dans DRE GTI (section 6.3). Les valeurs basses, moyennes et hautes du forçage imputable aux aérosols sulfatés sont fondées sur les valeurs du forçage établies en 1990, à savoir -0,2, -0,3 et -0,4 W m⁻² dans le cas du forçage directement imputable aux aérosols et -0,4, -0,8 et -1,2 W m⁻² dans le cas du forçage indirectement imputable aux aérosols (s'agissant du forçage imputable aux aérosols, la marge d'erreur totale est supérieure à ces valeurs; voir DRE GTI, pp. 113-115). Seules les valeurs moyennes du forçage imputable aux aérosols ont été utilisées dans DRE GTI. Le forçage imputable au CO₂ est exprimé en W m⁻² alors que le forçage imputable aux autres gaz est exprimé en pourcentage de la valeur du CO₂. Le forçage imputable au CH₄ recouvre les effets connexes des variations de la concentration d'ozone troposphérique et de vapeur d'eau stratosphérique. Enfin, le forçage imputable aux hydrocarbures halogénés englobe les effets des variations de la concentration d'ozone stratosphérique.

L'approche que nous adoptons ici consiste à évaluer la sensibilité globale et particulière des gaz. Cette approche se fonde sur les données présentées dans DRE GTI en ce qui concerne la future concentration de gaz à effet de serre autres que le CO₂, sur les modèles employés pour calculer cette concentration et sur le modèle simplifié du climat utilisé dans DRE GTI (section 6.3) où — tout comme nous ici — on a pris des données sur le forçage dû à des gaz particuliers comme paramètres principaux.

On peut se faire une idée de l'importance des gaz autres que le CO₂ en considérant la contribution relative des divers gaz au forçage dans les scénarios IS92 (voir le tableau 1). On voit ainsi que, selon une série de scénarios supposant une "politique inchangée", le CO₂ est de loin le gaz prédominant. Cependant, l'effet cumulatif des gaz à effet de serre autres que le CO₂ est considérable : de 1990 à 2100, leur contribution est comprise entre 0,7 W m⁻² (IS92c) et 1,8 W m⁻² (IS92f, non représenté dans la tableau 1). Exprimé en pourcentage du forçage dû au CO₂, le forçage imputable aux gaz à effet de serre autres que le CO₂ varie de 28 % (IS92e) à 40 % (IS92c). Cette contribution est sensiblement compensée par le forçage négatif dû aux aérosols dans les scénarios IS92a, b, e et f. Dans les scénarios IS92c et d, en revanche, l'évolution du forçage dû aux aérosols s'ajoute au forçage imputable aux autres gaz, car les émissions de SO₂ prévues pour 2100 sont inférieures à celles de 1990. Si l'on combine le forçage dû aux aérosols à celui dû aux gaz à effet de serre autres que le CO₂, leur total de 1990 à 2100, dans les scénarios IS92, se situe entre 0,4 W m⁻² (IS92e) et 1,0 W m⁻² (IS92c et f). Exprimé en pourcentage du forçage dû au CO₂, le forçage imputable aux gaz à effet de serre autres que le CO₂ varie de 9 % (IS92e) à 53 % (IS92c).

Les chiffres présentés ici sont extraits de DRE GTI (section 6.3). Pour ce qui est des aérosols, cette section ne donne qu'une évaluation centrale du rapport existant entre les émissions de SO₂ et le forçage dû aux aérosols (le forçage imputable aux aérosols sulfatés étant de -1,1 W m⁻² en 1990, contre 2,6 W m⁻² pour l'ensemble des gaz à effet de serre). L'évolution du forçage dû aux aérosols en diminuerait ou en augmenterait l'importance relative, mais il est clair qu'elle ne modifierait en rien l'importance des gaz à effet de serre autres que le CO₂.

Il est à noter que les incertitudes concernant le forçage imputable aux aérosols sont augmentées par les incertitudes relatives aux futures émissions de SO₂ et par leur influence incertaine sur d'autres aérosols (en raison de la combustion de la biomasse, des poussières minérales, des nitrates, etc.). Selon des études récentes (IIASA/WEC, 1995), les émissions de SO₂ pourraient être plus faibles à l'avenir que ce que prévoient les scénarios IS92a et e. S'il en est ainsi, l'effet mondial de compensation indiqué dans le tableau 1 pourrait être surévalué, mais les auteurs de DRE GTI ont tenu compte de cette possibilité en envisageant des cas où les futures émissions de SO₂ resteraient constantes à leur niveau de 1990 (voir DRE GTI, section 6.3). Les futures émissions de SO₂ font l'objet d'une controverse, certains penchant fortement soit pour une augmentation soit pour une diminution des émissions.

2.2.3 Scénarios de référence concernant la stabilisation

Vu les fortes incertitudes attachées au rôle des gaz autres que le CO₂ par rapport au CO₂ si l'on suppose une "politique inchangée", et vu qu'aucune étude exhaustive n'a été entreprise

pour étudier ce rôle dans l'hypothèse d'une stabilisation des concentrations, nous ne pouvons l'envisager que dans le contexte d'une étude de sensibilité. Nous partons donc d'un ensemble de scénarios de référence où les émissions de CO_2 suivent divers itinéraires conduisant à la stabilisation, où les émissions de CH_4 , de N_2O et de SO_2 restent constantes à leur niveau de 1990 et où les hydrocarbures halogénés suivent le scénario défini dans le Protocole de Montréal et adopté dans DRE GTI (section 6.3) pour calculer la température et le niveau de la mer moyens mondiaux.

En ce qui concerne les hydrocarbures halogénés, comme nous supposons dans les scénarios de référence que le Protocole de Montréal est appliqué strictement (voir DRE GTI, chapitres 2 et 6), nous n'indiquons qu'un seul scénario d'avenir pour ces gaz. Etant donné que le forçage total dû à ces gaz entre 1990 et 2100 (en tenant compte des effets de l'évolution de l'ozone stratosphérique) est relativement faible ($0,3 \text{ W m}^{-2}$), les incertitudes qu'impliquent un respect partiel du Protocole et/ou les futures émissions de gaz de substitution (HFC) ou de gaz non régis par le Protocole pourraient même être plus faibles. Ainsi, dans le contexte de l'évolution mondiale du climat, vu que ces incertitudes ne sont pas prises en compte dans DRE GTI, nous avons décidé de ne pas en tenir compte non plus. Cependant, si un cadre global (multi-gaz) de stabilisation est adopté, une évaluation plus détaillée gaz par gaz du forçage dû aux hydrocarbures halogénés sera peut-être nécessaire à l'échelle d'un pays donné.

Comme les calculs effectués ici s'appliquent à une période allant au-delà de 2100, il convient de poser certaines hypothèses quant aux émissions d'hydrocarbures halogénés après cette date. Si ces émissions restent constantes à leur niveau de 2100, le niveau du forçage restera établi autour de $0,3 \text{ W m}^{-2}$. Ainsi, la concentration d'hydrocarbures halogénés (des HFC principalement) se stabilisera à un niveau relativement élevé. Dans le cas des scénarios de référence, nous supposons que ces émissions resteront effectivement constantes à leur niveau de 2100, d'où la constance de la concentration de ces gaz conformément à l'article 2 de la CCNUCC. Notons cependant que l'hypothèse d'émissions constantes après 2100 peut conduire à une surévaluation du forçage moyen mondial après 2100, surévaluation pouvant aller jusqu'à $0,4 \text{ W m}^{-2}$.

Pour ce qui est de l'ozone troposphérique, en l'absence de toute projection et en suivant encore une fois DRE GTI (section 6.3), nous supposons que la seule évolution du forçage est due à l'ozone produit à la suite d'altérations de la chimie de la troposphère imputables au méthane. D'ici 2100, cette évolution représenterait environ $0,15 \text{ W m}^{-2}$ selon le scénario IS92a, mais beaucoup moins dans le cas du scénario de référence supposant des émissions constantes de CH_4 . L'hypothèse que nous adoptons ici risque d'être irréaliste si les émissions d'azote, d'hydrocarbures ou d'autres précurseurs de l'ozone associés à la concentration d'ozone augmentent en raison d'un accroissement de la pollution anthropique.

Il est à noter que nous n'affirmons nullement que les scénarios de référence correspondent de quelque façon que ce soit à des prévisions quant à l'avenir, surtout en ce qui concerne les émissions de SO_2 , ni qu'ils doivent constituer un objectif de principe. Le but de ces scénarios est d'évaluer l'importance relative des émissions de CH_4 , de N_2O et de SO_2 afin de déterminer la future évolution de la température et du niveau de la mer moyens mondiaux.

Pour quantifier la sensibilité de l'équivalent CO_2 à d'autres gaz, nous considérons des perturbations par rapport aux scénarios de référence, où, de 1990 à 2100, les émissions annuelles de CH_4 augmentent ou diminuent de façon linéaire de $\pm 100 \text{ Tg}(\text{CH}_4)$ au total (c'est-à-dire de $\pm 75 \text{ TgC}$) par rapport à 1990 et restent constantes par la suite, où les émissions annuelles de N_2O augmentent ou diminuent de façon linéaire de $\pm 2 \text{ Tg}(\text{N})$ au total par rapport à 1990 et restent constantes par la suite et où les émissions annuelles de SO_2 augmentent ou diminuent de façon linéaire de $\pm 50 \%$ (c'est-à-dire de $\pm 37,5 \text{ TgS}$) par rapport à 1990 et restent constantes par la suite. Pour ces trois gaz, les scénarios en question conduisent à une stabilisation des concentrations, immédiate dans le cas du SO_2 , sur quelques décennies dans le cas du CH_4 et sur plusieurs siècles dans le cas du N_2O . Pour élargir le contexte de ces perturbations, nous les confrontons aux scénarios IS92a, c et e dans le tableau 2. On notera ici encore que ces perturbations ne représentent en aucun cas des projections ou des objectifs de principe.

Scénario	CH_4 ($\text{Tg}(\text{CH}_4)$)	N_2O ($\text{Tg}(\text{N})$)	SO_2 (% du niveau de 1990)
IS92a	410	4,1	+95%
IS92c	40	0,8	-28%
IS92e	566	6,2	+208%
Perturbation	± 100	± 2	$\pm 50\%$

Tableau 2. Variations des émissions de CH_4 , de N_2O et de SO_2 de 1990 à 2100 selon les scénarios IS92a, c et e, en comparaison des valeurs retenues pour la présente étude en matière de fluctuations (unités : $\text{Tg}(\text{CH}_4)$ pour le CH_4 ; $\text{Tg}(\text{N})$ pour le N_2O et pourcentage du niveau 75 TgS établi en 1990 pour le SO_2)

2.2.4 Stabilisation de la concentration d'équivalent CO_2

La stabilisation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, objectif explicite de l'article 2 de la Convention-cadre, ne conduirait pas nécessairement à la stabilisation des perturbations du forçage radiatif imputables à l'homme. En effet, les aérosols, qui ne sont pas cités explicitement dans l'article 2,

ont eux aussi des effets radiatifs. Si la concentration des gaz à effet de serre et des aérosols est stabilisée, les perturbations anthropiques du forçage radiatif moyen mondial⁶ seront également stabilisées. On notera aussi que du fait que les aérosols ne sont pas uniformément mélangés, la répartition géographique des émissions dues à des aérosols et à leurs précurseurs risque d'avoir des effets importants sur les climats régionaux. La stabilisation des perturbations que l'homme impose au forçage radiatif moyen mondial est tout à fait différente de la stabilisation de la concentration du seul CO₂. Ainsi, si les efforts d'atténuation peuvent viser certains gaz à effet de serre parmi un ensemble de gaz, il convient de lancer des études d'impact sur des climats subissant l'influence de multiples gaz et aérosols. La notion d'"équivalent CO₂" permet d'envisager divers éléments du forçage radiatif appartenant à l'ensemble.

Dans les calculs sur la future évolution de la température et du niveau de la mer moyens mondiaux présentés dans DRE GTI (chapitres 6 et 7), on a introduit dans les modèles le forçage radiatif total, obtenu en additionnant le forçage dû à tous les gaz anthropiques à l'état de trace (voir le tableau 1). En termes de moyenne mondiale, ce forçage total peut être considéré comme s'il avait pour seule origine l'évolution du CO₂, c'est-à-dire une "concentration d'équivalent CO₂". On peut donc définir la concentration d'équivalent CO₂, désignée par C_{eq}, à partir du rapport existant entre la concentration réelle de CO₂ et le forçage radiatif. Dans DRE GTI, on a fait appel au rapport défini dans le Premier Rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 1990). L'incertitude de ce rapport pourrait aller jusqu'à ±20 % environ (voir document technique II du GIEC).

La notion d'équivalent CO₂, utile sur le plan pédagogique, permet de comparer les effets du CO₂ avec ceux d'autres gaz, mais elle a aussi des inconvénients. Un inconvénient de taille est dû au rapport non linéaire qui existe entre le forçage radiatif et la concentration de CO₂. En raison de ce rapport, plus le niveau de CO₂ est élevé, plus il faut en modifier la concentration pour accroître le forçage radiatif d'une même valeur. C'est pourquoi on peut faire la somme des changements dus au forçage radiatif, mais non la somme des équivalents CO₂. C'est pourquoi nous avons choisi le forçage radiatif comme principale variable.

Un autre inconvénient de la notion d'équivalent CO₂ est que, dans le cas de l'évaluation des incidences, elle ne porte que sur l'aspect évolution du climat. D'autres incidences de l'accroissement du CO₂ (fertilisation), des aérosols sulfatés (acidification) et de l'ozone peuvent avoir elles aussi de l'importance. En outre, avec la notion d'équivalent CO₂ comme avec le forçage radiatif, tout regroupement à l'échelle mondiale suppose comme intégrées dans l'ensemble les données sur les aspects régionaux de l'évolution du climat essentielles pour l'évaluation des incidences. Il serait possible, par exemple, d'imposer au système climatique un forçage moyen mondial

nul, mais celui-ci conduirait quand même à des altérations importantes des climats régionaux.

Nous présentons maintenant les résultats concernant l'équivalent CO₂ pour divers niveaux de stabilisation des concentrations. Nous prenons les profils S350, S450, S550, S650, S750 et WRE 1000, en supposant que les émissions de CH₄, de N₂O et de SO₂ restent constantes à leur niveau de 1990 (cas de référence) et que les émissions d'hydrocarbures halogénés sont conformes au Protocole de Montréal (voir la section 2.2.2). Nous prenons aussi le profil WRE550 pour illustrer la mesure dans laquelle le niveau de l'équivalent CO₂ dépend de l'itinéraire choisi pour la stabilisation du CO₂. On trouvera à la figure 7 les résultats correspondant aux scénarios de référence. Les valeurs du forçage y sont présentées par rapport à 1990 (1,3 W m⁻² environ au-dessus du niveau de l'époque préindustrielle). En 2500, moment où la stabilisation de l'équivalent CO₂ sera imminente, la concentration d'équivalent CO₂ se situerait entre 26 ppmv (S350) et 74 ppmv (WRE1000) au-dessus du niveau du CO₂ proprement dit. Dans tous les cas de figure, la différence de forçage due à des gaz autres que le CO₂ est la même : 0,66 W m⁻² de 1990 à 2500. Comme nous l'avons noté ci-dessus, cette valeur équivaut à diverses quantités de CO₂ pour différents niveaux de concentration de référence en raison de la non-linéarité de la fonction de forçage radiatif dû à l'équivalent CO₂.

On notera ici qu'à la mi-1990, le niveau d'équivalent CO₂ était égal à 342 ppmv, soit un peu moins que le niveau du CO₂ proprement dit (354 ppmv). S'il en est ainsi, c'est qu'en 1990, le forçage négatif imputable aux aérosols a plus que compensé le forçage positif dû aux gaz à effet de serre autres que le CO₂. Ce chiffre est cependant sujet à caution, en raison surtout de l'incertitude attachée à l'importance du forçage imputable aux aérosols. Pour une incertitude de ±0,5 W m⁻² concernant le forçage imputable aux aérosols en 1990, on obtient pour cette année-là un niveau d'équivalent CO₂ compris entre 316 et 370 ppmv.

On trouvera à la figure 8, pour les profils S450 et S650, la sensibilité globale aux hypothèses concernant les émissions de gaz autres que le CO₂. Nous faisons appel ici aux mêmes scénarios de référence (figure 7), mais en supposant que les émissions de CH₄, de N₂O et de SO₂ correspondront au scénario IS92a jusqu'en 2100 et qu'elles seront constantes par la suite. Dans ce deuxième cas, l'incrément de forçage par rapport à 1990 dû à des gaz autres que le CO₂ serait de 1,13 W m⁻² (contre 0,66 W m⁻² dans le cas du scénario de référence). En 2100, le niveau de l'équivalent CO₂ s'établirait entre 491 ppmv (S450) et 627 ppmv (S650) contre 473 ppmv (S450) à 604 ppmv (S650) dans le cas des scénarios de référence. La figure 8 montre aussi le forçage dû au seul CO₂.

Les résultats présentés dans les figures 7 et 8 sont caractérisés et résumés dans le tableau 3. On peut y observer l'évolution du forçage radiatif à partir de 1765 et le niveau de l'équivalent CO₂ pour un niveau de stabilisation du CO₂ allant de 350 à 1000 ppmv selon trois hypothèses distinctes concernant l'effet de forçage dû aux autres gaz : aucun effet des autres gaz

⁶ Cela n'éliminera pas la variabilité du climat, car le système climatique possède une variabilité naturelle considérable qui va au-delà de l'influence de l'homme.

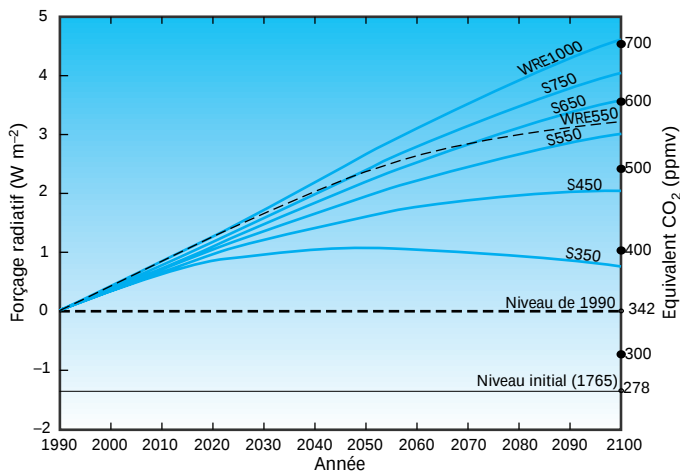


Figure 7. Evolution du forçage radiatif de 1990 à 2100 (par rapport au niveau de 1990) pour une concentration de CO_2 correspondant aux profils S350, S450, S550, WRE550, S650, S750 et WRE1000 (voir figure 4) et des émissions de CH_4 , de N_2O et de SO_2 stabilisées à leur niveau de 1990. En ce qui concerne les hydrocarbures halogénés, on a retenu un unique scénario d'émissions conforme aux objectifs du Protocole de Montréal. Dans le texte et la suite des légendes des figures, ces hypothèses sont qualifiées de "cas de référence". Le niveau d'équivalent CO_2 est représenté par des points portés sur l'axe de droite. Ainsi, pour ce qui est de la courbe S450 (S650), si la concentration de CO_2 en 2100 est de 450 (575) ppmv d'après les indications de la figure 4, l'effet supplémentaire des autres gaz à effet de serre et du SO_2 entraîne une concentration d'équivalent CO_2 de 473 (604) ppmv. Ces résultats ont été obtenus à l'aide du modèle climatique simple de Wigley (voir document technique II du GIEC) ainsi que les relations forçage radiatif-concentration indiquées dans GIEC (1990) et dans les mises à jour ultérieures).

(c'est-à-dire que seul le CO_2 évolue), scénario de référence (émissions constantes de CH_4 , de N_2O et de SO_2) et scénario IS92a prolongé. Les résultats sont indiqués au moment de la stabilisation du CO_2 (variable selon le niveau de stabilisation).

Les calculs ci-dessus sont présentés pour illustrer l'importance d'autres gaz dans la détermination du niveau d'équivalent CO_2 ainsi que l'importance globale de l'incertitude attachée à la détermination de la contribution de ces gaz. Aucun des cas étudiés (CO_2 seul, émissions constantes au niveau de 1990 et émissions correspondant au scénario IS92a pour le CH_4 , le N_2O et le SO_2) ne doit être considéré comme un futur scénario ou comme constituant une recommandation de principe. Les résultats indiquent que le niveau de stabilisation de la concentration choisi pour le CH_4 , le N_2O et le SO_2 pourrait avoir une influence sensible sur la future évolution de l'équivalent CO_2 et sur le niveau de stabilisation de celui-ci. Les sensibilités particulières sont abordées dans la section ci-après.

Pour conclure la présente section, notons que le niveau d'équivalent CO_2 ne se stabilise pas dans nos exemples, même en 2500. Des variations faibles mais perceptibles du forçage (de l'ordre de 0,1 à 0,3 W m^{-2}) se produisent après le moment de la stabilisation du CO_2 (à savoir 2100 dans le cas du profil

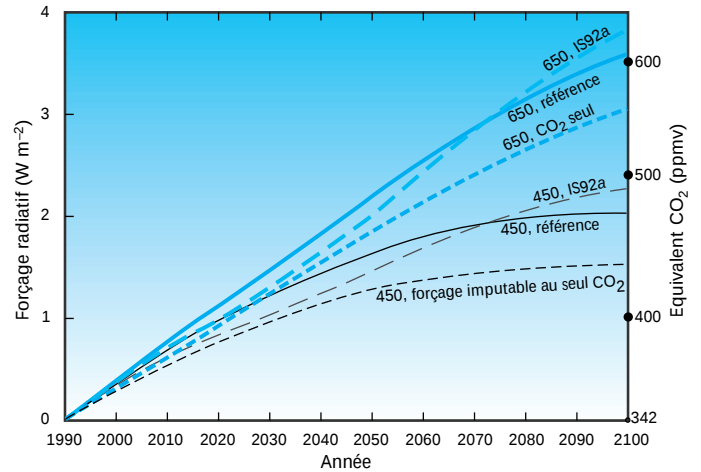


Figure 8. Incidence des différentes évolutions possibles des émissions de gaz autres que le CO_2 sur le forçage radiatif (et l'équivalent CO_2) pour les profils S450 et S650 (voir figure 4). Les tirets courts correspondent aux résultats relatifs au seul CO_2 , les traits pleins au "cas de référence" (voir figure 7) et les tirets longs aux situations où les émissions de CH_4 , de N_2O et de SO_2 augmentent selon le scénario IS92a jusqu'en 2100 avant de se stabiliser ("cas IS92a"). On notera qu'au départ, le forçage radiatif correspondant au cas de référence est inférieur à celui qui correspond au "cas IS92a"; cela est dû à l'effet de forçage négatif imputable aux aérosols. On notera aussi que, s'agissant du seul CO_2 , la concentration d'équivalent CO_2 est inférieure à la concentration de CO_2 du fait de l'écart de leurs valeurs en 1990.

S450 et 2200 dans le cas du profil S650) en raison essentiellement de la longue durée de vie du N_2O , qui provoque d'importantes variations de la concentration de ce gaz après la stabilisation de ses émissions en 2100. Cependant, les changements qui se produisent après 2500 sont très faibles.

2.2.5 Sensibilité de l'équivalent CO_2

La section 2.2.4 présente une évaluation du niveau d'équivalent CO_2 tenant compte de l'effet collectif du CH_4 , du N_2O , du SO_2 et des hydrocarbures halogénés. Nous envisageons ici l'influence distincte du CH_4 , du N_2O et du SO_2 . Pour cela, nous étudions les perturbations que subissent les émissions dans le cas des scénarios de référence supposant des émissions constantes en 1990.

En ce qui concerne le CH_4 (figure 9a), une perturbation des émissions annuelles de $\pm 5 \text{ TgC}$ ($\pm 100 \text{ Tg}(\text{CH}_4)$) entre 1990 et 2100 modifierait le forçage radiatif d'environ $\pm 0,20 \text{ W m}^{-2}$ au moment de la stabilisation de la concentration. Cela représente une différence d'équivalent CO_2 d'environ $\pm 15 \text{ ppmv}$ dans le cas du profil S450 et de $\pm 22 \text{ ppmv}$ dans le cas du profil S650. En ce qui concerne les émissions annuelles de N_2O , une perturbation de $\pm 2 \text{ Tg(N)}$ de 1990 à 2100 modifierait le forçage radiatif de $\pm 0,16 \text{ W m}^{-2}$ au moment de la stabilisation de la concentration, ce qui représente une différence de concentration de $\pm 12 \text{ ppmv}$ dans le

Concentration de CO ₂ au point de stabilisation (année)	Forçage radiatif (W m ⁻²) Equivalent CO ₂ (ppmv)	CO ₂ seul	CO ₂ , autres gaz à effet de serre et aérosols	
			Scénario de référence	Scénario IS92a jusqu'en 2100, puis stabilisation des émissions
350	ΔF (W m ⁻²)	1,25	1,82	2,19
(2050)	CO ₂ equiv.	339	371	394
450	ΔF (W m ⁻²)	2,83	3,35	3,59
(2100)	CO ₂ equiv.	436	473	492
550	ΔF (W m ⁻²)	4,09	4,67	5,04
(2150)	CO ₂ equiv.	532	583	619
650	ΔF (W m ⁻²)	5,15	5,75	6,16
(2200)	CO ₂ equiv.	629	692	739
750	ΔF (W m ⁻²)	6,05	6,67	7,10
(2250)	CO ₂ equiv.	726	801	858
1000	ΔF (W m ⁻²)	7,86	8,50	8,97
(2375)	CO ₂ equiv.	968	1 072	1 154

Tableau 3. Evolution du niveau d'équivalent CO₂ (ppmv) et du forçage radiatif (ΔF) (à partir de 1765) au point de stabilisation du CO₂ pour diverses hypothèses concernant les gaz à effet de serre autres que le CO₂ et les aérosols. Le scénario de référence est fondé sur l'hypothèse d'une stabilisation des émissions de SO₂, de N₂O et de CH₄ après 1990. La colonne "CO₂ seul" renvoie à l'hypothèse selon laquelle les variations observables après 1990 ne sont imputables qu'au seul CO₂ (hypothèse retenue dans DRE GTI). On notera que le niveau d'équivalent CO₂ au point de stabilisation de ce gaz diffère dans tous les cas de la concentration de CO₂ au point de stabilisation en raison de la disparité des niveaux de CO₂ et d'équivalent CO₂ enregistrés en 1990.

cas du profil S450 et de ± 18 ppmv dans le cas du profil S650 (voir la figure 9b).

La sensibilité du SO₂ se manifeste de deux façons. Il y a d'abord la sensibilité de base aux incertitudes concernant les émissions (figure 10a). Au moment de la stabilisation de la concentration, une perturbation de ± 50 % des émissions annuelles de SO₂ par rapport à 1990 (c'est-à-dire de $\pm 37,5$ TgS) conduirait à une différence de forçage de $-0,37$ à $+0,45$ W m⁻², d'où une différence de concentration d'équivalent CO₂ de -27 à $+36$ ppmv dans le cas du profil S450 et de -40 à $+52$ ppmv dans le cas du profil S650. (On notera que le signe du forçage et de la différence de concentration est opposé à celui de la perturbation des émissions.)

Outre l'influence des incertitudes concernant les émissions, l'effet du SO₂ sur la concentration d'équivalent CO₂ est sensible au rapport hautement incertain qui existe entre les émissions de SO₂ et le forçage radiatif. Les aérosols sulfatés dérivés du SO₂ influent sur le forçage radiatif soit directement en cas de ciel

dégagé soit indirectement en modifiant l'albédo des nuages. Dans DRE GTI, l'évaluation centrale du forçage directement imputable aux aérosols sulfatés s'établit à $-0,4$ W m⁻², le forçage indirect ayant été évalué à $-0,8$ W m⁻² dans la section 6.3 de DRE GTI. Si l'on rapproche ces chiffres du forçage dû aux aérosols carbonés (suies), égal à $\pm 0,1$ W m⁻², on obtient un forçage total par les aérosols sulfatés égal à $-1,1$ W m⁻². Pour évaluer la sensibilité de ce chiffre aux incertitudes, nous prenons une fourchette de $\pm 0,1$ W m⁻² pour le forçage direct et de $\pm 0,4$ W m⁻² pour le forçage indirect (ce qui donne un forçage total par les aérosols sulfatés (plus les suies) égal à $-1,1 \pm 0,5$ W m⁻²).

C'est dans le calcul du niveau d'équivalent CO₂ pour 1990 que l'incertitude concernant les émissions et le forçage s'est d'abord manifestée. Comme nous l'avons noté ci-dessus, alors que la valeur la plus probable de C_{eq} pour 1990 est de 342 ppmv, la fourchette correspondant à $\pm 0,5$ W m⁻² dans le cas du niveau de forçage par les aérosols en 1990 est de 316-370 ppmv. Pour ce qui est du forçage à l'avenir, si l'on adopte le scénario de référence supposant la constance des émissions de

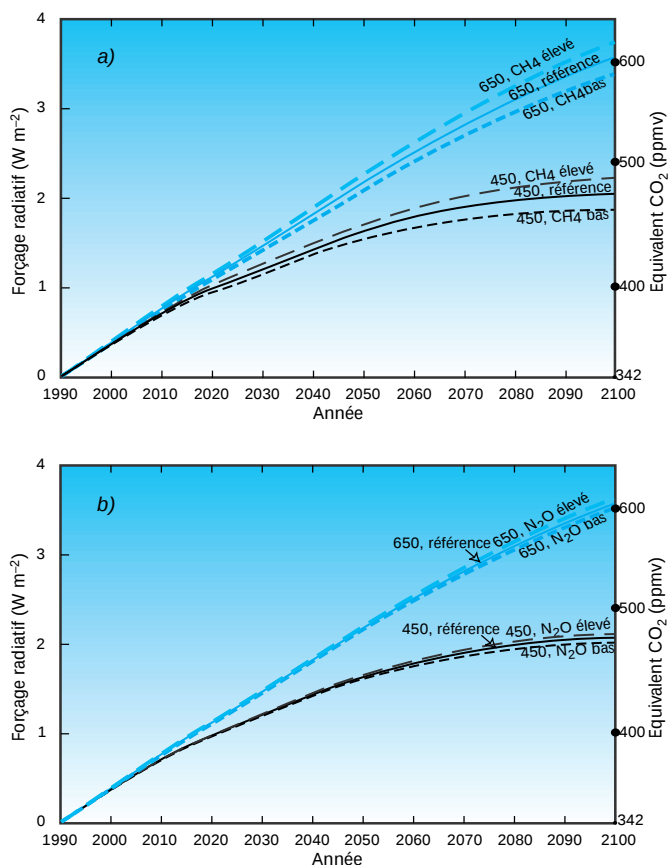


Figure 9. a) Sensibilité du forçage radiatif (et de la concentration d'équivalent CO₂) aux émissions de CH₄ pour les profils S450 et S650 (voir figure 4). Les courbes "CH₄ élevé" et "CH₄ bas" sont fondées sur l'hypothèse que les émissions annuelles de CH₄ diminuent ou augmentent de façon linéaire de 100 Tg(CH₄) entre 1990 et 2100 (voir tableau 4). b) Sensibilité du forçage radiatif (et de la concentration d'équivalent CO₂) aux émissions de N₂O pour les profils S450 et S650 (voir figure 4). Les courbes "N₂O élevé" et "N₂O bas" sont fondées sur l'hypothèse que les émissions annuelles de N₂O diminuent ou augmentent de façon linéaire de 2 Tg(N) entre 1990 et 2100 (voir tableau 4).

SO₂, l'incertitude concernant les émissions et le forçage n'a plus d'effet : une évolution nulle des émissions implique un forçage nul quel que soit le rapport entre les émissions et le forçage. L'incertitude concernant le forçage pour 1990 est simplement reportée "telle quelle" dans le futur (figure 10b).

Cependant, si à l'avenir les émissions de SO₂ augmentent ou diminuent par rapport à leur niveau de 1990 (comme dans les cas de perturbation des émissions envisagés dans la figure 10), l'incertitude concernant les émissions et le forçage influera effectivement sur le futur forçage dû aux aérosols. Ce cas est illustré par la figure 10c), où (dans le cas du profil S650 uniquement) nous présentons les incertitudes liées aux émissions et au forçage pris ensemble. La courbe en gras, au centre, représente le cas de référence d'émissions de SO₂ (aucun changement par rapport à 1990), pour lequel n'apparaît pas de bande d'incertitude en ce qui concerne les émissions et le forçage. Les trois courbes du haut, qui

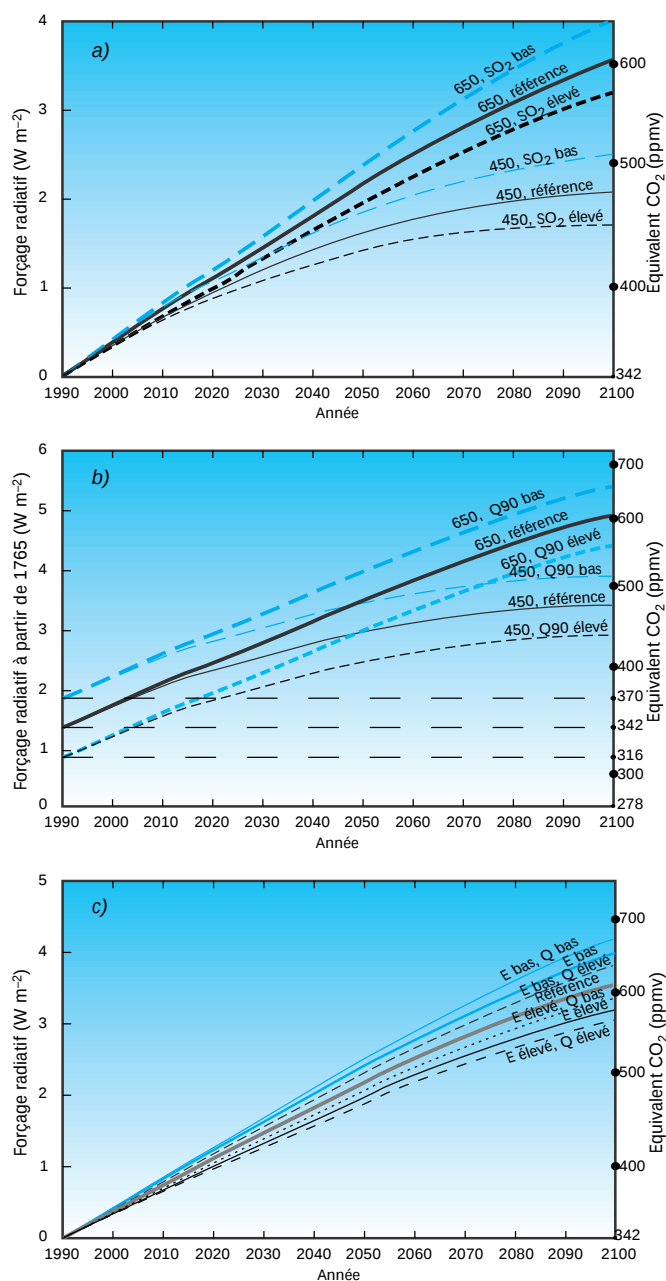


Figure 10. a) Sensibilité du forçage radiatif (et de la concentration d'équivalent CO₂) aux émissions de SO₂ pour les profils S450 et S650. Les traits pleins correspondent au cas de référence, les tirets courts/longs ("SO₂ élevé/bas") à une situation où les émissions augmentent/diminuent de façon linéaire de $\pm 50\%$ entre 1990-2100; b) Sensibilité du forçage radiatif (et de la concentration d'équivalent CO₂) au forçage imputable aux aérosols sulfatés enregistré en 1990 (par rapport à l'époque préindustrielle) s'élevaient à -0,6, -1,1 et -1,6 W m⁻². On notera que, dans cette figure, les valeurs du forçage radiatif sont établies par rapport aux valeurs de l'époque préindustrielle, c) Effets combinés sur le forçage radiatif (et la concentration d'équivalent CO₂) de la sensibilité aux émissions de SO₂ et au forçage imputable aux aérosols enregistré en 1990 uniquement pour le profil S650. "E élevé/E bas" correspondent à une augmentation ou à une réduction des émissions de SO₂ entre 1990 et 2100 (de même que dans les courbes correspondantes de la figure 10a); "Q élevé/Q bas" correspondent aux valeurs élevée et basse du forçage imputable aux aérosols enregistrés en 1990 (de même que dans les courbes correspondantes de la figure 10b).

correspondent à une diminution des émissions de SO₂ (de 50 % entre 1990 et 2100), présentent des résultats correspondant à une valeur faible, moyenne et élevée du niveau de forçage imputable aux aérosols sulfatés en 1990 (-1,1 ±0,5 W m⁻²). Plus le forçage est élevé en 1990, plus forte est l'évolution du forçage après 1990. Les trois courbes du bas correspondent au cas où les émissions de SO₂ augmenteraient de 50 % entre 1990 et 2100. Ici, le cas d'un forçage élevé en 1990 conduit à un forçage moindre après 1990, car le signe du forçage par les aérosols est négatif après 1990.

2.3 Conséquences pour la température et le niveau de la mer de la stabilisation de la concentration de CO₂

2.3.1 Analyse de la température et du niveau de la mer : méthodologie

Les profils de stabilisation de la concentration de CO₂ décrits ci-dessus et les scénarios présentés pour d'autres gaz ont servi de paramètres dans des modèles simplifiés du climat employés pour en évaluer les conséquences pour la température et le niveau de la mer moyens mondiaux. Il ne s'agit là que d'une première étape vers une évaluation globale des incidences de la stabilisation sur le climat. Pour procéder à une telle évaluation, il faut considérer

au moins l'évolution de la température et du niveau de la mer à l'échelle régionale, ainsi que l'évolution d'autres variables climatiques (telles que la pluviosité et l'humidité du sol). Cependant, les modèles du climat ne sont pas encore assez perfectionnés pour qu'on puisse prévoir avec assurance de telles influences régionales et multivariées.

Dans le présent document, nous considérons l'effet du CO₂ ainsi que certaines combinaisons possibles d'influences d'autres gaz, comme l'indique le tableau 4. Nous avons choisi cette approche afin de donner au lecteur une idée de la sensibilité de la température et du niveau de la mer aux hypothèses concernant les futures émissions de gaz à effet de serre et de SO₂. Nous n'entendons pas, par cette approche, épuiser toute la gamme des possibilités. Pour chaque combinaison, nous calculons quatre variables :

- le forçage radiatif (exprimé en W m⁻²);
- la concentration d'équivalent CO₂ associée à la combinaison définie d'autres gaz;
- l'évolution de la température en moyenne mondiale;
- l'évolution du niveau de la mer en moyenne mondiale.

Elément	Concentration et cas d'émissions considérés
CO ₂	S350, 450, 550, 650, 750 WRE550, 1000
CH ₄	Référence : stabilisation des émissions au niveau de 1990* à partir de 1990 Hyp. basse : diminution linéaire de 100 Tg (CH ₄) de 1990 à 2100, puis stabilisation des émissions à partir de 2100 Hyp. haute : augmentation linéaire de 100 Tg (CH ₄) de 1990 à 2100, puis stabilisation des émissions à partir de 2100
N ₂ O	Référence : stabilisation des émissions au niveau de 1990* à partir de 1990 Hyp. basse : diminution linéaire de 2 Tg(N) de 1990 à 2100, puis stabilisation des émissions à partir de 2100 Hyp. haute : Augmentation linéaire de 2 Tg(N) de 1990 à 2100, puis stabilisation des émissions à partir de 2100
SO ₂	Référence : stabilisation des émissions au niveau de 1990† à partir de 1990 Hyp. basse : diminution linéaire de 50 % entre 1990 et 2100, puis stabilisation des émissions à partir de 2100 Hyp. haute : augmentation linéaire de 50 % entre 1990 et 2100, puis stabilisation des émissions à partir de 2100
Hydrocarbures halogénés	Données de DRE GTI jusqu'en 2100§, puis stabilisation des émissions à partir de 2100
Ozone troposphérique	Comme dans DRE GTI : pas de modifications directes après 1990. Les modifications attribuables au CH ₄ sont prises en compte dans la partie réservée à ce gaz
* Les émissions étant ajustées de manière à équilibrer le bilan pour 1990, comme dans le chapitre 6 de DRE GTI. † 75 TgS/an, comme dans les scénarios IS92. § Synthèse des émissions indiquée au chapitre 2 de DRE GTI et autres données sur des constituants minoritaires présentées au chapitre 6. Les effets de l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique sont pris en compte conformément aux indications du chapitre 6.	

Tableau 4. Différents cas d'émissions pris en considération dans les études de sensibilité.

Nous avons présenté les résultats concernant les points a) et b) dans la section 2.2, où nous considérons les conséquences pour la température et le niveau de la mer moyens mondiaux. Il est possible d'évaluer graphiquement les taux de variation à partir de ces résultats.

En outre, il nous faut considérer les incertitudes relatives à la réaction du système climatique à un forçage extérieur, dues pour l'essentiel à des incertitudes quant à la sensibilité du climat (nous considérons trois cas, selon DRE GTI (section 6.3) : $\Delta T_{2x} = 1,5, 2,5$ ou $4,5$ °C). Nous devons aussi considérer les incertitudes relatives à l'élévation du niveau de la mer dues à des incertitudes quant à la modélisation de la fonte des glaces (DRE GTI, chapitre 7). Dans ce dernier cas, nous balayons la gamme des possibilités en envisageant des cas de faible élévation du niveau de la mer ($\Delta T_{2x} = 1,5$ °C, faible fonte des glaces), d'élévation moyenne ($2,5$ °C, fonte moyenne) et d'élévation importante ($4,5$ °C, fonte importante). Nous obtenons ainsi trois ensembles de données sur le climat et le niveau de la mer pour chaque cas de forçage. Pour obtenir ces résultats, nous avons fait appel aux modèles de Wigley et de Raper (1992) (voir aussi Raper, *et al.*, 1996) utilisés dans DRE GTI (section 6.3). Dans DRE GTI, on a employé un modèle du climat développé par de Wolde *et al.* (1995), mais ce modèle possède une sensibilité fixe en cas de variation de $2,2$ °C de la température ($\Delta T_{2x} = 2,2$ °C) pour un doublement de la concentration de CO_2 , ce qui en proscriit l'usage dans le présent contexte. On trouvera des renseignements sur la structure de ce modèle et sur la différence entre les modèles dans le document technique II du GIEC.

En raison du grand nombre de simulations par modèle et du nombre de variables qu'il implique, nous ne présentons ici qu'un ensemble partiel de résultats pour illustrer les conséquences possibles. [Vu l'intérêt que peuvent susciter des résultats détaillés, on pourra se procurer sous forme électronique, par l'intermédiaire du World Wide Web (ou sur disquette), les résultats complets de tous les calculs concernant le cycle du carbone et les modèles du climat.]

2.3.2 Conséquences pour la température et le niveau de la mer de la stabilisation des gaz à effet de serre

Les résultats présentés ici donnent une vision plus homogène des questions liées à la stabilisation que ce qu'on trouvera dans n'importe quel chapitre de DRE GTI. La plupart de ces résultats supposent une sensibilité du climat (ΔT_{2x}) égale à $2,5$ °C, soit une valeur moyenne. Si la valeur réelle devait être plus faible ou plus élevée, les résultats varieraient en proportion, comme nous allons le voir ci-après. Nous précisons que les résultats présentés sont exprimés en moyenne mondiale : les incidences et les actions d'atténuation sont également sensibles au profil régional d'évolution du climat et du niveau de la mer, car les possibilités et la vulnérabilité régionales sont extrêmement variables.

Les résultats concernant la température et le niveau de la mer présentés ici ont été obtenus à partir de modèles relativement

simples. Comme il est indiqué dans le document technique II du GIEC, ces modèles sont conçus de façon à reproduire, avec une fidélité suffisante, le comportement moyen mondial de modèles complexes. On les a également confrontés à des observations passées et/ou actuelles. Ces modèles, ainsi que les modèles plus complexes, ne rendent pas compte de l'ensemble des interactions et des rétroactions possibles du climat, mais ils correspondent à l'état actuel des connaissances.

Pour les premiers calculs, on a fait appel au scénario de référence supposant des émissions constantes au niveau de 1990 pour le CH_4 , le N_2O et le SO_2 (voir le tableau 4). Cela facilite la comparaison entre les divers niveaux et itinéraires de stabilisation du CO_2 et correspond aux résultats concernant l'équivalent CO_2 présentés ci-dessus. Selon les scénarios IS92, les émissions de ces gaz diffèrent sensiblement de celles prévues dans les scénarios de référence (voir les tableaux 1 et 2). Outre les scénarios de référence, nous évaluons la sensibilité des divers résultats concernant la température et le niveau de la mer au niveau des émissions de CH_4 , de N_2O et de SO_2 en considérant divers cas d'émissions pour ces gaz.

Nous avons noté précédemment que la trajectoire des futures émissions de gaz à l'état de trace autres que le CO_2 (CH_4 , N_2O et SO_2) peuvent avoir un effet marqué sur le forçage total correspondant à n'importe quel profil de stabilisation du CO_2 . Si, par exemple, la concentration de CO_2 devait se stabiliser à 450 ppmv et que les émissions de méthane dussent continuer à augmenter, le forçage radiatif serait sensiblement plus important que celui imputable au seul CO_2 . Une plus forte élévation de la température et du niveau de la mer serait également à prévoir, comme nous allons le voir ci-après.

Les figures 11 à 15 illustrent l'évolution de la température et du niveau de la mer moyens mondiaux de 1990 à 2100. (On trouvera à l'appendice 1 les résultats jusqu'en 2300.) Cette évolution est prévue à partir de maintenant uniquement (nominalement à partir de 1990). Il faut ajouter 0,2 à 0,5 °C pour obtenir l'évolution anthropique de la température moyenne mondiale par rapport à 1880 selon l'évaluation centrale du forçage passé employée dans DRE GTI. Pour obtenir l'évolution par rapport à l'époque préindustrielle, il faut ajouter 0,1 à 0,2 °C de plus.

Il est à noter que les valeurs moyennes mondiales données ne sont que des indicateurs de l'ampleur globale de la future évolution possible du climat : les variations régionales de température pourraient différer sensiblement des variations moyennes mondiales et l'évolution d'autres variables telles que les précipitations n'est pas liée de façon simple ou directe à l'évolution de la température moyenne mondiale (voir DRE GTI, chapitre 6). L'évolution régionale du niveau de la mer pourrait aussi différer de son évolution moyenne mondiale en raison de déplacements de terrains et/ou des effets de la circulation océanique (voir DRE GTI, chapitre 7).

Les figures 11a et b illustrent l'évolution de la température et du niveau de la mer par rapport à aujourd'hui dans le cas d'un

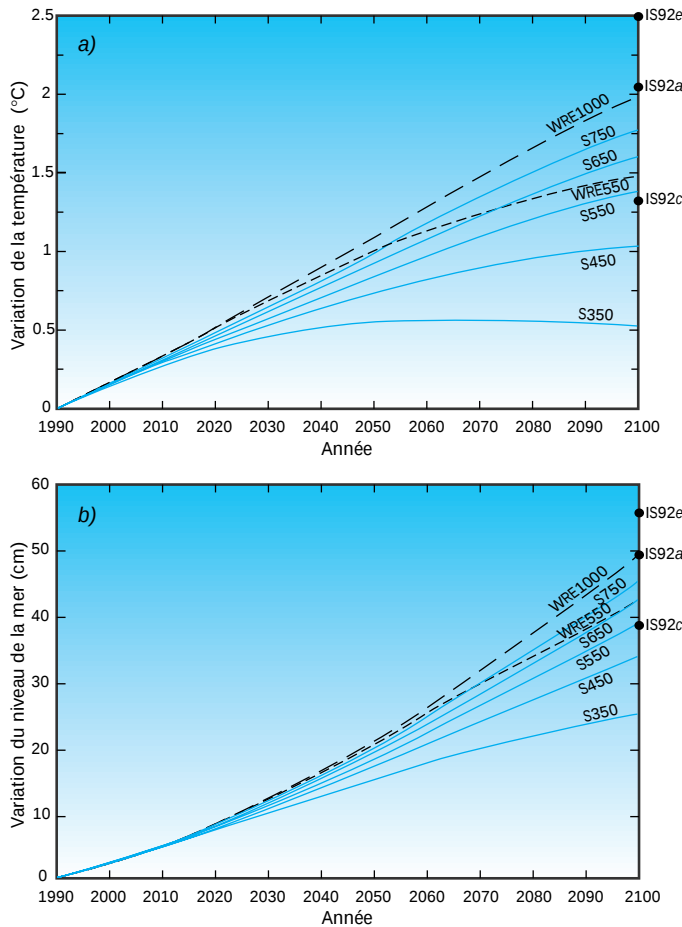


Figure 11. a) Température moyenne mondiale projetée en cas de stabilisation de la concentration de CO_2 selon les profils S et WRE550 et 1000 indiqués à la figure 4. On suppose que les émissions de CH_4 , de N_2O et de SO_2 restent à leurs niveaux de 1990 et que la concentration d'hydrocarbures halogénés évolue selon un scénario conforme aux objectifs du Protocole de Montréal (cas de référence). Les valeurs du forçage radiatif (et de l'équivalent CO_2) d'où sont tirées les températures mondiales ont été indiquées précédemment à la figure 7. On a supposé que la sensibilité du climat s'établissait à une valeur moyenne de $2,5\text{ }^\circ\text{C}$. A titre de comparaison, on a indiqué les résultats obtenus pour l'année 2100 selon les scénarios d'émission IS92a, c et e. Pour obtenir l'augmentation anthropique de la température en moyenne mondiale depuis 1880 selon l'évaluation centrale du forçage passé employée dans DRE GTI, il faut ajouter $0,2$ à $0,5\text{ }^\circ\text{C}$. Pour obtenir l'augmentation par rapport à l'époque préindustrielle, il faut ajouter $0,1$ à $0,2\text{ }^\circ\text{C}$ de plus. b) Comme en a), sauf en ce qui concerne la modification du niveau de la mer à l'échelle du globe et les valeurs centrales des paramètres relatifs à la fonte des glaces. Tous les résultats ont été obtenus à l'aide du modèle de Wigley, qui permet de simuler de façon simple l'incidence du climat sur le niveau de la mer (voir document technique II du GIEC).

niveau de stabilisation du CO_2 égal à 350, 450, 550, 650, 750 ou 1000 ppmv si l'on adopte le cas de référence pour les autres gaz (émissions constantes de CH_4 , de N_2O et de SO_2 au niveau de 1990). On a supposé une sensibilité du climat égale à $2,5\text{ }^\circ\text{C}$ et une valeur moyenne pour la fonte des glaces (voir DRE GTI, chapitres 6 et 7) dans les calculs, qui ont pour but de montrer

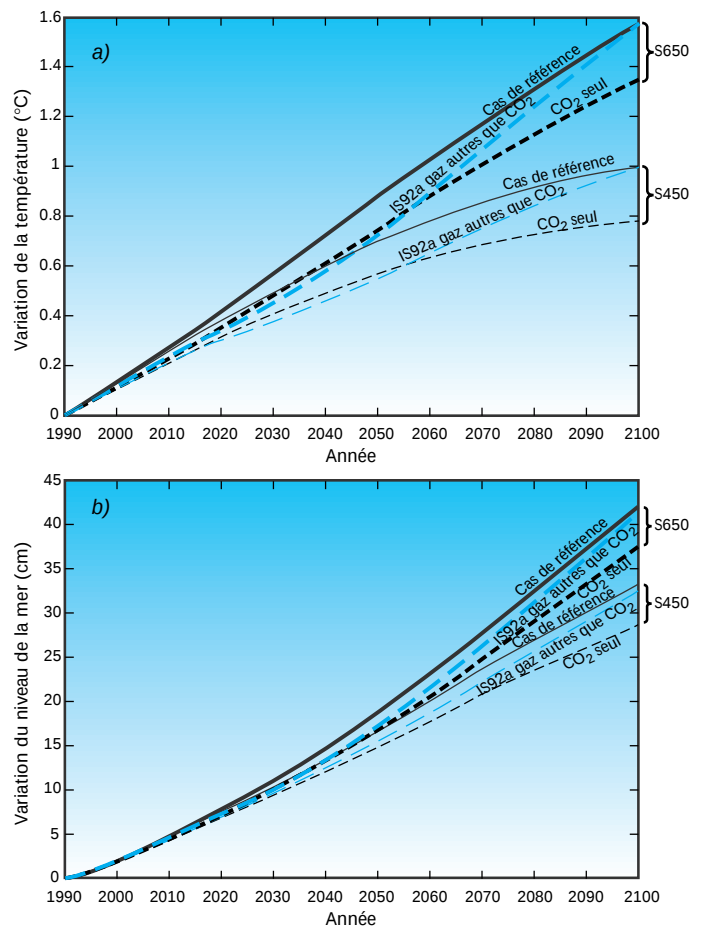


Figure 12. a) Incidence des différents profils d'émission de gaz autres que le CO_2 sur la variation de la température à l'échelle du globe pour les profils S450 et S650 (voir figure 4). Les traits pleins représentent les résultats "de référence", les tirets courts les résultats relatifs au " CO_2 seul" et les tirets longs les résultats obtenus lorsque les émissions de CH_4 , de N_2O et de SO_2 progressent selon le scénario IS92a jusqu'en 2100 ("cas IS92a"). On suppose que la sensibilité du climat a une valeur moyenne de $2,5\text{ }^\circ\text{C}$. b) Comme en a), sauf en ce qui concerne la variation du niveau de la mer à l'échelle du globe. On a retenu les valeurs centrales des paramètres relatifs à la fonte des glaces.

comment varient la température et le niveau de la mer selon le niveau de stabilisation choisi. Dans le cas du niveau 550 ppmv, les résultats découlant des profils "S" et "WRE" sont présentés pour illustrer la sensibilité des changements à l'itinéraire de stabilisation choisi. Jusqu'en 2050 environ, le profil WRE550 indique une élévation de la température et du niveau de la mer plus importante même que le profil S750 (mais pas que le cas 1000 ppmv, car ce dernier a été conçu de façon que la concentration de CO_2 soit toujours égale ou supérieure à celle du profil WRE550). On peut déduire le rythme d'évolution des figures 9a et b : au cours des 50 prochaines années, la température augmenterait de $0,1$ à $0,2\text{ }^\circ\text{C}$ par décennie.

Les figures 12a et b montrent comment les émissions de gaz autres que le CO_2 pourraient influencer sur la future évolution de la température et du niveau de la mer moyens mondiaux (pour des

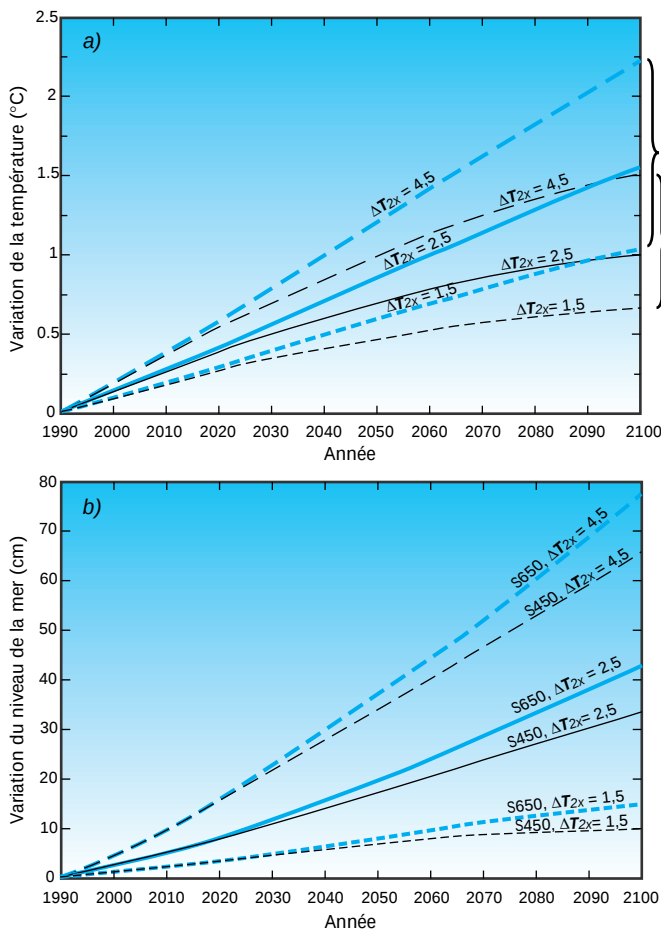


Figure 13. a) Incidence des incertitudes concernant la sensibilité du climat sur la température moyenne à l'échelle du globe dans le cas des profils S450 et S650 pour le CO_2 et dans le cas de référence pour les gaz autres que le CO_2 . La sensibilité du climat (ΔT_{2x}) varie de 1,5 à 4,5 °C, avec une valeur moyenne de 2,5 °C. Pour la même fourchette de sensibilité du climat, l'évolution de la température moyenne mondiale de 1990 à 2100, dans le cas du scénario IS92a, se situe entre 1,4 et 2,9 °C, avec une valeur moyenne de 2 °C. b) Comme en a), sauf en ce qui concerne la variation moyenne mondiale du niveau de la mer. Les valeurs basse, moyenne et élevée de la sensibilité du climat sont associées respectivement aux valeurs basse, moyenne et élevée des paramètres relatifs à la fonte des glaces. Pour la même fourchette de sensibilité et de ces paramètres, l'augmentation du niveau moyen mondial de la mer de 1990 à 2100, dans le cas du scénario d'émission IS92a se situe entre 19 et 86 cm, la valeur moyenne étant de 49 cm.

niveaux de stabilisation du CO_2 égaux à 450 et 650 ppmv). Les cas présentés sont : le scénario de référence employé pour la figure 12; le cas où toutes les émissions (autres que celles de CO_2) suivent le scénario IS92a jusqu'en 2100 ; le cas où seule l'évolution du CO_2 est envisagée à partir de 1990, c'est-à-dire où le forçage radiatif imputable à tous les autres gaz reste au niveau de 1990. Seul le dernier cas a été pris en considération dans DRE GTI (voir les figures 6.26 et 7.12). Ces figures montrent clairement l'importance des autres gaz : les différences entre le scénario de référence et le scénario IS92a pour tous les autres gaz sont supérieures aux différences entre les profils S450 et S650

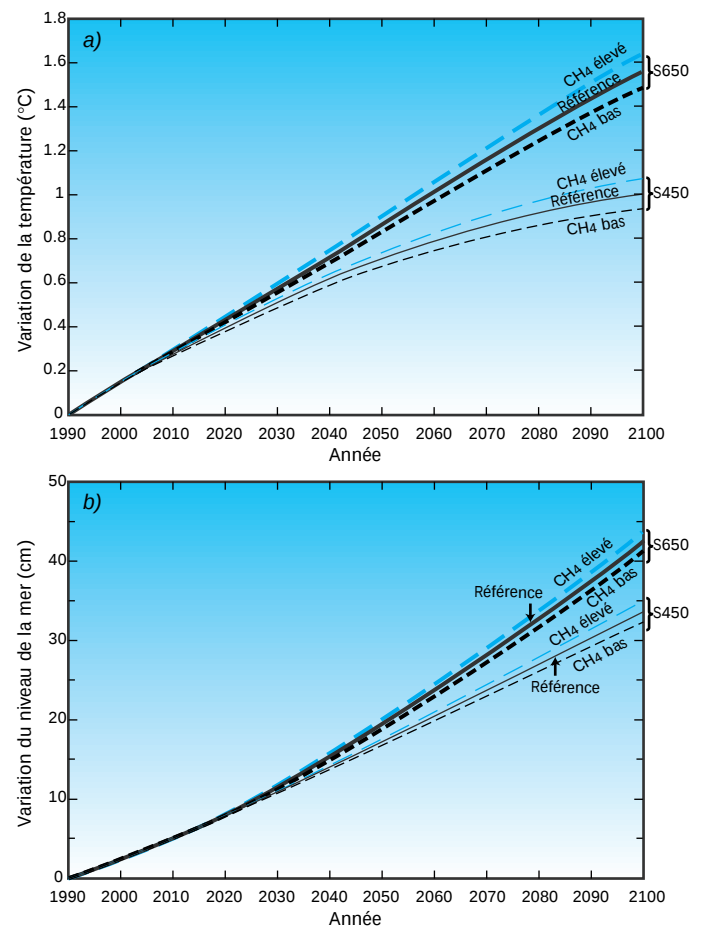


Figure 14. a) Sensibilité de la variation moyenne mondiale de la température aux émissions de CH_4 pour les profils S450 et S650 (voir figure 4). Les traits pleins correspondent aux résultats "de référence"; les courbes "CH₄ bas" et "CH₄ élevé" partent de l'hypothèse que les émissions annuelles de CH_4 diminuent ou augmentent de façon linéaire de 100 Tg(CH_4) entre 1990 et 2100 (voir tableau 4). Les valeurs du forçage radiatif (et de l'équivalent CO_2) d'où sont tirées les températures mondiales sont indiquées à la figure 9a. b) Comme en a), sauf en ce qui concerne la variation du niveau de la mer à l'échelle du globe. On a retenu les valeurs centrales des paramètres relatifs à la fonte des glaces.

jusqu'en 2050 environ. Toujours jusqu'en 2050 environ, les résultats correspondant au scénario IS92a sont plus faibles que les autres en raison de l'effet de compensation moyen mondial dû à l'augmentation des émissions de SO_2 dans ce scénario. Cependant, ces résultats dissimulent d'importants détails régionaux et n'impliquent pas nécessairement que l'ampleur des changements climatiques prévus dans ce cas (au sens de leurs incidences) serait inférieure.

Dans le cas des résultats présentés dans les figures 11 et 12, on n'a introduit dans le modèle du climat et de la fonte des glaces que des paramètres correspondant à la "meilleure approximation". Dans la figure 13, on peut observer des niveaux de 450 et 650 ppmv pour diverses sensibilités du climat (1,5, 2,5 et 4,5 °C), en prenant (pour l'élévation du niveau de la mer) des paramètres correspondant respectivement à une faible,

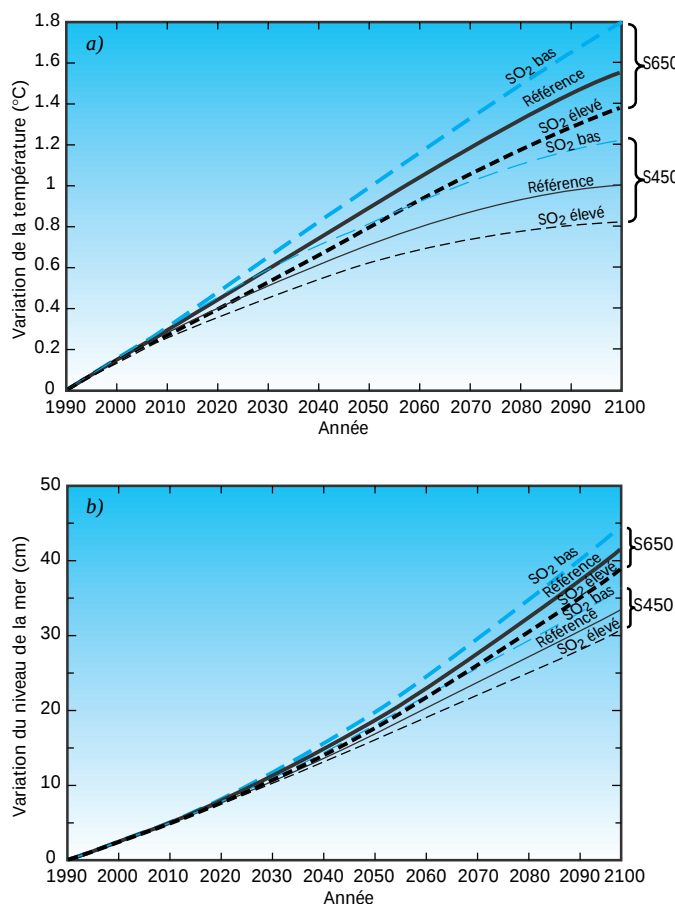


Figure 15. a) Sensibilité de la variation moyenne mondiale de température aux émissions de SO_2 pour les profils S450 et S650 (voir figure 4). Comme à la figure 10a, les traits pleins correspondent aux cas de référence, les tirets courts ("SO₂ élevé") à une situation où les émissions augmentent de façon linéaire de 75 TgS/an en 1990 à 112,5 TgS/an en 2100 et les tirets longs ("SO₂ bas") à une situation où les émissions diminuent de façon linéaire de 75 TgS/an en 1990 à 37,5 TgS/an en 2100. Les valeurs du forçage radiatif (et de l'équivalent CO_2) d'où sont tirées les températures mondiales sont indiquées à la figure 10a. b) Comme en a), sauf en ce qui concerne la variation du niveau de la mer à l'échelle du globe. On a retenu les valeurs centrales des paramètres relatifs à la fonte des glaces.

moyenne et forte fonte des glaces. Les incertitudes qui découlent des incertitudes concernant les paramètres introduits dans le modèle pour n'importe quel niveau de stabilisation donné sont beaucoup plus importantes que les différences entre les résultats correspondant à des niveaux de stabilisation de 450 et 650 ppmv, notamment en ce qui concerne le niveau de la mer. Il serait nettement avantageux, dans une perspective de planification, de réduire les incertitudes relatives à ces paramètres. Il existe cependant des aspects incontrôlables du système climat-niveau de la mer, alors que le niveau de stabilisation pourrait être contrôlé. Ainsi, la comparaison établie dans la figure 13 illustre graphiquement la mesure dans laquelle les incertitudes globales pourraient être maîtrisées dans les projections concernant le climat et le niveau de la mer.

Les figures 14 et 15 indiquent la sensibilité des résultats correspondant à 450 et 650 ppmv à des incertitudes propres aux divers gaz. On observe, entre 1990 et 2100, une variation de ± 100 Tg(CH_4) par rapport aux émissions de référence de CH_4 dans la figure 14 et une variation de ± 50 % (c'est-à-dire de 37,5 TgS) par rapport aux émissions de référence de SO_2 dans la figure 15. (Les mêmes cas de sensibilité ont été considérés dans la section 2.3.1 pour l'évaluation des incertitudes concernant le forçage et l'équivalent CO_2 .) La sensibilité du N_2O n'est pas indiquée, car pour les perturbations de ± 2 Tg(N) considérées précédemment, cette sensibilité est nettement inférieure, à court terme, à celle du CH_4 en raison de la longue durée de vie du N_2O par rapport au CH_4 (comparer les figures 9a et 9b).

Dans le contexte de cette analyse de sensibilité, les effets à long terme du CH_4 et le SO_2 sur les perturbations considérées sont relativement faibles en comparaison des différences qui existent entre les résultats concernant les divers niveaux de stabilisation (voir les figures A4 et A5 de l'Appendice 1). Cependant, les effets à court terme de ces perturbations sont relativement beaucoup plus importants (comparer les figures 11 et A2). S'il en est ainsi, c'est que les aérosols à base de CH_4 et de SO_2 ont un délai de réaction beaucoup plus court que le CO_2 . Les effets différentiels intégraux sur le climat des divers objectifs de stabilisation du CO_2 sont donc beaucoup plus longs à se manifester que les réactions plus rapides à l'évolution des émissions de CH_4 et de SO_2 .

Bien qu'il ne soit pas encore possible de caractériser les différences de risques entre les divers niveaux et itinéraires de stabilisation, il est clair, comme l'ont noté les auteurs de DRE GTI (section 6.3) et Wigley *et al.* (1996), que le choix d'un niveau de stabilisation et d'un itinéraire influera sur l'ampleur et le rythme d'évolution à venir du climat et du niveau de la mer. Les futures émissions d'autres gaz à effet de serre influenceront aussi sensiblement sur le climat et le niveau de la mer et conduiront généralement à des changements de plus grande ampleur que les seules émissions de CO_2 . Ainsi, l'atténuation des émissions de ces autres gaz est un élément important d'un programme visant à éviter toute perturbation dangereuse du système climatique. A long terme (au-delà de 2100), les incertitudes quant aux futures émissions de CH_4 , de N_2O et de SO_2 auront des effets généralement inférieurs à ceux découlant des différences entre les divers niveaux de stabilisation du CO_2 . A court terme (jusqu'en 2050 environ), cependant, l'importance relative des émissions d'autres gaz sera nettement plus grande. Les incertitudes quant aux futures émissions de CH_4 et de SO_2 se traduisent par de plus grandes incertitudes quant à l'évolution du climat que les incertitudes liées aux divers profils de concentration du CO_2 .

La situation concernant les émissions de SO_2 est plus complexe que celle qui concerne les émissions de gaz à effet de serre en raison d'une extrême hétérogénéité spatiale. On ne peut pas considérer que l'effet de refroidissement dû aux émissions de SO_2 compense simplement l'effet de réchauffement dû aux émissions de gaz à effet de serre.

3. INCIDENCES ET COÛT DE LA STABILISATION DES GAZ À EFFET DE SERRE

3.1 Incidences liées à diverses trajectoires des émissions

L'article 2 de la CCNUCC (voir la section 1.1) affirme explicitement la mesure dans laquelle les écosystèmes naturels, la production alimentaire et un développement économique durable déterminent s'il se produit une "perturbation anthropique dangereuse du système climatique". Selon les informations puisées dans DRE GTI et GTII, le rythme et l'ampleur de l'évolution du climat que risquent d'entraîner les trajectoires des émissions présentées dans la section 2 du présent document pourraient avoir, dans diverses régions, des effets importants sur les ensembles de ressources naturelles. On sait beaucoup de choses de la réaction de systèmes particuliers situés à des endroits définis et l'on peut identifier les risques et les avantages éventuels pour ceux-ci. Il n'est pas possible actuellement d'intégrer ces informations pour obtenir une évaluation des incidences mondiales des divers niveaux de stabilisation ou trajectoires des émissions. En effet, les projections concernant l'évolution du climat à l'échelon régional sont incertaines, nous comprenons mal de nombreux processus essentiels, les systèmes font l'objet de multiples contraintes climatiques ou non et très peu d'études ont été consacrées aux réactions dynamiques à une concentration en augmentation régulière des gaz à effet de serre et aux conséquences d'une augmentation des concentrations allant au-delà du doublement de la concentration d'équivalent CO₂ dans l'atmosphère. En outre, des projections établies à partir de modèles climatiques simples ne conviennent pas pour la production de scénarios d'études d'impact, car elles ne donnent que des valeurs moyennes mondiales. Les projections concernant l'évolution de la température et du niveau de la mer moyens mondiaux présentées à la section 2 ne sont, comme nous l'avons noté, que des indicateurs de l'évolution du climat.

3.1.1 Importance des incidences pour la prise de décisions concernant la stabilisation

On trouvera dans DRE GTIII (chapitres 5 et 6) des techniques d'intégration des informations concernant les incidences potentielles de l'évolution du climat sur les décisions concernant un objectif de stabilisation. Dans la plupart de ces techniques, la valeur nette des incidences se définit comme la différence de bien-être entre un avenir avec et sans changements climatiques d'origine humaine. Dans l'une de celles-ci, généralement dénommée "analyse coûts-avantages", les incidences négatives, les avantages et les coûts de l'adaptation sont rapprochés du coût éventuel de l'atténuation, le but étant d'obtenir un maximum d'avantages nets (avantages d'une évolution réduite du climat moins le coût de la réduction des émissions). Les mesures d'atténuation se justifient dans la mesure où leur coût prévu reste inférieur à leurs avantages attendus (valeur des incidences négatives éventuelles évitées plus la valeur de tout "avantage secondaire" de l'atténuation).

Dans une autre technique, dite "approche de la durabilité", on s'attache en premier lieu à éviter que des contraintes d'une importance donnée s'exercent sur les principaux systèmes, activités et régions. Pour cela, on identifie un niveau cible de changement — tel qu'une valeur absolue de variation de la température ou qu'un rythme donné d'évolution par décennie — qui entraînerait des risques inacceptables pour l'avenir. On définit ensuite des objectifs en matière de forçage radiatif et de stabilisation des concentrations de façon à éviter des niveaux inacceptables d'évolution. Dans ces deux techniques, on a recherché des moyens de traiter diverses questions essentielles : risque, incertitude, irréversibilité, évaluation économique des incidences hors marché, comparaison des coûts actuels et futurs et équité (DRE GTIII, section 6.1.2).

Dans l'approche de la durabilité comme dans l'analyse coûts-avantages, il faut obtenir des renseignements détaillés sur les incidences, bien que le caractère des informations voulues diffère selon la technique adoptée. Dans l'analyse coûts-avantages, il convient de réduire un ensemble divers d'incidences se produisant dans différents cadres et systèmes à une unité commune (souvent exprimée en termes financiers). Certaines applications de cette technique permettent de comparer les gains et les pertes qui se produisent dans divers systèmes sans les réduire à une unité commune d'analyse. Théoriquement, on peut, en les exprimant en termes financiers, comparer les gains et les pertes qui se produisent dans divers secteurs et régions. Malheureusement, l'évaluation financière globale des incidences et des avantages de l'atténuation comporte de grandes incertitudes, même dans le cas d'études nationales ou sectorielles, sans parler des études d'envergure mondiale. En outre, il existe peu ou pas d'évaluations de la "courbe des avantages"; la plupart des études existantes ne sont guère plus que des estimations ponctuelles (DRE GTIII, section 5.4.1). C'est pour ces motifs, notamment, que l'analyse coûts-avantages ne permet pas d'identifier avec une certitude suffisante le niveau d'atténuation à atteindre. Comme l'approche de la durabilité ne réduit pas les incidences à une unité commune, elle ne permet pas d'en comparer les effets dans les milieux physiques et les systèmes socio-économiques. En outre, il est difficile d'inclure les coûts de l'atténuation. L'approche de la durabilité prévoit cependant l'analyse des diverses incidences physiques.

Vu que l'importance des incidences varie considérablement selon les endroits et le moment, et vu que certains pays (en général des pays en développement) tirent une partie nettement plus importante de leurs revenus nationaux de secteurs sensibles sur le plan climatique (par ex. l'agriculture de subsistance) et possèdent des ressources plus limitées à consacrer à l'adaptation, la comparaison de l'acceptabilité relative d'un objectif donné en matière de stabilisation ou d'une trajectoire donnée des émissions sera extrêmement difficile quelle que soit la

technique d'analyse employée, surtout si une telle comparaison soulève de nombreuses questions éthiques et politiques.

3.1.2 *Evaluation des incidences biophysiques éventuelles dans la contribution du Groupe de travail II au Deuxième Rapport d'évaluation*

On sait beaucoup de choses de la sensibilité et de la vulnérabilité potentielles de certains écosystèmes terrestres et aquatiques, des systèmes de gestion des eaux, de l'agriculture, de l'infrastructure humaine et de la santé humaine. Les données scientifiques et techniques actuellement disponibles sont résumées dans DRE GTII (chapitres 1 à 18), bien qu'il soit difficile pour l'instant de mettre ces éléments en rapport avec des scénarios précis concernant l'évolution à venir du climat.

On trouvera dans DRE GTII un échantillon représentatif mais nécessairement partiel d'informations concernant les domaines suivants :

- a) *Forêts* — Des modèles de la circulation générale indiquent que selon l'évolution de la température et de la disponibilité d'eau prévue à l'équilibre en cas de doublement de l'équivalent CO₂, une partie importante (une moyenne mondiale de un tiers; de un septième à deux tiers selon les régions) des zones forestières actuelles du monde vont subir une évolution sensible des grands types de végétation, les changements les plus importants devant avoir lieu dans les latitudes élevées et les moins importants dans les tropiques. Il est prévu que l'évolution du climat va se produire à une allure rapide par rapport au rythme auquel les espèces forestières se développent, se reproduisent et se rétablissent (DRE GTII : Résumé à l'intention des décideurs (RID), section 3.1 et chapitre 1). De multiples contraintes subies par les forêts, dues notamment à l'ozone et à l'acidification par le SO₂, ainsi que l'évolution du climat et du CO₂, pourraient avoir d'importantes conséquences supplémentaires.
- b) *Ecosystèmes montagnards* — Il est prévu que la répartition de la végétation selon l'altitude va se décaler vers le haut. Certaines espèces dont l'aire de répartition climatique est limitée aux sommets des montagnes pourraient être éliminées en raison de la disparition de leur habitat ou d'un potentiel de migration réduit (DRE GTII : RID, section 3.1 et chapitre 5). L'évolution des écosystèmes montagnards modifie la fonction régulatrice de la végétation en altitude, altérant ainsi les caractéristiques hydrologiques de nombreuses régions.
- c) *Ecosystèmes aquatiques et côtiers* — La répartition géographique des zones humides va probablement se modifier en raison de l'évolution de la température et des précipitations. Certains écosystèmes côtiers sont particulièrement menacés : marais salés, mangroves, zones côtières humides, plages de sable, récifs de coraux, atolls coralliens et deltas fluviaux. Les changements subis par ces écosystèmes auraient d'importants effets négatifs sur le tourisme, l'approvisionnement en eau douce, la pêche et la biodiversité (DRE GTII : RID, section 3.1 et chapitres 6, 9 et 10).
- d) *Hydrologie et gestion des ressources en eau* — Selon les modèles, de un tiers à la moitié de la masse actuelle des glaciers de montagne et une superficie considérable de pergélisol pourraient disparaître d'ici cent ans. La réduction de l'étendue des glaciers et de l'enneigement pourrait aussi influencer sur la répartition saisonnière du débit des cours d'eau et de l'approvisionnement en eau destinée à la production d'hydro-électricité et à l'agriculture. Des variations relativement faibles de la température et des précipitations alliées à des effets non linéaires sur l'évapotranspiration et l'humidité du sol pourraient conduire à des variations relativement importantes de l'écoulement, surtout dans les régions semi-arides. La quantité et la qualité de l'eau distribuée posent déjà de graves problèmes actuellement dans de nombreuses régions, notamment dans les zones côtières de faible altitude, les deltas et les petites îles, ce qui rend ces régions particulièrement vulnérables face à toute réduction supplémentaire de l'approvisionnement en eau *in situ* (DRE GTII : RID, section 3.2 et chapitres 7, 10 et 14).
- e) *Produits alimentaires et fibres* — Les études existantes indiquent que dans l'ensemble, la production agricole mondiale pourrait se maintenir par rapport à la production de base en cas d'évolution du climat supposant un doublement de l'équivalent CO₂ à l'équilibre. Cette conclusion tient compte des effets bénéfiques de la fertilisation par le CO₂, mais non de l'évolution des parasites agricoles et des effets éventuels de l'évolution de la variabilité du climat. Cependant, la faim et la famine risquent de sévir davantage à certains endroits. C'est parmi les populations les plus pauvres du monde — notamment celles des régions tropicales et subtropicales qui, dans les zones semi-arides, dépendent de systèmes d'exploitation isolés — que le problème de la faim risque de s'intensifier le plus. (DRE GTII : RID, section 3.3 et chapitres 13 et 16).
- f) *Infrastructure humaine* — Il est clair que l'évolution du climat va accroître la vulnérabilité de certaines populations côtières face aux inondations et à la perte de terrains par érosion. Certains petits Etats insulaires et d'autres pays seront plus vulnérables en raison de la relative faiblesse des dispositifs actuels de protection maritime et côtière. Les pays ayant une forte densité de peuplement seront plus vulnérables que d'autres. Les marées de tempête et les inondations pourraient menacer des civilisations entières. L'élévation du niveau de la mer pourrait obliger ces pays à procéder à des migrations intérieures ou internationales (DRE GTII : RID, section 3.4 et chapitres 9, 11, 12 et 17).

g) *Santé humaine* — L'évolution du climat risque d'avoir des incidences très diverses et essentiellement défavorables sur la santé, avec de nombreuses pertes humaines. Les incidences directes sur la santé sont l'augmentation de la mortalité et des affections (surtout cardiorespiratoires) due à l'intensification et à la plus longue durée des vagues de chaleur. Le réchauffement des régions froides devrait conduire à une réduction du nombre de décès dus à des refroidissements. Les incidences indirectes de l'évolution du climat sont le risque de recrudescence de maladies infectieuses à transmission vectorielle (comme le paludisme, la dengue, la fièvre jaune et certaines encéphalites d'origine virale) imputable à l'extension de l'aire de répartition et à l'allongement de la période de reproduction des vecteurs. La réduction de l'approvisionnement en eau douce et de la quantité de produits alimentaires nutritifs et l'aggravation de la pollution de l'air auront également des incidences sur la santé humaine (DRE GTII : RID, section 3.5 et chapitre 18).

3.1.3 *Évaluation économique des incidences*

L'évaluation économique des incidences de l'évolution du climat est intégrée aux analyses coûts-avantages et aux autres techniques décisionnelles dont on se sert pour comparer les coûts et avantages éventuels de diverses lignes de conduite. Ces techniques sont évaluées dans DRE GTIII (chapitre 6), qui sert de base à la présente section.

La valeur financière des incidences d'un doublement de la concentration de CO₂ a été évaluée pour divers secteurs de l'économie de marché. On s'accorde largement à reconnaître que des mesures standard, telles que celle des incidences sur le PIB par habitant, ne conviennent pas pour évaluer les conséquences éventuelles de l'évolution du climat, car si certains effets peuvent s'exprimer en termes financiers, d'autres ne le peuvent pas. Il existe quelques chiffres concernant les incidences hors marché dans les cas où il n'existe pas de méthode permettant d'exprimer ces incidences en termes financiers (par exemple, la valeur de la vie, de la disparition d'une espèce, de l'association d'espèces) et d'en calculer les effets combinés sur le marché et hors marché dans certains secteurs (par exemple, dans le cas des forêts, les pertes en bois d'œuvre et leur valeur pour l'usage public). Les incidences nettes de l'évolution du climat comprennent les incidences sur le marché et les incidences hors marché, dans la mesure où elles peuvent être quantifiées, ainsi parfois que les coûts d'adaptation. On exprime la valeur nette de ces incidences pour tenir compte de certains effets bénéfiques éventuels de l'évolution du climat, même si cela doit rendre confuse la question de l'équité en matière de répartition. Il faut garder à l'esprit l'aspect incomplet des chiffres sur les incidences présentés ici lorsqu'on évalue l'ensemble des répercussions de l'évolution du climat sur le bien-être.

Dans les études considérées dans DRE GTIII, les pertes économiques qu'entraînerait un réchauffement planétaire de

2,5 °C (évaluation moyenne de l'accroissement de la température mondiale à l'équilibre correspondant à un doublement de la concentration d'équivalent CO₂) dans un monde semblable à celui d'aujourd'hui (caractéristiques démographiques, structures sociales et conditions économiques inchangées) sont les suivantes :

- a) dans les pays développés : 1 à 1,5 % du PIB par an;
- b) dans les pays en développement : 2 à 9 % du PIB par an.

Dans les études considérées dans DRE GTIII, on a regroupé ces chiffres par rapport au PIB, ce qui donne un total général de 1,5 à 2 % du PIB. Ce regroupement des fourchettes de coûts est fondé sur un grand nombre d'hypothèses simplificatrices et controversées. Il correspond à la meilleure approximation centrale déduite d'études relativement limitées où l'on a cherché à tenir compte des incidences sur le marché et hors marché, ainsi, parfois, que des coûts d'adaptation. Ce regroupement ne couvre pas la (vaste) fourchette d'incertitude existante. Les fourchettes de coûts sont également imparfaites dans la mesure où le PIB ne permet pas de mesurer de façon précise le bien-être de l'homme et de la société. Un tel regroupement, qui pose de nombreuses difficultés (DRE GTIII, chapitres 3 et 6), fait l'objet d'importantes réserves dans le Résumé à l'intention des décideurs de DRE GTIII.

Les chiffres existants sont rudimentaires, pour plusieurs raisons. Outre les nombreux problèmes que pose l'évaluation des incidences dans chaque secteur considéré — que l'on a noté ci-dessus et dans DRE GTII —, il existe diverses incertitudes que nous présentons ici :

- a) Les chiffres cités concernent essentiellement les États-Unis et les autres pays membres de l'OCDE, de nombreuses évaluations régionales et mondiales étant fondées sur l'extrapolation de ces chiffres. Les données concernant d'autres pays sont rares, bien qu'en augmentation. C'est pourquoi nos connaissances des incidences sur le plan régional et local sont limitées.
- b) L'évaluation des incidences exprimée en termes financiers, qui correspond aux scénarios supposant un doublement de la concentration d'équivalent CO₂, est généralement fondée sur les conditions économiques actuelles et s'énonce en pourcentage du PIB. La simple projection de pertes exprimées en pourcentage constitue une approximation plus ou moins insatisfaisante, car les futures incidences vont dépendre de l'évolution des conditions économiques, démographiques et environnementales, qui seront très différentes de celles d'aujourd'hui. Certains effets de l'évolution du climat risquent de s'accroître plus vite que le PIB (par ex. la valeur économique des biens hors marché) et d'autres moins vite (par ex. l'agriculture).
- c) La mesure de la valeur économique des incidences présente des difficultés, même si ces incidences sont

connues. Tel est le cas notamment pour les incidences hors marché et pour les incidences concernant les pays en développement. Certains auteurs considèrent comme indispensable l'évaluation de ces incidences en termes financiers pour la prise de décisions saines, alors que d'autres, pour des raisons d'éthique, rejettent l'évaluation d'incidences telles que la perte de vies humaines ou la baisse de biodiversité.

- d) Le calcul d'un total général des incidences soulève des questions difficiles d'équité parmi les pays, surtout au vu des différences de revenus et d'autres différences sociales. Le simple regroupement des chiffres concernant le PIB signifie que des incidences équivalentes sont considérées différemment selon les pays en fonction surtout du produit économique national. Les questions d'éthique que soulève un tel regroupement posent des problèmes de cohérence qui ne sont pas explicitement abordés dans les études existantes (DRE GTIII, chapitres 3 et 6).
- e) Il est également difficile de fixer des taux d'actualisation, qui constituent l'outil analytique dont se servent les économistes pour comparer des effets économiques se produisant à divers moments. Ce point est important, car les incidences de l'évolution du climat risquent d'imposer certains coûts aux futures générations.

L'application pratique de ces chiffres à la prise de décisions relatives à l'évolution du climat est difficile, non seulement en raison de l'incertitude attachée aux chiffres proprement dits, mais aussi en raison de l'aspect mondial et intergénérationnel du problème. Dans quelques régions, certains systèmes pourront bénéficier de l'évolution du climat pendant un certain temps, alors que dans de nombreuses autres régions, les incidences de cette évolution seront négatives. Les incidences en question seront donc inégalement réparties. L'évolution du climat va se répercuter sur des sociétés humaines très diverses, certaines desquelles auront moins de possibilités de s'adapter que d'autres et souffriront ainsi plus que d'autres. Une évaluation implique des choix parmi des catégories d'incidences, des régions, des nations, des générations et des individus. Il existe diverses techniques permettant de rendre ces choix transparents et gérables, mais la décision réelle quant aux incidences les plus coûteuses est d'ordre politique. Dans les systèmes institutionnels, économiques et politiques bien développés, il existe des mécanismes permettant de faire de tels choix et de dédommager les perdants. Sur le plan international et intertemporel, les mécanismes existants sont beaucoup plus faibles. Actuellement, la connaissance des incidences de l'évolution du climat est insuffisante pour rendre ces choix parfaitement clairs.

3.1.4 Incertitudes relatives à la projection des incidences de diverses trajectoires

Aux deux extrémités de la fourchette, on peut généralement s'attendre à ce que des concentrations cibles plus élevées et une

évolution plus rapide du forçage radiatif aient des incidences plus profondes sur les écosystèmes et les sociétés humaines que des trajectoires supposant une accumulation plus lente du forçage et de plus faibles concentrations au moment de la stabilisation. Cependant, il n'est pas possible actuellement de déterminer dans quelle mesure des incidences découlant d'une concentration cible ou d'une trajectoire donnée des émissions diffère des incidences associées à une autre cible ou trajectoire. Il n'existe pas, pour de multiples raisons, de rapport simple entre les émissions et la concentration de gaz à effet de serre et d'aérosols dans l'atmosphère, d'une part, et leurs incidences potentielles d'autre part. Ces raisons sont les suivantes :

- a) L'altération du profil du forçage radiatif et les changements climatiques moyens mondiaux ont des effets sur les conditions climatiques qui diffèrent selon les régions. Les conditions climatiques locales et régionales — variation de la durée des saisons de croissance, disponibilité d'eau et incidence du régime des perturbations (phénomènes extrêmes liés à des températures élevées, inondations, sécheresses, incendies et pullulation de parasites) — ont des incidences considérables sur la structure et la fonction des milieux naturels et façonnés par l'homme.
- b) Certains systèmes sont plus vulnérables que d'autres face à l'évolution des climats régionaux. Par exemple, les sociétés humaines sont plus adaptables, donc moins vulnérables en moyenne que les milieux naturels; les milieux forestiers demandant plus de temps que les prairies pour s'établir, et sont ainsi moins susceptibles de pouvoir migrer vers de nouvelles zones réunissant les conditions voulues à mesure que le régime des températures et des précipitations se modifie.
- c) La vulnérabilité relative des régions peut varier. En général, les systèmes sont plus vulnérables dans les pays en développement, dont l'économie et les conditions institutionnelles sont moins favorables que celles des pays développés. Les habitants des zones semi-arides, des zones élevées, des zones côtières de basse altitude, des zones bordées par l'eau ou menacées d'inondations et des petites îles sont particulièrement vulnérables face à l'évolution du climat. Des zones sensibles telles que les plaines d'inondation des cours d'eau et les plaines côtières sont devenues plus vulnérables face à des dangers tels que tempêtes, inondations et sécheresses en raison de l'accroissement de la densité de peuplement et de l'activité économique.
- d) Les incidences ne sont pas directement fonction de l'ampleur et du rythme des changements. Pour certaines espèces — donc pour certains systèmes —, il existe des seuils de variation de la température, des précipitations et d'autres éléments au-delà desquels il risque de se produire des changements discontinus de viabilité, de structure ou de fonction. On peut ainsi penser que de faibles variations d'un climat local pourront avoir des incidences disproportionnées.

- e) La plupart des études existantes se limitent à une analyse d'incidences conduisant à des changements qui correspondent à un doublement de la concentration d'équivalent CO_2 à l'équilibre. Rares sont les études où l'on a envisagé la réaction dynamique à une concentration de gaz à effet de serre en augmentation régulière ou à un scénario de stabilisation. Plus rares sont celles où l'on a considéré les conséquences d'une augmentation de la concentration d'équivalent CO_2 allant au-delà du doublement. Plus rares encore sont celles où l'on a évalué les incidences de facteurs de stress multiples — O_3 , acidification par le SO_2 et autres facteurs d'agression — face à l'évolution du climat et de la concentration de CO_2 .
- f) frais transitoires associés à la rotation des immobilisations corporelles, qui augmentent en cas de réforme anticipée;
- g) degré de coopération internationale, qui détermine la mesure dans laquelle des solutions peu coûteuses d'atténuation sont mises en œuvre dans diverses régions du monde;
- h) hypothèses concernant le taux d'actualisation employé pour comparer les coûts à divers moments.

Disons pour conclure que la concentration ultime de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et le rythme d'augmentation de cette concentration risquent d'influer sur les incidences, un rythme plus lent d'évolution du climat laissant davantage de temps aux systèmes pour s'adapter. Cependant, nos connaissances ne sont pas suffisantes, actuellement, pour que nous puissions définir avec précision un rythme et une ampleur des changements constituant un seuil.

3.2 Coût de la stabilisation de la concentration de CO_2

Dans les sections précédentes du présent document, nous avons étudié les aspects physiques de divers niveaux de stabilisation et envisagé leurs incidences climatiques. Nous passons maintenant aux coûts associés à la stabilisation de la concentration de gaz à effet de serre. Les coûts en question dépendent dans une large mesure du niveau de stabilisation recherché et de l'itinéraire emprunté pour atteindre ce niveau. Nous axons notre étude sur le CO_2 (facteur le plus important de forçage radiatif, sur lequel nous sommes le mieux documentés) que dégage la combustion de combustibles fossiles, ce gaz constituant la principale source anthropique.

Les facteurs qui influent sur les coûts d'atténuation du CO_2 sont les suivants :

- a) futures émissions en l'absence d'intervention ("scénarios de référence");
- b) objectif en matière de concentration et itinéraire à suivre pour aboutir à la stabilisation, qui déterminent le bilan du carbone disponible pour les émissions;
- c) comportement du cycle naturel du carbone, qui influe sur le bilan du carbone disponible pour un objectif et un itinéraire donnés en matière de concentration;
- d) différence de prix entre les combustibles fossiles et les solutions sans carbone et entre divers combustibles fossiles;
- e) progrès techniques et vitesse d'adoption de techniques qui émettent moins de carbone par unité d'énergie produite;

Les politiques et mesures adoptées pour réduire les émissions, la souplesse autorisée en vue de réaffecter la responsabilité de la lutte antipollution selon les sources et les pays, les actions de recherche-développement, les transferts de technologies, les types d'investissements que les sociétés réalisent dans l'infrastructure (par ex. transports en commun par opposition au développement du réseau routier) et le niveau de concentration choisi pour la stabilisation vont influer sur les frais réels à engager.

3.2.1 Considérations économiques liées à la stabilisation de la concentration de CO_2

3.2.1.1 Quantité de carbone à éliminer

Le coût de la limitation du carbone dépend du scénario de référence adopté en ce qui concerne les émissions, autrement dit de la façon dont l'on prévoit l'évolution des émissions en l'absence de toute intervention. Plus ce scénario est élevé, plus il faudra éliminer de carbone pour atteindre un objectif donné en matière de stabilisation, donc plus l'intervention nécessaire sera lourde. La figure 16a présente les six scénarios de référence IS92. Dans ces scénarios, les différences d'émissions sont dues à diverses hypothèses concernant la population, la croissance économique, le coût et la disponibilité de solutions de remplacement du côté de l'offre et de la demande d'énergie, ainsi que d'autres facteurs.

Les émissions augmentent dans tous les scénarios sauf un. Cette évolution correspond à ce qu'indiquent la grande majorité des études citées dans DRE GTIII. Parmi les douzaines d'études consultées, presque toutes indiquent une augmentation des émissions dans des conditions de référence. S'il en est ainsi, c'est que ces études prévoient que la croissance économique entraînera une augmentation des émissions plus importante que la réduction à laquelle conduira la diminution de l'intensité énergétique et le passage à des sources d'énergie à moindre teneur en carbone.

L'augmentation des émissions de carbone dans les scénarios de référence ne signifie pas qu'il n'existe pas de solutions économiquement attrayantes de remplacement des combustibles fossiles, que ce soit du côté de l'offre ou de la demande du système énergétique. Des solutions de ce type sont prises en compte en assez grand nombre dans la plupart des analyses

économiques. Cette augmentation, en fait, signifie simplement que les solutions en question ne sont pas mises en œuvre à un rythme assez rapide pour y mettre fin. Une telle situation est peut-être due à l'insuffisance des mesures sans regrets.

Dans la figure 16b, les scénarios concernant les émissions sont traduits en concentration de CO_2 . Aucun des six scénarios ne prévoit la stabilisation de cette concentration avant 2100, bien que le scénario IS92c en prévoie une très faible augmentation après 2050. Les scénarios IS92a, b, e et f prévoient le doublement avant 2070 de la concentration de CO_2 par rapport à l'époque préindustrielle.

3.2.1.2 Objectif en matière de stabilisation

Le coût de la limitation du carbone dépend également de l'objectif fixé en matière de stabilisation de la concentration. En première approximation, cet objectif définit une quantité de

carbone pouvant être émis entre aujourd'hui et la date à laquelle l'objectif doit être atteint ("bilan du carbone"). Le tableau 5 présente les "bilans du carbone" correspondant, en 2100, à une stabilisation à 450, 550, 650, 750 et 1 000 ppmv (voir aussi les émissions cumulatives dont sont déduits les bilans du carbone, à la figure 6). Plus l'objectif est bas en matière de stabilisation, plus le bilan du carbone est faible (autrement dit, plus la valeur des émissions cumulatives est faible).

La valeur de ce bilan est un facteur important des coûts d'atténuation. Plus l'objectif est bas en matière de stabilisation, plus le bilan du carbone est faible et plus le degré d'intervention requis est élevé. Le tableau 5 permet de comparer le bilan du carbone correspondant aux niveaux et aux itinéraires de stabilisation présentés dans les figures 5 et 6 aux émissions anthropiques cumulées de CO_2 dans le cas des scénarios IS92.

3.2.1.3 Différence de prix entre les combustibles fossiles et les solutions sans carbone

Le coût de la stabilisation de la concentration de CO_2 dépend également du prix des combustibles fossiles par rapport aux solutions sans carbone. Pour une demande donnée d'énergie, le coût de la réduction des émissions de CO_2 liées à l'énergie dépend de la différence de prix entre les combustibles fossiles disponibles et les solutions sans carbone au moment où les émissions mondiales de CO_2 sont réduites.

Il est prévu que la différence de prix entre les combustibles fossiles traditionnels (pétrole brut, gaz naturel et charbon traditionnels, par exemple) et les solutions sans carbone va s'amenuiser, mais on ne sait pas trop de combien, la question faisant l'objet d'un vaste débat. Au cours des 100 prochaines années, le prix des combustibles fossiles traditionnels devrait augmenter à mesure qu'on tirera parti de ces ressources et que les dépôts les moins onéreux et les plus accessibles de charbon seront exploités. En même temps, les progrès des sciences fondamentales, des techniques et des dispositions institutionnelles devraient conduire à une réduction du prix des technologies ne faisant pas appel au carbone (et des combustibles fossiles non traditionnels).

La mesure dans laquelle les émissions cumulatives excèdent les ressources traditionnelles en pétrole brut et en gaz naturel donne une indication quant à l'apport de ces combustibles à la consommation totale d'énergie (voir le tableau 9 du document technique I du GIEC) en ce qui concerne l'évaluation des réserves et des ressources mondiales d'énergie⁷. Si les émissions cumulatives correspondant à un objectif donné en matière

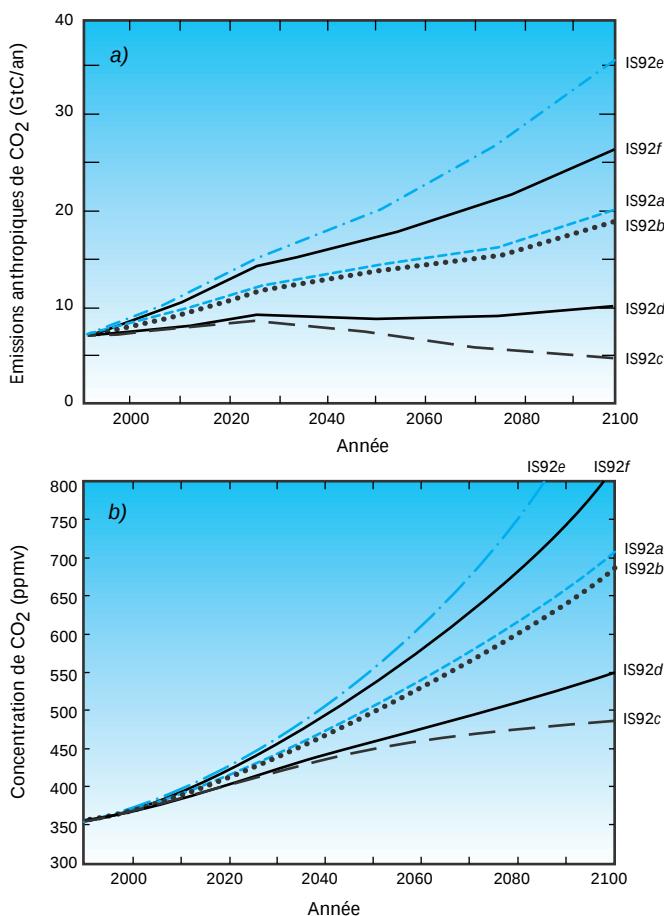


Figure 16. a) Emissions totales de CO_2 d'origine humaine selon les divers scénarios IS92. b) Variations déduites de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère selon les différents scénarios IS92 calculés à l'aide du modèle du cycle du carbone de Berne (voir DRE GTI, section 2.1) (d'après le résumé technique de DRE GTI).

⁷Nous mettons ici l'accent sur les ressources, car elles représentent les quantités de combustibles, connues ou inconnues, qui restent à consommer.

Cas Scénarios IS92	Emissions de CO ₂ cumulées de 1991 à 2100 (GtC)	Emissions de CO ₂ cumulées de 1991 à 2100 (GtC)		
		Stabilisation à	Profils* "S"	Profils† "WRE"
c	770	450 ppmv	630	650
d	980	550 ppmv	870	990
b	1430	650 ppmv	1030	1190
a	1500	750 ppmv	1200	1300
f	1830	1000 ppmv	-	1410
e	2190			

* Comme dans GIEC94 (chapitre 1)
† Profils selon lesquels les émissions vérifient le scénario IS92a au moins jusqu'à l'an 2000 (Wigley, *et al.*, 1996)

Tableau 5. Emissions totales de CO₂ d'origine humaine cumulées de 1991 à 2100 inclusivement (GtC). Toutes les valeurs ont été calculées à partir du bilan du carbone pour les années 80 (GIEC94, chapitre 1) et des résultats obtenus à partir du modèle du cycle du carbone de Berne.

de stabilisation sont égales ou inférieures aux émissions cumulatives qui résulteraient de la combustion des ressources traditionnelles en pétrole et en gaz, ces combustibles constitueront sans doute un élément important de l'offre totale d'énergie pendant la période de passage à des solutions sans carbone. D'un autre côté, si les émissions cumulatives correspondant à un objectif donné en matière de stabilisation sont sensiblement supérieures aux émissions cumulatives qui résulteraient de la combustion des ressources traditionnelles en pétrole brut et en gaz naturel, ces combustibles représenteront sans doute une proportion relativement faible de la demande totale d'énergie pendant la période de transition. La différence de prix entre les combustibles fossiles et les solutions sans carbone sera inférieure dans ce dernier cas. Bien que l'augmentation du prix pour des solutions sans carbone ait des chances d'être d'autant plus faible que le niveau de stabilisation sera élevé, la demande totale d'énergie sera plus élevée, d'où une incertitude quant à l'effet net du coût de la conversion.

Cependant, il nous est impossible de prévoir l'évolution dans le temps de la différence de prix absolue entre les combustibles fossiles non traditionnels et les solutions sans carbone. Des progrès techniques permettront sans doute de réduire le prix des combustibles fossiles non traditionnels et des solutions sans carbone, mais le rythme de ces progrès sera probablement différencié. Les progrès techniques qui permettront de réduire le prix des combustibles fossiles non traditionnels par rapport aux solutions sans carbone entraîneront une augmentation des frais de conversion par accroissement de la différence de prix entre les combustibles fossiles et les solutions sans carbone, alors que les progrès permettant de réduire le prix des solutions sans carbone auront l'effet inverse.

La différence de prix entre les divers combustibles fossiles disponibles influe sur le coût de la conversion de manière semblable.

3.2.1.4 Itinéraire suivi par les émissions

Comme le montre la figure 5 et comme nous l'indiquons dans la section 2.2.1.2, un même objectif en matière de concentration (voir la figure 4) peut être atteint en faisant passer les émissions par plusieurs itinéraires. On peut équilibrer les émissions à court terme par rapport aux émissions à long terme. D'un autre côté, plus les émissions sont élevées au départ, moins on dispose de possibilités d'ajuster ces émissions par la suite. Dans la figure 5, les tiretés (profils WRE) indiquent des émissions plus importantes pendant les premières années, mais un passage plus rapide de l'augmentation à la diminution des émissions. En revanche, les traits pleins (profils S) indiquent des émissions plus importantes ultérieurement, mais plus faibles pendant les premières années. Ainsi, comme nous l'avons vu dans la section 2.2.1.2, il existe, pour un niveau de stabilisation donné, un "bilan" autorisé d'émissions cumulatives de carbone, le choix de l'itinéraire conduisant à la stabilisation pouvant être considéré comme le problème de la meilleure manière (c'est-à-dire de la façon présentant la plus grande efficacité économique et les plus faibles incidences dommageables) de répartir ce bilan dans le temps.

Pour un niveau de stabilisation donné, les différences entre les itinéraires des émissions sont importantes, car les coûts sont différents selon les itinéraires. Les auteurs de DRE GTIII ont identifié certains facteurs qui influent sur le coût des divers itinéraires : a) le traitement des immobilisations corporelles actuelles et futures; b) la perspective de progrès techniques; c) le taux d'actualisation; d) le bilan du carbone.

Immobilisations corporelles, rotation des immobilisations et nouveaux investissements

Le coût de l'atténuation dépend de la durée de vie des biens de production existants. La durée de vie des immobilisations

corporelles servant à produire et à exploiter l'énergie (par exemple, centrales électriques, logements et transports) est variable. Elle dépend de facteurs tels que les coûts d'entretien et la fiabilité, qui ont tendance à varier avec le temps. Néanmoins, les immobilisations liées à l'énergie ont généralement une longue durée de vie et une réforme anticipée de celles-ci risque d'être coûteuse. Pour éviter une réforme anticipée, il faut répartir les actions d'atténuation plus également dans le temps et l'espace. Les auteurs de DRE GTIII ont souligné que pour réduire le coût de tout objectif en matière de stabilisation, il faut investir dans de nouveaux biens de production et remplacer ceux-ci à la fin de leur durée de vie utile (c'est-à-dire au moment de la rotation des immobilisations).

Attendre de nouveaux investissements n'implique pas de ne rien faire. Si l'on agit trop lentement — sans même prendre de mesures peu onéreuses —, on risque d'augmenter le coût d'un itinéraire de stabilisation en devant agir plus rapidement par la suite. Il pourra alors s'avérer nécessaire de procéder à une réforme anticipée d'immobilisations mises en place entre temps. En retardant l'atténuation de quelques dizaines d'années, par exemple, on provoquerait à l'échelle mondiale une augmentation sensible des émissions de combustibles fossiles (voir par exemple, le scénario IS92a et plusieurs autres scénarios). Pour stabiliser la concentration au-dessous de 450 ppmv, il faudrait ramener les émissions au niveau de 1990 d'ici 2040 environ et les faire baisser par la suite. Cela pourrait exiger le remplacement d'une grande partie des immobilisations mises en place entre temps, le coût d'une telle opération devant être confronté aux avantages économiques que comporterait une temporisation.

La question du taux optimal de renouvellement des immobilisations corporelles amène à des interrogations plus vastes quant à l'inertie des systèmes énergétiques. Par exemple, divers investissements ont des incidences différentes dans le temps. L'édification d'une nouvelle infrastructure à forte intensité de carbone ayant une très longue durée de vie peut entraîner la hausse du coût de la limitation des émissions dans plusieurs dizaines d'années. Il peut être important de décourager dès maintenant l'investissement, par exemple dans des immeubles peu économes en énergie ou dans d'autres infrastructures urbaines incitant à une vaste gamme d'activités fortes consommatrices de carbone, pour abaisser le coût à long terme de la stabilisation des concentrations, même à un niveau plus élevé. Cependant, nous comprenons mal la question de l'inertie et de la mesure dans laquelle elle influe sur divers investissements.

Comme l'indique la figure 5, pour limiter la concentration à 450 ppmv, il faudrait commencer très tôt à réduire les émissions sur le plan mondial, alors que des limites plus élevées retarderaient la nécessité de restrictions. Si l'augmentation des émissions dans certains pays peut être compensée par une diminution dans d'autres, cette augmentation, à terme, devra être restreinte dans toutes les régions pour que la limite fixée soit atteinte.

Progrès techniques

Le coût d'un itinéraire de stabilisation dépend aussi de la façon dont la technologie influe sur le coût de la réduction des émissions à un moment donné et dans le temps. En général, le coût d'un tel itinéraire augmente avec la quantité d'émissions à réduire en un instant donné. Cependant, avec le temps, les progrès techniques devraient permettre d'abaisser ce coût par unité de réduction.

Le coût de la réduction à un moment donné augmente avec la quantité d'émissions réduites au moment en question. L'ensemble de techniques de réduction présenté dans DRE GTII peut être considéré comme constituant une "courbe de l'offre". Il va de soi que la solution la moins chère consiste à prendre les mesures les moins onéreuses en premier, puis à remonter la "courbe de l'offre" pour prendre les mesures plus coûteuses nécessaires pour atteindre l'objectif.

Les progrès techniques vont probablement permettre d'abaisser le coût de la réduction avec le temps. Le rythme de cette réduction peut dépendre du niveau de stabilisation et de l'itinéraire choisis. Un niveau de stabilisation et un itinéraire des émissions qui exigent davantage de réductions immédiates pourraient favoriser l'apparition de nouvelles techniques moins consommatrices de carbone, les techniques "induites". A long terme, celles-ci augmenteraient la souplesse et abaisseraient le coût d'une limitation du carbone, mais à un prix qui s'entend à court terme. Selon ce raisonnement, plutôt que d'attendre que les progrès techniques abaissent le coût de l'atténuation, il faut, en matière d'émissions, imposer rapidement des contraintes qui inciteront le secteur privé à prendre les mesures voulues en matière de recherche-développement et à ne pas investir dans des travaux de recherche-développement favorisant des ressources et des techniques à forte intensité de carbone.

Les progrès techniques induits (internes) dépendent de la mesure dans laquelle des secteurs innovants seront stimulés par des clignotants des prix, dont l'intensité sera sans doute maximale sur des marchés fonctionnant correctement. Dans les premières étapes du développement des techniques, il est difficile d'établir à qui reviennent les résultats des recherches. C'est pourquoi le secteur privé hésite souvent à investir dans la recherche-développement. La perspective de futurs marchés a peu de chances de venir entièrement à bout de ce problème. Cette faiblesse bien connue des marchés sert souvent à justifier l'engagement des gouvernements dans la recherche-développement, qui peut contribuer éminemment au développement précoce de ces techniques.

La recherche-développement d'Etat et les contraintes imposées aux émissions ne sont pas les seuls leviers dont disposent les décideurs pour influencer sur le rythme de développement et de diffusion des techniques. Des incitations fiscales et l'appui accordé à des marchés "protégés" — par exemple en versant des primes aux énergies renouvelables — peuvent également inciter le secteur privé à investir dans des sources d'énergie ne

faisant pas appel au carbone et dans le développement d'industries connexes. La diffusion des techniques risque aussi d'être ralentie par des imperfections du marché, qu'il faudra corriger au moyen de politiques précises.

En réalité, une combinaison de toutes ces mesures — net élargissement de la recherche-développement d'Etat, appui à la diffusion des techniques, appuis explicites accordés aux marchés et contraintes appropriées imposées aux émissions — va sans doute avoir un effet global qui stimulera la technologie nécessaire pour abaisser le coût de la stabilisation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Les ouvrages étudiés dans DRE GTIII n'indiquent pas clairement quelle serait la combinaison de mesures voulue et quelle incidence une telle combinaison aurait sur les itinéraires des émissions.

Coopération internationale

Les solutions d'atténuation les moins onéreuses sont souvent liées à de nouveaux investissements. Pour tirer parti de telles possibilités, il serait rentable d'adopter des mesures d'atténuation à bas prix à l'occasion de nouveaux investissements réalisés dans le monde entier. Il est possible de faire appel à des mécanismes tels que l'échange de droits d'émission et la mise en œuvre commune de mesures pour appliquer cette stratégie de façon à favoriser la répartition des coûts de l'atténuation tout en encourageant la rentabilité. Cette approche, communément appelée "souplesse dans l'espace", est efficace du fait que les avantages pour le climat de la réduction des émissions de CO₂ ne dépendent pas de l'endroit où elle a lieu.

Taux d'actualisation

Pour ce qui est des coûts d'atténuation (qui font l'objet de la présente section), un taux positif d'actualisation ferait baisser le montant actuel des frais à engager du fait du moindre poids accordé aux futurs investissements. En effet, plus une charge économique (la réduction des émissions en l'occurrence) est différée, plus les coûts actuels sont faibles. Dans un contexte plus large, l'actualisation réduit le poids imputé aux futures incidences sur l'environnement par rapport aux avantages de la consommation actuelle d'énergie. Cette consommation fait paraître légers de sérieux obstacles — tels que la conversion rapide des systèmes énergétiques à l'avenir — en dollars d'aujourd'hui et pourrait influencer sur la façon d'envisager l'équité intergénérationnelle.

Bilan du carbone

On peut faire suivre divers itinéraires aux émissions de carbone pour atteindre un objectif donné en matière de stabilisation (comme le montrent les figures 5 et 6). Si aucun dérèglement majeur des processus qui gouvernent l'absorption du CO₂ par la biosphère océanique et terrestre ne se produit, les émissions

cumulatives totales à long terme, pour un itinéraire de stabilisation donné, sont plus ou moins indépendantes de l'itinéraire suivi pour atteindre un objectif en matière de stabilisation (voir la figure 6 et la section 2.2). Cependant, la répartition des émissions dans le temps dépend de l'itinéraire adopté. Les émissions, au cours des prochaines décennies, pourraient être nettement plus élevées dans le cas d'itinéraires suivant le scénario IS92a au départ (voir les figures 6 et 7). Ainsi, la nécessité de solutions sans carbone plus onéreuses serait réduite à court terme et de plus amples réductions des émissions seraient reportées à plus tard.

Cependant, les itinéraires qui suivent le scénario IS92a au départ comportent des risques. Des émissions plus importantes au début, donc des concentrations plus élevées et une augmentation des taux de concentration, risquent de perturber les processus physiques et biogéochimiques qui gouvernent la circulation du carbone. Cela pourrait signifier que les émissions devraient être plus faibles que prévu si l'on veut atteindre un certain objectif en matière de stabilisation. Des émissions plus importantes au début conduiraient à un rythme plus rapide d'évolution du climat, ce qui risque de revenir cher. Des itinéraires supposant des émissions plus importantes au début pourraient nous obliger à un passage plus rapide de l'augmentation à la diminution des émissions, ce qui tendrait à accroître les coûts de l'atténuation.

3.2.2 Modélisation du coût de la stabilisation de la concentration de CO₂

La modélisation des coûts de l'atténuation est une tâche immense. Il est difficile de prévoir l'évolution du système énergétique-économique au cours des dix prochaines années. Les projections sur un siècle ou davantage doivent être envisagées avec la plus grande prudence. Néanmoins, de telles études peuvent être source d'indications pratiques. Leur valeur réside non pas dans les chiffres produits mais dans les résultats généraux, utiles pour la prise de décisions.

3.2.2.1 Etudes disponibles au moment de la parution de la contribution du Groupe de travail III au Deuxième Rapport d'évaluation

Jusqu'à récemment, on avait tendance à axer les études relatives à l'évolution du climat sur les émissions plutôt que sur les concentrations. On parlait par exemple d'un retour des émissions au niveau de 1990 d'ici l'an 2000 ou d'une réduction de 20 % d'ici 2005. C'est ainsi que peu d'analyses avaient porté sur l'économie de la stabilisation au moment de la parution de DRE GTIII. Celles qui avaient porté sur ce sujet, abordées dans les chapitres 9 et 10 de DRE GTIII, sont présentées ci-après. (Depuis lors, plusieurs autres études ont été entreprises, mais nous n'en parlerons pas ici, conformément aux directives concernant la rédaction du présent document.)

Plusieurs auteurs se sont penchés sur la rentabilité de certaines concentrations cibles de CO₂. Nordhaus (1979) et Manne et Richels (1995), par exemple, identifient les stratégies d'atténuation les moins coûteuses permettant d'atteindre un ensemble d'objectifs autres en matière de concentration. Ils ont constaté que l'itinéraire d'atténuation le moins onéreux implique au départ des réductions modestes par rapport au scénario de référence concernant les émissions. En autorisant de plus fortes concentrations, on laisse les émissions suivre le scénario de référence plus longtemps.

Richels et Edmonds (1995) et Kosobud *et al.* (1994) ont étudié pour les émissions des itinéraires de substitution conduisant à la stabilisation des concentrations. Les résultats qu'ils ont obtenus indiquent que les itinéraires supposant des réductions modestes pendant les premières années et des réductions plus importantes ultérieurement sont moins chères (en termes de coûts d'atténuation) que celles qui supposent des réductions sensibles à court terme, vu leurs hypothèses quant à l'évolution des techniques, à la rotation des immobilisations corporelles, au taux d'actualisation et à l'effet du bilan du carbone. L'organisation dans le temps de la réduction des émissions est dénommée "souplesse dans le temps".

Un objectif plus élevé en matière de stabilisation autorise davantage de souplesse dans le rythme auquel on s'écarte du scénario de référence. Cependant, indépendamment de ce rythme, un itinéraire de stabilisation donné ne consiste pas en une politique d'attentisme ou de laisser-faire. D'abord, chaque itinéraire de concentration exige toujours que les futures immobilisations corporelles consomment moins de carbone que dans le cas d'un scénario ne supposant aucune limite pour le carbone. Vu la longue durée de vie du matériel servant à la production et à l'exploitation de l'énergie, cette condition a des conséquences pour les décisions actuelles en matière d'investissements. En deuxième lieu, il faut généralement de nombreuses années avant que de nouvelles possibilités concernant l'approvisionnement s'imposent sur le marché. Pour disposer à l'avenir d'une quantité suffisante de solutions peu onéreuses à faible intensité de carbone, il faudrait dès aujourd'hui un engagement soutenu en matière de recherche, de développement et de démonstration. Enfin, on suppose l'adoption immédiate de toute mesure "sans regrets" disponible pour réduire les émissions, ce qui peut exiger une intervention gouvernementale.

3.2.2.2 Limites des études existantes

Deux aspects des études ci-dessus ont fait l'objet de débats considérables : leur but et l'emploi de modèles largement simplifiés du système énergétique-économique. En ce qui concerne le premier point, les auteurs soulignent qu'ils ont axé leurs travaux sur les coûts de l'atténuation, et notamment sur l'itinéraire le moins coûteux pour atteindre un objectif donné en matière de concentration. Ils affirment qu'il est également important d'analyser les conséquences pour l'environnement du choix d'un itinéraire plutôt que d'un autre. Divers itinéraires pour les émissions impliquent non seulement des coûts d'at-

ténuation différents, mais aussi des avantages différents de par les incidences écologiques évitées, ainsi que l'apparition de nouveaux problèmes environnementaux, par exemple ceux qui pourraient se produire si l'on accorde davantage d'importance aux combustibles issus de la biomasse.

Les analyses sont aussi limitées par leur façon de traiter les incertitudes. L'incertitude concernant l'objectif ultime risque de persister un certain temps. Dans ces conditions, les décideurs doivent définir une prudente stratégie d'arbitrage à court terme établissant un équilibre entre les risques d'une intervention trop lente et le coût d'une intervention trop agressive. Bien qu'on se soit efforcé, dans plusieurs des études citées dans DRE GTIIL, d'évaluer la solidité d'une décision de réduction à court terme par rapport à l'objectif à long terme en matière de concentration, ces études n'abordent pas explicitement les effets des incertitudes.

Certains critiques s'attaquent aussi aux méthodes employées dans ces études. Ils doutent que les modèles, qui simplifient nécessairement le système énergétique-économique, puissent saisir toute la complexité des immobilisations corporelles, de leurs rapports mutuels et d'autres sources d'inertie du système. Par exemple, les modèles actuels ne simulent pas les liens existant entre les investissements. Certains investissements que nous réalisons aujourd'hui, dans les routes par exemple, durent très longtemps et créent tout un réseau d'investissements imbriqués (par exemple, la structure spatiale des établissements industriels et des logements) qui pourraient influencer sur le coût des contraintes imposées aux émissions pendant une durée allant de quelques années à plusieurs siècles.

Les modèles simplifient aussi le processus du progrès technologique. On suppose, dans ces modèles, que le rythme d'évolution des techniques est indépendant de l'ampleur de la lutte contre les émissions. Comme nous l'avons noté plus haut, si les contraintes imposées aux émissions donnent lieu à des innovations techniques, le niveau optimal de réduction des émissions peut être plus élevé qu'autrement. La notion de progrès techniques internes est importante et mérite davantage d'attention qu'on ne lui en a accordé. Il est à noter, cependant, que l'ampleur des effets est loin d'être claire.

3.2.3 Autres considérations importantes

Le choix d'un objectif en matière de concentration et d'un itinéraire conduisant à la stabilisation est une décision très complexe. Il reste d'importantes incertitudes quant à la proportion du bilan du carbone qui mènera à la stabilisation. Comme nous l'avons noté dans la section 2.2.1.3, les modèles employés dans DRE GTI simplifient la représentation de la fixation du carbone par la biosphère et les océans et ne tiennent pas compte de l'influence de l'évolution du climat sur la vitesse de fixation du carbone par les terres et les mers. Comme les coûts d'atténuation dépendent de la différence entre des émissions correspondant à un objectif donné en matière de stabilisation et un certain scénario de référence, on risque, en ne tenant pas

compte des rétroactions écologiques ou marines, de fixer trop haut ou trop bas l'importance des émissions et les coûts d'atténuation correspondant à un niveau de stabilisation. Vu les incertitudes scientifiques concernant les modèles du carbone, l'incertitude due aux rétroactions océaniques et terrestres pourrait s'élever à ± 100 GtC ou davantage.

Dans la pratique, nous ne savons pas quel est le niveau de stabilisation approprié, ce qui rend encore plus complexe la stratégie à adopter. Une politique plus vigoureuse de recherche-développement, qui est relativement bon marché par rapport au coût éventuel d'une réduction rapide des émissions, semble constituer un bon investissement dans un grand nombre de cas. En outre, une atténuation précoce, surtout au moment de nouveaux investissements, réduit le risque de dépenses potentiellement très élevées si nous constatons que nous devons abaisser notre objectif en matière de stabilisation par rapport aux prévisions initiales. Une plus vaste mise en œuvre de mesures sans regrets et à bas prix permettrait non seulement de réduire les incidences, mais aussi de préparer les économies à la stabilisation.

3.3 Intégration de l'information sur les incidences et sur les coûts de l'atténuation

3.3.1 Introduction

Equilibrer les coûts, les incidences et les risques d'une stabilisation à divers niveaux en passant par divers itinéraires est une tâche extrêmement complexe qui, en dernier ressort, doit donner lieu à certains jugements politiques quant au niveau de risque acceptable, aux divers types de risques et à l'importance à accorder à diverses incidences (de l'atténuation et de l'évolution du climat) sur diverses populations, dans des pays variés et à des moments différents.

Comme nous l'avons noté plus haut, une politique sensée exige des décideurs qu'ils envisagent le coût et d'autres incidences de mesures concernant l'évolution du climat et qu'ils déterminent jusqu'à quel point de telles mesures peuvent réduire les conséquences néfastes de cette évolution sur le plan mondial. Dans la section 3.1, nous avons abordé la question des incidences et de la façon de les réduire en définissant un objectif plus bas en matière de stabilisation. Dans la section 3.2, nous avons abordé le coût d'une limitation des émissions anthropiques de CO₂ visant à atteindre une concentration stable de ce gaz dans l'atmosphère. Nous abordons ici les aperçus possibles que donne l'intégration de ces informations ainsi que d'autres contenues dans le présent document.

3.3.2 Nécessité de la cohérence et d'une vaste perspective

Il est important de tenir compte de façon cohérente des questions traitées dans les sections 3.1 et 3.2 lorsqu'on aborde les coûts de l'atténuation et ses incidences sur le climat. Voici quelques exemples.

Inertie — L'inertie du système climatique implique que les émissions actuelles sont susceptibles d'avoir des incidences pendant de nombreuses années ou même pendant plusieurs siècles dans le cas de l'élévation du niveau de la mer. Les gaz à effet de serre ayant une longue durée de vie dans l'atmosphère, même des mesures draconiennes en matière d'émissions n'influeraient que très lentement sur les concentrations. L'inertie des immobilisations actuelles émettrices de gaz à effet de serre implique aussi qu'il reviendrait très cher de réduire les émissions rapidement. Ces deux types d'inerties montrent la nécessité d'une réflexion, d'une analyse et d'une action prospectives concernant les trajectoires à emprunter pour atteindre des objectifs à long terme tout en minimisant les chocs subis par le système.

Les progrès techniques et d'autres formes d'innovation et d'adaptation se répercutent sur le coût de l'atténuation et sur les incidences. La recherche-développement visant l'atténuation et l'adaptation peut être très bénéfique. Le report des mesures d'atténuation laisse davantage de temps pour le développement de techniques moins chères d'atténuation, mais moins de temps pour l'adaptation aux incidences correspondantes.

Les préférences en matière de délais constituent un autre facteur important. Étant donné le temps qui s'écoule entre les émissions et leurs incidences, un taux d'actualisation positif a tendance à réduire l'importance actuelle des incidences par rapport aux coûts de l'atténuation, donc à favoriser une réduction globale des mesures d'atténuation.

Imprévus concernant le climat — L'évolution du climat pourrait conduire à des résultats étonnants : certains seuils des systèmes physiques, biologiques ou socio-économiques pourraient être franchis. En ne prenant pas de mesures précoces, on rendrait plus difficile la gestion de tels événements.

Incidences extérieures non climatiques — Nous devons également considérer la synergie existant entre les stratégies de réduction des gaz à effet de serre et l'atténuation d'autres effets externes sur l'environnement, tels que pollution locale de l'air, encombrements urbains et dégradation des terres et des ressources naturelles. On peut aller jusqu'à l'ensemble des possibilités d'atténuation pouvant être considérées comme des mesures sans regrets ou comme des mesures impliquant de faibles coûts nets.

Autres gaz à effet de serre et autres sources — Dans une analyse intégrée, on doit également tenir compte de gaz à effet de serre autres que le CO₂ qui émanent des combustibles fossiles.

- a) Le déboisement peut représenter jusqu'à 20 % des émissions actuelles dues à des combustibles fossiles (bien qu'il soit prévu que ce pourcentage baisse), alors que le reboisement pourrait contribuer sensiblement à l'absorption du CO₂.

GAMME DE MESURES

“.. Les décideurs pourraient envisager [...] une série de mesures peu coûteuses et/ou rentables [...] ”

(Source: DRE GTIII : Résumé à l'intention des décideurs.)

- Mesures favorisant le rendement énergétique, et notamment l'élimination des obstacles institutionnels qui freinent les progrès dans ce domaine.
- Suppression des pratiques actuelles génératrices de distorsions et qui entraînent une augmentation des émissions de gaz à effet de serre, comme certaines subventions et certains règlements, le non-acquittement des coûts pour l'environnement par les intéressés eux-mêmes et les distorsions dans le prix des transports.
- Remplacement de combustibles à teneur élevée en carbone par des combustibles à faible teneur en carbone ou par des sources d'énergie non basées sur le carbone telles que les ressources renouvelables.
- Activation des puits ou des réservoirs de gaz à effet de serre, par exemple en améliorant la gestion des forêts et les pratiques en matière d'utilisation des sols.
- Adoption de mesures et mise au point de nouvelles techniques visant à réduire les émissions de méthane, d'hémioxyde d'azote et d'autres gaz entraînant un effet de serre.
- Incitation à diverses formes de coopération internationale en vue de limiter les émissions de gaz à effet de serre, par exemple en coordonnant la mise en place de taxes sur le carbone et l'énergie, en lançant des activités communes et en fixant des contingents d'émissions négociables.
- Incitation à la définition et à l'application de normes nationales et internationales en matière de rendement énergétique.
- Elaboration et mise en place de mesures d'adaptation aux conséquences de l'évolution du climat.
- Lancement de programmes de recherche visant à mieux comprendre les origines et les répercussions de l'évolution du climat et à y adapter la société.
- Lancement de programmes de recherche technique visant à réduire au minimum les émissions de gaz à effet de serre dues à l'emploi de combustibles fossiles et à développer des ressources énergétiques commerciales non fossiles.
- Amélioration de mécanismes institutionnels tels que les dispositions en matière d'assurances, en vue de répartir les risques de dommages dus à l'évolution du climat.
- Incitation à des mesures volontaires pour réduire les émissions de gaz entraînant un effet de serre.
- Mise en œuvre de programmes de sensibilisation et de formation ainsi que de services consultatifs et d'information sur le développement durable et les modes de consommation permettant d'atténuer l'évolution du climat et d'y adapter la société.

- b) Les analyses indiquent que le méthane, en particulier, pourrait être un gaz à effet de serre important pour lequel il pourrait exister certaines possibilités peu onéreuses d'atténuation.
- c) Il faut également considérer l'hémioxyde d'azote et les hydrocarbures halogénés, vu notamment la très longue durée de vie de ces gaz.

Comme ces questions sont toutes très complexes — pour ce qui est notamment des incidences et des nombreuses incertitudes attachées à leur quantification —, l'économie seule ne peut pas fournir de réponses complètes à la question de l'équilibre voulu des itinéraires des émissions. Pour ces mêmes motifs et pour d'autres raisons, il n'est pas non plus possible de quantifier clairement les niveaux de stabilisation “optimaux”.

3.3.3 Gamme optimale de mesures

Il existe de nombreuses mesures de principe qui permettent de réduire les risques que l'évolution du climat fait peser sur les générations à venir : a) réduction des émissions pour ralentir les changements climatiques; b) recherche-développement sur de nouvelles techniques d'approvisionnement et de conservation susceptibles d'abaisser les futurs coûts de réduction; c) poursuite des recherches visant à réduire certaines incertitudes scientifiques critiques; d) investissement dans des mesures qui favorisent l'adaptation de l'homme et des écosystèmes à l'évolution du climat. Il s'agit non pas d'énoncer un choix entre deux solutions mais de trouver la combinaison (ou gamme) voulue de mesures. En un instant donné, les décideurs doivent décider des efforts et des crédits à consacrer à l'atténuation, à la recherche-développement d'Etat, aux incitations

du marché en faveur du développement des techniques, à la réduction des incertitudes concernant le climat et à l'adaptation à l'évolution du climat. Ces possibilités et d'autres, énoncées dans DRE GTIII, sont résumées dans l'encadré de la page 40.

Pour choisir la gamme optimale de mesures, il faut comprendre l'interaction des diverses possibilités. Le rapport entre les investissements dans la recherche-développement et les coûts de l'atténuation est particulièrement important. En général, ces investissements réduisent les futurs coûts de l'atténuation. Selon un exemple donné dans DRE GTIII, un appel massif à des solutions économiquement concurrentielles de remplacement des combustibles fossiles pourrait réduire les coûts de l'atténuation de deux tiers environ en cas de réduction de 20 % des émissions de CO₂ (par rapport au niveau de 1990). Une telle économie permettrait de libérer les ressources nécessaires pour lutter contre l'évolution du climat ou pour subvenir à d'autres besoins de la société. Inversement, tous les scénarios IS92 supposent des progrès techniques du côté de l'offre comme du côté de la demande du système énergétique. Ces progrès ne se produiront que s'il existe de vastes programmes de recherche-développement dans divers domaines, tant dans le secteur public que dans le secteur privé.

La réduction des incertitudes scientifiques entraîne la réduction des coûts. Pour l'instant, la question de ce qui constitue une "perturbation anthropique dangereuse du système climatique" n'est pas résolue. Comme il coûte très cher de se tromper dans un sens comme dans l'autre, les informations sur l'évolution du climat auront sans doute une grande valeur. Les ouvrages consultés indiquent que les renseignements sur la sensibilité du climat aux gaz à effet de serre et aux aérosols, sur les incidences de l'évolution du climat et sur des variables telles que les facteurs de croissance économique et le rythme d'accroissement du rendement énergétique sont extrêmement précieux.

Il faut également faire appel à une gamme de mesures dans chaque catégorie considérée. Par exemple, les coûts d'atténuation pour certaines sources de gaz à effet de serre sont moins élevés que pour d'autres. Les auteurs de DRE GTIII supposent l'existence de nombreuses possibilités relativement économiques de lutter contre les sources industrielles de méthane et de composés halogénés, bien qu'il puisse être plus difficile de limiter les sources agricoles de CH₄ et de N₂O. Si l'on réduit les émissions en faisant appel aux solutions les moins onéreuses, on commence par réduire le coût total de l'atténuation. Le potentiel de réduction des émissions de CO₂ en ralentissant le déboisement et d'absorption de ce gaz en reboisant pourrait aussi offrir des possibilités d'abaisser le coût de réduction de la concentration de CO₂.

La gamme appropriée de mesures de principe varie selon les pays. Chaque pays va définir une gamme de mesures correspondant à ses objectifs et à ses contraintes propres. Chaque pays va analyser les incidences de la gamme envisagée sur divers groupes économiques, sur la compétitivité internationale, sur

l'équité internationale et sur l'équité intergénérationnelle. Il existe néanmoins une nécessité de coordination entre les pays. Divers chercheurs, comparant le coût d'une action unilatérale et de la coopération internationale, ont constaté que cette dernière aurait d'importants avantages économiques.

3.3.4 *Prise de décisions successives*

Trop souvent, on parle soit "d'agir tout de suite" soit "d'attendre et de voir" en matière climatique. Cette façon de formuler le problème décisionnel est incorrecte et risque d'être trompeuse, car elle brouille les choix à évaluer et leur interaction dans le temps. Du fait que l'évolution du climat et l'acquisition de nouvelles connaissances sont des processus permanents, les mesures relatives aux changements climatiques devraient être constamment revues à la lumière de nouvelles informations.

L'aspect dynamique du processus décisionnel est reconnu dans la CCNUCC. Ses rédacteurs ont considéré la politique climatique comme un processus continu et non comme un événement unique. La Convention-cadre exige des examens périodiques "à la lumière des données scientifiques et évaluations les plus sûres concernant les changements climatiques et leur impact, ainsi que des données techniques, sociales et économiques pertinentes". Il conviendra de prendre des mesures appropriées fondées sur ces examens et notamment d'apporter des modifications aux engagements actuels.

Un tel processus séquentiel de prise de décisions vise à identifier des stratégies à court terme face à une incertitude à long terme. Les décennies à venir vont nous offrir de nombreuses occasions d'apprendre et d'apporter des corrections à mi-parcours. La question à poser est non pas "quel est le meilleur cours à suivre pendant les 100 prochaines années" mais "quel est le meilleur cours à suivre pendant dix ans en fonction d'un objectif à long terme". Ainsi, il s'agit de choisir soigneusement une gamme de mesures pour faire face à l'évolution du climat et de corriger ultérieurement ces mesures à la lumière de nouvelles informations.

Pour mettre en place une gamme de mesures permettant de faire face à l'évolution du climat, les gouvernements devront décider de l'importance des ressources à consacrer à ces mesures et de la combinaison de mesures qui, selon eux, seront les plus efficaces. En ce qui concerne l'importance des ressources, la question est de savoir jusqu'où aller au-delà de mesures strictement sans regrets. Comme l'ont noté les auteurs de DRE GTIII, "le risque global net de dommages imputables à l'évolution du climat, la prise en compte de l'aversion pour le risque et l'application du principe de précaution justifient l'adoption" de mesures allant au-delà d'une politique sans regrets. La décision quant à l'envergure des mesures à prendre dépend des "enjeux", des "chances" et du coût de ces mesures. Le montant qu'une société est prête à payer pour réduire un risque relève en dernière analyse d'une décision politique propre à chaque pays.

RÉFÉRENCES

- Dai, A. et I. Y. Fung, 1993 : Can climate variability contribute to the “missing” CO₂ sink? *Global Biogeochemical Cycles*, 7, 599-609.
- de Wolde, J. R., R. Bintanja et J. Oerlemans, 1995 : On thermal expansion over the last 100 years. *Journal of Climate*, 8, 2881-2891.
- Enting, I. G., T. M. L. Wigley et M. Heimann, 1994 : Future emissions and concentrations of carbon dioxide: Key ocean/atmosphere/land analyses. CSIRO Division of Atmospheric Research Technical Paper No. 31.
- IIASA/WEC (International Institute for Applied Systems Analysis/World Energy Council), 1995 : *Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond*, World Energy Council, Londres.
- IPCC, 1990 : *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*, J. T. Houghton, G. J. Jenkins et J. J. Ephraums (eds). Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
- IPCC, 1995 : *Climate Change 1994 Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*. J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, J. Bruce, H. Lee, B. A. Callander, E. Haites, N. Harris et K. Maskell (eds). Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni. 339 pp.
- IPCC WGI, 1996 : *Climate Change 1995 — the Science of Climate Change. Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg et K. Maskell (eds). Cambridge University Press, Royaume-Uni. 572 pp.
- IPCC WGII, 1996 : *Climate Change 1995 — Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of WGII to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. R. T. Watson, M. C. Zinyowera et R. H. Moss (eds). Cambridge University Press, Royaume-Uni. 878 pp.
- IPCC WGIII, 1996 : *Climate Change 1995 — Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of WGIII to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J. Bruce, H. Lee et E. Haites (eds). Cambridge University Press, Royaume-Uni. 448 pp.
- IPCC, 1997 : *Techniques, politiques et mesures d'atténuation des changements climatiques*. R. Acosta Moreno, R. Baron, P. Bohn, W. Chandler, V. Cole, O. Davidson, G. Dutt, E. Haites, H. Ishitani, D. Krugar, M. Levine, L. Zhong, L. Michaelis, W. Moomaw, J.R. Moreira, A. Mosier, R. Moss, N. Nakicenovic, L. Price, N. H. Ravindranath, H. H. Rogner, J. Sathaye, P. Shukla, L. Van Wie McGrory, T. Williams. Document technique I GIEC, Genève, Suisse.
- IPCC, 1997 : *Introduction aux modèles simples employés dans le Deuxième rapport d'évaluation du GIEC*. L. D. Harvey, J. Gregory, M. Hoffert, A. Jain, M. Lal, R. Leemans, S. Raper, T. Wigley et J. de Wolde. Document technique II du GIEC, Genève, Suisse.
- Keeling, C. D., T. P. Whorf, M. Wahlen et J. van der Plicht, 1995 : Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375, 666-670.
- Kosobud, R., T. Daly, D. South et K. Quinn, 1994 : Tradable cumulative CO₂ permits and global warming control. *The Energy Journal*, 15, 213-232.
- Manabe, S. et R. J. Stouffer, 1994 : Multiple century response of a coupled ocean-atmosphere model to an increase of atmospheric carbon dioxide. *Journal of Climate*, 7, 5-23.
- Manne, A. et R. Richels, 1995 : *The Greenhouse Debate—Economic Efficiency, Burden Sharing and Hedging Strategies*. Working Paper, Stanford University.
- Mitchell, J. F. B., T. C. Johns, J. M. Gregory et S. F. B. Tett, 1995 : Transient climate response to increasing sulphate aerosols and greenhouse gases. *Nature*, 376, 501-504.
- Nordhaus, W. D., 1979 : *The Efficient Use of Energy Resources*. Yale University Press, New Haven, CT.
- Penner, J. E., R. J. Charlson, J. M. Hales, N. S. Laulainen, R. Leifer, T. Novakov, J. Ogren, L. F. Radke, S. E. Schwartz et L. Travis, 1994 : Quantifying and minimizing uncertainty of climate forcing by anthropogenic aerosols. *Bull. Am. Met. Soc.*, 75, 375-400.
- Raper, S.C.B., T.M.L. Wigley et R.A. Warrick, 1996 : Global sea level rise: past and future. In: *Sea level Rise and Coastal Subsidence: Causes, Consequences and Strategies*, J. D. Milliman and B. U. Haq (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas, pp. 11-45.
- Richels, R. et J. Edmonds, 1995 : The economics of stabilizing atmospheric CO₂ concentrations. *Energy Policy*, 23, 373-379.
- Smith, T. M. et H. H. Shugart, 1993 : The transient response of terrestrial carbon storage to a perturbed climate. *Nature*, 361, 523-526.
- Townsend, A. R., P. M. Vitousek et E. A. Holland, 1992 : Tropical soils could dominate the short-term carbon cycle feed-

backs to increased global temperatures. *Climatic Change*, 22, 293-303.

United Nations, 1992 : *Earth Summit Convention on Climate Change*, 3-14 juin 1992. United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, Brésil, 21.

VEMAP Participants, 1995 : Vegetation/Ecosystem modelling and analysis project (VEMAP): Comparing biogeography and biogeochemistry models in a continental-scale study of terres-

trial ecosystem responses to climate change and CO₂ doubling. *Global Biogeochemical Cycles*, 9, 407-438.

Wigley, T.M.L. et S.C.B. Raper, 1992 : Implications for climate and sea level of revised IPCC emissions scenarios. *Nature*, 357, 293-300.

Wigley, T. M. L., R. Richels et J. A. Edmonds, 1996 : Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations. *Nature*, 379, 242-245.

Appendice 1

Incidences de la stabilisation de la concentration de CO₂ sur la température et le niveau de la mer de 1990 à 2300

La section 2.3 traite des incidences de la stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre sur la température et le niveau de la mer en mettant l'accent sur la période 1990-2100. Pour obtenir une perspective à plus long terme, les résultats

relatifs à la température et au niveau de la mer présentés dans les figures 11 à 15 (et analysés dans la section 2.3) sont repris dans le présent appendice après extrapolation jusqu'en 2300 (figures A1 à A5).

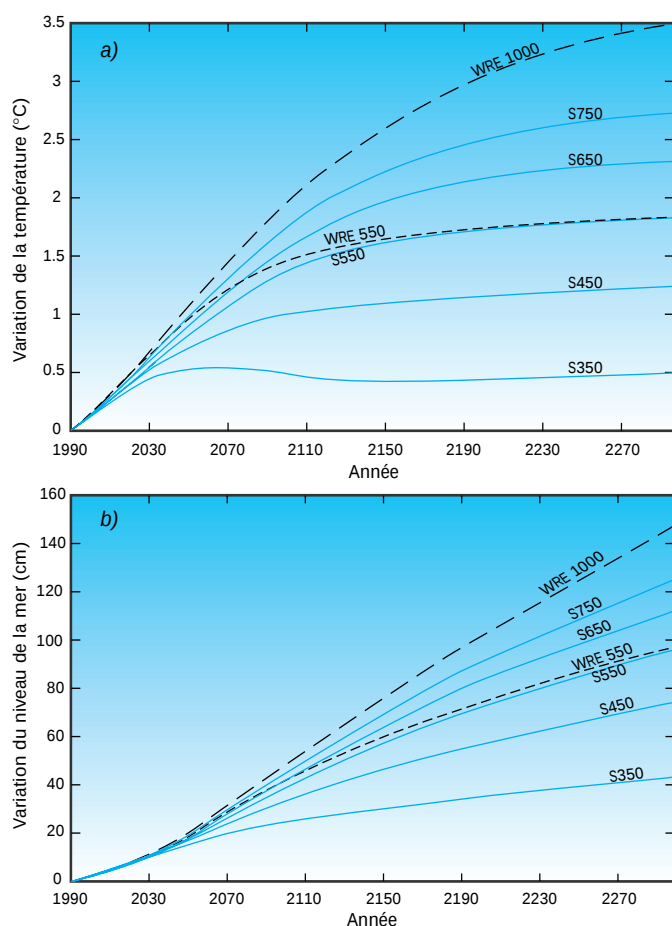


Figure A1. a) Température projetée en moyenne mondiale lorsque la concentration de CO₂ se stabilise selon les profils S et les profils WRE550 et 1000 indiqués à la figure 4. On suppose que les émissions de CH₄, de N₂O et de SO₂ restent à leur niveau de 1990 et que les émissions d'hydrocarbures halogénés évoluent conformément au Protocole de Montréal ("cas de référence") jusqu'en 2100, puis se stabilisent. b) Comme en a), sauf en ce qui concerne la variation du niveau de la mer à l'échelle du globe et les valeurs centrales des paramètres relatifs à la fonte des glaces. Tous les résultats ont été obtenus à l'aide du modèle de Wigley, qui simule de façon simple l'incidence du climat sur le niveau de la mer (voir document technique II du GIEC). On se reportera à la figure 11 pour les résultats concernant la période 1990-2100.

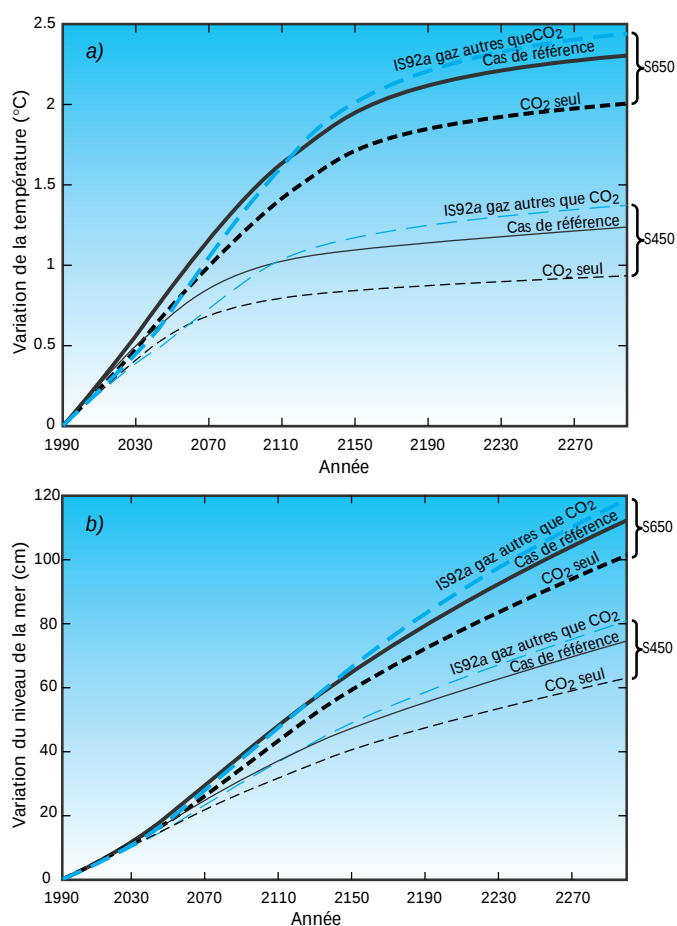


Figure A2. a) Incidence des différents profils d'émission de gaz à effet de serre autres que le CO₂ sur les variations de température à l'échelle du globe pour les profils S450 et S650 (voir figure 2). Les traits pleins correspondent aux résultats "de référence", les tirets courts au CO₂ seul et les tirets longs à la situation où les émissions de CH₄, de N₂O et de SO₂ augmentent jusqu'en 2100 selon le scénario IS92a avant de se stabiliser ("cas IS92a"). On suppose que la sensibilité du climat atteint la valeur moyenne de 2,5 °C. b) Comme en a), sauf en ce qui concerne la variation du niveau de la mer à l'échelle du globe. On a retenu les valeurs centrales des paramètres relatifs à la fonte des glaces. On se reportera à la figure 12 pour les résultats concernant la période 1990-2100.

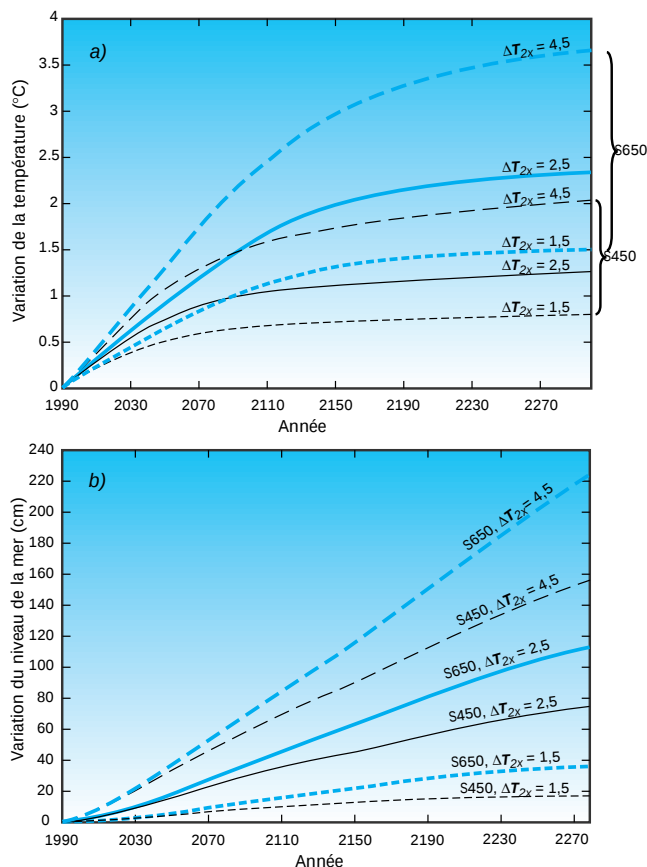


Figure A3. a) Incidence des incertitudes concernant la sensibilité du climat sur la température en moyenne mondiale dans le cas des profils S450 et S650 pour le CO_2 et dans le cas de référence pour les gaz à effet de serre autres que le CO_2 . La sensibilité du climat (ΔT_{2x}) varie de 1,5 à 4,5 °C, avec une valeur moyenne de 2,5 °C. b) Comme en a) sauf en ce qui concerne la variation du niveau de la mer à l'échelle du globe. Les valeurs basse, moyenne et élevée de la sensibilité du climat sont associées respectivement aux valeurs basse, moyenne et élevée des paramètres relatifs à la fonte des glaces. On se reportera à la figure 13 pour les résultats concernant la période 1990-2100.

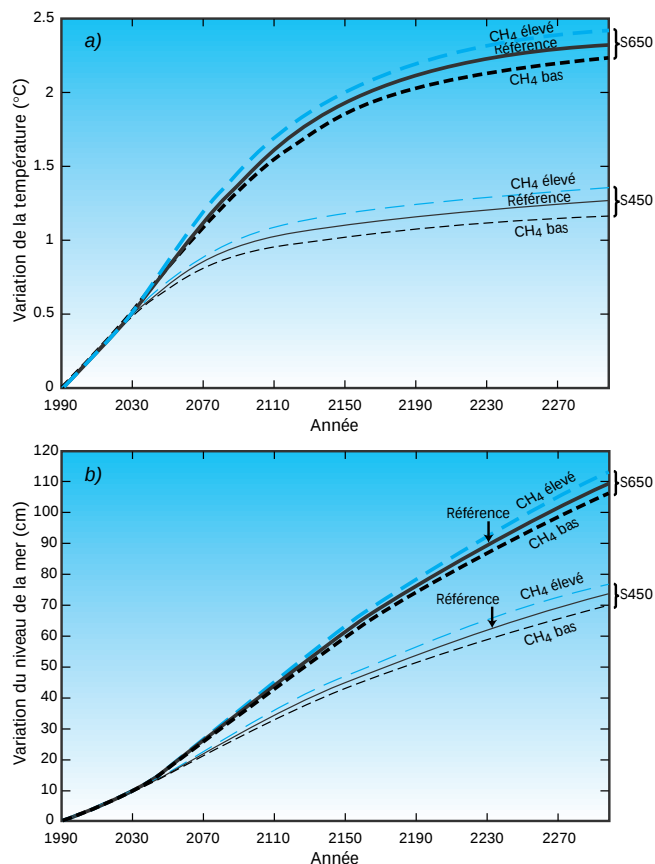


Figure A4. a) Sensibilité de la variation de la température moyenne mondiale aux émissions de CH_4 pour les profils S450 et S650 (voir figure 4). Les traits pleins représentent les résultats "de référence" et les courbes " CH_4 bas/élevé" correspondent respectivement à une diminution et à une augmentation linéaires de 100 Tg(CH_4) des émissions annuelles de CH_4 pendant la période 1990-2100, puis à leur stabilisation (voir tableau 4). b) Comme en a), sauf en ce qui concerne la variation du niveau de la mer à l'échelle du globe. On a retenu les valeurs centrales des paramètres relatifs à la fonte des glaces. On se reportera à la figure 14 pour les résultats concernant la période 1990-2100.

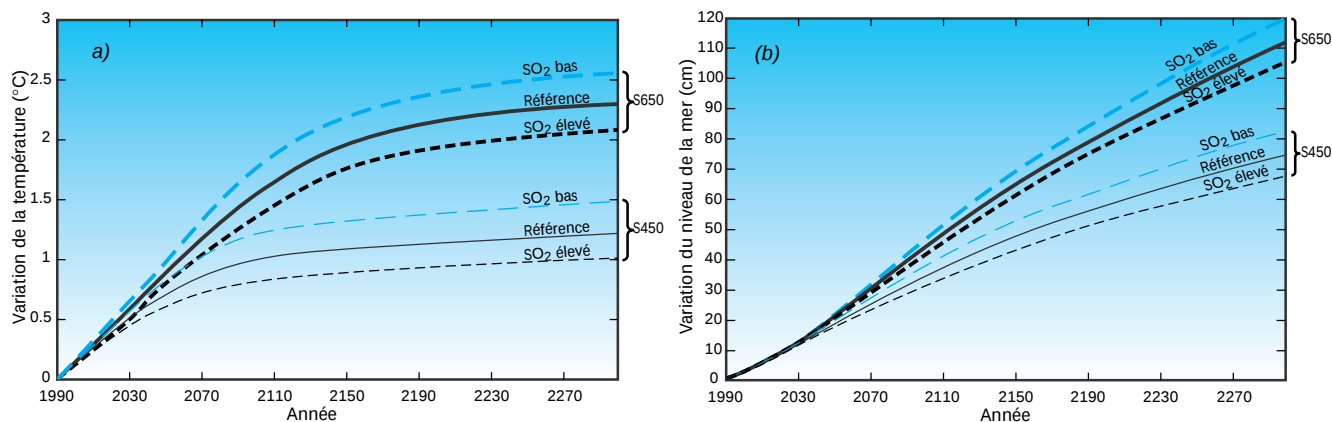


Figure A5. a) Sensibilité de la variation de la température moyenne mondiale aux émissions de SO_2 pour les profils S450 et S650 (voir figure 4). Les traits pleins représentent les cas de référence, les tirets courts (" SO_2 élevé") les cas où les émissions augmentent de façon linéaire de 75 TgS/an en 1990 à 112,5 TgS/an en 2100 avant de se stabiliser et les tirets longs (" SO_2 bas") les cas où les émissions diminuent de façon linéaire de 75 TgS/an en 1990 à 37,5 TgS/an en 2100 avant de se stabiliser. b) Comme en a), sauf en ce qui concerne la variation du niveau de la mer à l'échelle du globe. On a retenu les valeurs centrales des paramètres relatifs à la fonte des glaces. Voir figure 15 pour les résultats de 1990-2100.

Appendice 2

GLOSSAIRE

Aérosols

Particules en suspension dans l'air. Le terme est également associé à tort aux propulseurs employés dans les “bombes aérosols”.

Aérosols carbonés

Aérosols [voir ce terme] contenant du carbone.

Ajustement des flux

Pour éviter qu'un modèle couplé atmosphère-océan de la circulation générale n'indique des conditions climatiques irréalistes (par exemple des températures excessivement élevées dans la partie tropicale de l'océan Pacifique), on peut appliquer des termes d'ajustement aux flux de chaleur et de précipitation (et parfois aux tensions de surface résultant de l'effet du vent sur la surface des océans) avant de les introduire dans le modèle océanique. C'est ce qu'on appelle l'ajustement des flux.

Amortissement radiatif

Un forçage radiatif [voir ce terme] imposé au système Terre-atmosphère (par exemple par ajout de gaz à effet de serre) correspond à un excédent d'énergie. La température de la surface et de la basse atmosphère augmente alors, ce qui entraîne l'accroissement de la quantité de rayonnement infrarouge émis vers l'espace, d'où obtention d'un nouveau bilan énergétique. L'augmentation du rayonnement infrarouge émis vers l'espace pour une élévation donnée de la température s'appelle amortissement radiatif.

Amplitude diurne de la température

Différence entre les températures maximale et minimale sur une période de 24 heures.

Biomasse

Poids ou volume total des organismes présents dans une aire ou un volume donné.

Biome

Communauté naturelle de végétaux et d'animaux (ou région occupée par cette communauté) adaptée aux conditions particulières dans lesquelles elle évolue (par exemple la toundra).

Biosphère marine

Terme désignant l'ensemble des organismes marins vivants.

Biosphère terrestre

Terme collectif désignant tous les organismes terrestres vivants.

Changements climatiques (selon la CCCC)

Changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables.

Changements climatiques (selon le GIEC)

Les changements climatiques signalés dans les relevés climatologiques sont attribuables aux variations internes du système climatique ou des interactions entre ses composantes, ou aux modifications du forçage externe d'origine naturelle ou anthropique. Il n'est généralement pas possible d'établir clairement les causes. Dans les projections qu'il établit sur l'évolution du climat, le GIEC ne tient généralement compte que de l'influence sur le climat de l'augmentation des gaz à effet de serre imputable aux activités humaines et d'autres facteurs liés à l'homme.

Circulation thermohaline

Dans les océans, circulation à grande échelle régie par la densité et dépendant de différences de température et de salinité.

Climat

Le climat désigne généralement le “temps moyen”; il s'agit plus précisément d'une description statistique du temps en termes de moyennes et de variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes de plusieurs décennies (trois décennies en principe, d'après la définition de l'OMM). Ce sont le plus souvent des variables de surface – température, précipitations et vent, par exemple – mais au sens large le “climat” est la description de l'état du système climatique.

Composés organiques volatils (COV)

Composés organiques libérés dans l'atmosphère par des plantes ou par vaporisation de produits du pétrole. Ces composés, qui sont chimiquement réactifs, participent à la chimie de la production d'ozone dans la troposphère. Le méthane, bien que répondant strictement à la définition d'un COV, est généralement considéré à part.

Coût marginal

Coût d'une unité supplémentaire d'effort. Pour ce qui est de la réduction des émissions, indique à combien il revient de réduire les émissions d'une unité supplémentaire.

Cryosphère

Masses totales de neige, de glace et de pergélisol dans le monde.

Cycle du carbone

Expression employée pour désigner l'échange de carbone (sous diverses formes, par exemple sous forme de dioxyde de carbone) entre l'atmosphère, les océans, la biosphère terrestre et les dépôts géologiques.

Dépôts humides/secs

Élimination d'une substance de l'atmosphère soit par lavage par les précipitations (dépôt humide) soit par dépôt direct sur une surface (dépôt sec).

Développement durable

Développement répondant aux besoins actuels sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins.

Dommages hors marché

Dommages imputables à l'évolution du climat (ou à d'autres modifications de l'environnement) ne pouvant être évalués sur un marché concurrentiel en raison de l'insuffisance des renseignements et/ou de l'impossibilité d'agir sur la base de ces renseignements.

Dommages sur le marché

Montant des dommages imputables à l'évolution du climat (ou à d'autres modifications de l'environnement) évalué à partir des renseignements disponibles sur un marché concurrentiel et exploitables par celui-ci.

Durée de renouvellement

Rapport entre la masse d'un réservoir (par exemple la masse de N_2O dans l'atmosphère) et le taux d'élimination de ce réservoir (pour le N_2O , par exemple, vitesse de destruction par la lumière solaire dans la stratosphère [voir ce terme]).

Durée de vie

En général ce terme désigne le temps qu'un atome ou une molécule passe en moyenne dans un milieu donné – l'atmosphère ou les océans, par exemple. A ne pas confondre avec le temps de réponse dans le cas d'une perturbation de la concentration. Le CO_2 n'a pas une durée de vie unique.

Echelles spatiales

Echelle continentale : de 10 000 000 à 100 000 000 km².

Echelle régionale : de 100 000 à 10 000 000 km².

Echelle locale : moins de 100 000 km².

Effets externes (externalités)

Effets dus à l'évolution du climat (ou à d'autres changements environnementaux), qui ne peuvent pas être évalués sur un marché concurrentiel en raison d'une information insuffisante et/ou de l'impossibilité de tenir compte de cette information.

Equivalent CO_2

Concentration de CO_2 qui entraînerait un forçage radiatif de même importance que le mélange considéré de CO_2 et d'autres gaz à effet de serre.

Évaluation globale

Méthode d'analyse qui combine de manière cohérente les résultats et les modèles émanant des sciences physiques, biologiques, économiques et sociales, ainsi que les interactions entre celles-ci, en vue de prévoir les conséquences des changements climatiques et d'envisager l'action à engager pour y faire face.

Fertilisation par l'azote

Stimulation de la croissance des plantes par dépôt de composés azotés. Dans les rapports du GIEC, cette expression désigne plus précisément la fertilisation due à des sources anthropiques d'azote telles qu'engrais artificiels et oxydes d'azote dégagés par la combustion de combustibles fossiles.

Fertilisation par le CO_2

Stimulation de la croissance des plantes due à une forte concentration de CO_2 dans l'atmosphère.

Fonction de dommage

Relation entre l'évolution du climat et la réduction de l'activité économique par rapport à ce qui serait possible si le climat n'évoluait pas.

Fonction du coût marginal d'atténuation

Rapport entre la quantité totale d'émissions réduites et le coût marginal de la dernière unité réduite. En général, le coût marginal d'atténuation augmente en fonction de la quantité totale d'émissions réduites.

Forçage radiatif

Mesure simple de l'importance d'un mécanisme pouvant conduire à un changement climatique. Le forçage radiatif est la perturbation du bilan énergétique du système Terre-atmosphère (en $W\ m^{-2}$) à la suite, par exemple, d'une modification de la concentration de dioxyde de carbone ou d'une variation du débit solaire. Le système climatique réagit au forçage radiatif de façon à rétablir l'équilibre énergétique. Un forçage radiatif positif a tendance à réchauffer la surface du globe tandis qu'un forçage radiatif négatif a tendance à la refroidir. Le forçage radiatif est généralement exprimé à l'aide d'une valeur annuelle moyennée à l'échelle du globe. Dans les rapports du GIEC, le forçage radiatif est défini de façon plus précise : il s'agit de la perturbation subie par le bilan énergétique du système surface-troposphère une fois que la stratosphère a retrouvé un état d'équilibre radiatif moyen mondial (voir le chapitre 4 de GIEC (1994)). On parle parfois de "forçage climatique".

Gamme de mesures

Ensemble de solutions qui s'offrent aux décideurs pour réduire les émissions ou s'adapter aux changements climatiques.

Gaz à effet de serre

Gaz qui, pour certaines longueurs d'onde données du spectre énergétique, absorbe le rayonnement (rayonnement infrarouge) émis par la surface de la Terre et par les nuages. Le gaz considéré émet à son tour un rayonnement infrarouge à un niveau où la température est plus faible que la température de surface.

L'effet net est la rétention locale d'une partie de l'énergie absorbée et une tendance au réchauffement de la surface de la Terre. La vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), l'hémioxyde d'azote (N_2O), le méthane (CH_4) et l'ozone (O_3) sont les principaux gaz à effet de serre qu'on trouve dans l'atmosphère terrestre.

Humidité du sol

Eau emmagasinée à la surface ou sous la surface des continents et susceptible de s'évaporer. Dans GIEC (1990), on a généralement considéré un seul "réservoir" pour les modèles climatiques. Dans les modèles actuels, qui tiennent compte des processus liés au sol et au couvert végétal, on considère l'humidité du sol comme la quantité d'eau retenue au-delà du "point de flétrissement" des plantes.

Hydrocarbures halogénés

Composé contenant du chlore, du brome ou du fluor ainsi que du carbone. Ces composés peuvent avoir l'action de gaz à effet de serre [voir ce terme] puissant dans l'atmosphère. Les hydrocarbures halogénés contenant du chlore et du brome participent également à l'appauvrissement de la couche d'ozone.

Luminosité solaire

Mesure de l'éclat du Soleil (c'est-à-dire de la quantité de rayonnement solaire [voir ce terme] émis par le Soleil).

Mélange turbulent

Mélange dû à des processus turbulents à petite échelle (tourbillons). Ces processus ne pouvant être représentés explicitement même par les modèles de la circulation générale atmosphère-océan les plus fins employés de nos jours, leurs effets doivent être rattachés aux conditions à plus grande échelle.

Mesures d'atténuation "sans regrets"

Les mesures d'atténuation "sans regrets" sont celles dont les avantages – réduction du coût de l'énergie et la diminution des émissions de polluants à l'échelle locale et régionale par exemple – sont égaux ou supérieurs à leur coût pour la société, quels que soient les avantages apportés par l'atténuation des incidences de l'évolution du climat. On les appelle parfois "mesures utiles en tout état de cause".

Niveau d'intervention optimal

Niveau d'intervention pour lequel la valeur nette actuelle du coût marginal de l'intervention est égale à la valeur nette actuelle des avantages marginaux de cette intervention.

Noyaux de condensation

Particules en suspension dans l'air servant de site initial pour la condensation de l'eau liquide et pouvant conduire à la formation de gouttelettes nuageuses.

Paramétrage

En modélisation climatique, terme qui désigne la technique permettant de représenter les processus qui ne peuvent être traduits explicitement à l'échelle du modèle (processus

d'échelle inférieure à la maille), en établissant des relations entre les effets de ces processus moyennés sur une zone et la circulation à plus grande échelle.

Photosynthèse

Processus métabolique selon lequel les plantes absorbent le dioxyde de carbone de l'air (ou de l'eau) pour créer de la matière végétale et rejettent de l'oxygène.

PIB

Produit intérieur brut. Valeur de tous les biens et services produits (ou consommés) à l'intérieur d'un pays.

Principe de précaution

Principe selon lequel on évite une solution irréversible en raison du fait qu'elle repose sur des hypothèses pouvant se révéler fausses, au profit d'une solution apparemment moins efficace mais réversible.

Rayonnement infrarouge

Rayonnement émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. Egalement appelé rayonnement terrestre et rayonnement de grandes longueurs d'onde. Le rayonnement infrarouge a un spectre (gamme de longueurs d'onde) distinct, déterminé par la température du système Terre-atmosphère. Ce spectre diffère de celui du rayonnement solaire (voir ce terme), ou rayonnement de courtes longueurs d'onde, en raison de la différence de température existant entre le Soleil et le système Terre-atmosphère.

Rayonnement solaire

Rayonnement émis par le Soleil. Egalement appelé rayonnement de courtes longueurs d'onde. Le rayonnement solaire possède un spectre (c'est-à-dire une gamme de longueurs d'onde) caractéristique, régi par la température du Soleil. Dans la pratique, le spectre du rayonnement solaire est distinct de celui du rayonnement infrarouge [voir ce terme] ou terrestre, en raison de la différence de température existant entre le Soleil et le système Terre-atmosphère.

Réaction à l'équilibre

Réaction, à l'état d'équilibre, du système climatique (ou d'un modèle de climat) à un forçage radiatif imposé.

Règle de la réfutabilité

La science reconnaît aujourd'hui qu'il n'existe aucun moyen de prouver le bien-fondé absolu d'une hypothèse ou d'un modèle, car il est toujours possible qu'une explication différente rende compte des mêmes observations. Dans ce sens, même les lois physiques les mieux établies sont "conditionnelles". Ainsi, les méthodes scientifiques ne permettent jamais de donner de preuves concluantes qu'une hypothèse est vérifiée. Elles permettent uniquement de prouver qu'une hypothèse n'est pas vérifiée.

Réponse climatique transitoire

Réponse échelonnée dans le temps du système climatique (ou d'un modèle climatique) à une évolution du forçage.

Réserves de combustibles fossiles

Quantité de combustibles fossiles dont l'existence est attestée par les données géologiques et les études réalisées sur le terrain et qu'il est possible de récupérer dans les conditions économiques actuelles et avec les moyens techniques dont nous disposons.

Respiration

Processus métabolique selon lequel les organismes satisfont leurs besoins en énergie interne et libèrent du CO₂.

Ressources en combustibles fossiles

Quantité de combustibles fossiles dont on présume l'existence et qui pourrait être récupérée selon un scénario explicite des conditions économiques et capacités d'exploitation futures.

Rétroaction

Il y a rétroaction lorsqu'une variable d'un système modifie une deuxième variable qui à son tour influe sur la première. Une rétroaction positive intensifie l'effet considéré alors qu'une rétroaction négative le réduit.

Scénarios LESS (Groupe de travail II)

Scénarios élaborés par le Groupe de travail II pour le deuxième Rapport d'évaluation destinés à évaluer les systèmes d'approvisionnement énergétique à faible taux d'émission de CO₂ sur le plan mondial. Ces scénarios sont baptisés LESS (Low-Emissions Supply System).

Sensibilité du climat

Dans les rapports du GIEC, cette expression désigne habituellement les variations à long terme (à l'équilibre) de la température moyenne mondiale en surface à la suite d'un doublement de la concentration de CO₂ (ou d'équivalent CO₂) dans l'atmosphère. De façon plus générale, elle désigne les variations à l'équilibre de la température de l'air en surface à la suite de la variation d'une unité de forçage radiatif (°C/W m⁻²).

Souplesse dans le temps et dans l'espace

Possibilité de choisir le moment ou l'endroit où une stratégie d'atténuation ou d'adaptation sera appliquée afin de réduire les coûts associés aux changements climatiques.

Spin-up

Le "Spin-up" est une technique employée pour initialiser un modèle couplé atmosphère-océan de la circulation générale

(MCGAO). Il est impossible actuellement de diagnostiquer de façon précise l'état du système couplé atmosphère-océan, donc de prescrire les conditions de départ observées pour une expérience réalisée avec un tel modèle. En effet, les éléments atmosphère et océan du modèle tournent séparément; on leur impose des conditions limites "observées", puis, parfois, une autre période de "spin-up" lorsque l'atmosphère et l'océan sont couplés, jusqu'à ce que le modèle ait quasiment retrouvé le point d'équilibre.

Stocks de capital

Ensemble de machines et de structures dont dispose une économie en un instant donné pour produire des biens ou assurer des services. Ces activités exigent habituellement une quantité d'énergie qui est largement déterminée par le taux d'utilisation de la machine ou de la structure considérée.

Stratosphère

Région stable et très stratifiée de l'atmosphère, située au-dessus de la troposphère [voir ce terme] et s'étendant environ de 10 à 50 km d'altitude.

Taux d'actualisation

Taux annuel auquel l'effet de futurs événements est réduit de façon qu'on puisse le comparer à l'effet d'événements actuels.

Thermocline

Zone des océans, située en général à une profondeur de 1 km, où la température décroît rapidement avec la profondeur et qui marque la limite entre les eaux de surface et les eaux profondes.

Tropopause

Limite entre la troposphère [voir ce terme] et la stratosphère [voir ce terme].

Troposphère

Partie inférieure de l'atmosphère, s'étendant de la surface de la Terre à 10 km d'altitude environ dans les latitudes moyennes (altitude variant en moyenne de 9 km aux latitudes élevées à 16 km aux latitudes tropicales), où l'on rencontre les nuages et où se produisent les phénomènes "météorologiques". La troposphère se définit comme étant la zone où la température décroît généralement avec l'altitude.

Appendice 3

ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

CFC	Chlorofluorocarbone
COV	Composé organique volatil
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GTI, II, III	Groupe de travail I, II, III du GIEC
HCFC	Hydrochlorofluorocarbone
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MCGA	Modèles tridimensionnels de la circulation générale de l'atmosphère
MCGAO	Modèle de la circulation générale atmosphère-océan
MCGO	Modèle de la circulation générale de l'océan
MCS	Modèle climatique simple

Symboles chimiques

Br	Brome
CFC-11	CCl_3F (trichlorofluorométhane)
CFC-12	CCl_2F_2 (dichlorodifluorométhane)
CH_4	Méthane
Cl	Chlore
CO	Oxyde de carbone
CO_2	Dioxyde de carbone
HCFC-134a	CH_2FCF_3
HCFC-22	CF_2HCl (chlorodifluorométhane)
N_2O	Oxyde nitreux
NO_x	Oxyde d'azote
O_3	Ozone
OH	Hydroxyle
S	Soufre
SO_2	Dioxyde de soufre
SO_4^{2-}	Ion de sulfate

Appendice 4

UNITÉS

Unités SI (Système International)

Quantité physique	Unité	Symbole
longueur	mètre	m
masse	kilogramme	kg
temps	seconde	s
température thermodynamique	kelvin	K
quantité de substance	mole	mol

Fraction	Préfixe	Symbole	Multiple	Préfixe	Symbole
10 ⁻¹	deci	d	10	deca	da
10 ⁻²	centi	c	10 ²	hecto	h
10 ⁻³	milli	m	10 ³	kilo	k
10 ⁻⁶	micro	μ	10 ⁶	mega	M
10 ⁻⁹	nano	n	10 ⁹	giga	G
10 ⁻¹²	pico	p	10 ¹²	tera	T
10 ⁻¹⁵	femto	f	10 ¹⁵	peta	P
10 ⁻¹⁸	atto	a			

Noms et symboles spéciaux de certaines unités SI dérivées

Quantité physique	Nom de l'unité SI	Symbole	Définition de l'unité
force	newton	N	kg m s ⁻²
pression	pascal	Pa	kg m ⁻¹ s ⁻² (=N m ⁻²)
énergie	joule	J	kg m ² s ⁻²
puissance	watt	W	kg m ² s ⁻³ (= Js ⁻¹)
fréquence	hertz	Hz	s ⁻¹ (cycles par seconde)

Fractions et multiples d'unités SI dotées de noms spéciaux

Quantité physique	Nom de l'unité	Symbole	Définition de l'unité
longueur	ångstrom	Å	10 ⁻¹⁰ m = 10 ⁻⁸ cm
longueur	micron	μm	10 ⁻⁶ m
surface	hectare	ha	10 ⁴ m ²
force	dyne	dyn	10 ⁵ N
pression	bar	bar	10 ⁵ N m ⁻² = 10 ⁵ Pa
pression	millibar	mb	10 ² N m ⁻² = 1 Pa
poids	ton	t	10 ³ kg

Unités

°C	degrés Celsius (0°C = 273 K environ) Les différences de températures sont aussi données en °C (=K) au lieu de la forme plus correcte en "degrés Celsius"	Les unités de masse adoptées dans ce rapport sont généralement celles utilisées couramment, elles n'ont volontairement pas été uniformisées, par exemple,
ppmv	parties par million (10 ⁶) en volume	kt kilotonnes
ppbv	parties par milliard (10 ⁹) en volume	GtC gigatonnes de carbone (1 GtC = 3.7 Gt dioxyde de carbone)
pptv	parties par billion (10 ¹²) en volume	PgC petagrammes de carbone (1PgC = 1 GtC)
bp	(années) antérieures à l'année actuelle	MtN megatonnes de nitrogène
kbp	milliers d'années antérieures à l'année actuelle	TgC teragrammes de carbone (1TgC = 1 MtC)
mbp	millions d'années antérieures à l'année actuelle	TgN teragrammes de nitrogène
		TgS teragrammes de soufre

Appendice 5

INSTITUTIONS AUXQUELLES APPARTIENNENT LES AUTEURS PRINCIPAUX

David Schimel	National Center for Atmospheric Research	Etats-Unis d'Amérique
Michael Grubb	Royal Institute of International Affairs	Royaume-Uni
Fortunat Joos	University of Bern	Suisse
Robert Kaufmann	Boston University	Etats-Unis d'Amérique
Richard H. Moss	IPCC WGII Technical Support Unit	Etats-Unis d'Amérique
Wandera Ogana	College of Biological and Physical Sciences	Kenya
Richard Richels	Electric Power Research Institute (EPRI)	Etats-Unis d'Amérique
Tom M. L. Wigley	National Center for Atmospheric Research	Etats-Unis d'Amérique

INSTITUTIONS AUXQUELLES APPARTIENNENT LES CONTRIBUTEURS

Michele Bruno	University of Bern	Suisse
Regina Cannon	National Center for Atmospheric Research	Etats-Unis d'Amérique
James Edmonds	Battelle Pacific Northwest Laboratories (DOE)	Etats-Unis d'Amérique
Erik F. Haites	IPCC WGIII, Technical Support Unit	Canada
L. D. Danny Harvey	University of Toronto	Canada
Martin Hoffert	New York University	Etats-Unis d'Amérique
Atul K. Jain	University of Illinois	Etats-Unis d'Amérique
Rik Leemans	RIVM	Pays-Bas
Kathleen A. Miller	National Center for Atmospheric Research	Etats-Unis d'Amérique
Robert Parkin	National Center for Atmospheric Research	Etats-Unis d'Amérique
Sarah C. B. Raper	Climatic Research Unit (UEA)	Royaume-Uni
Elizabeth Sulzman	National Center for Atmospheric Research	Etats-Unis d'Amérique
Richard van Tol	Free University, Institute of Environmental Studies	Pays-Bas
Jan de Wolde	University of Utrecht	Pays-Bas

INSTITUTIONS AUXQUELLES APPARTIENNENT LES AUTEURS DE MODÈLES

Michele Bruno	University of Bern	Suisse
Fortunat Joos	University of Bern	Suisse
Tom M. L. Wigley	National Center for Atmospheric Research	Etats-Unis d'Amérique

Liste des publications du GIEC

I. PREMIER RAPPORT D'ÉVALUATION DU GIEC, 1990

- a) **ASPECTS SCIENTIFIQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.** Rapport 1990 rédigé pour le GIEC par le Groupe de travail I (*en anglais, chinois, espagnol, français et russe*).
- b) **INCIDENCES POTENTIELLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.** Rapport 1990 rédigé pour le GIEC par le Groupe de travail II (*en anglais, chinois, espagnol, français et russe*).
- c) **STRATÉGIES D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE.** Rapport 1990 rédigé pour le GIEC par le Groupe de travail III (*en anglais, chinois, espagnol, français et russe*).
- d) **Overview and Policymaker Summaries, 1990.**

Emissions Scenarios (préparé par le Groupe de travail III du GIEC), 1990.

Assessment of the Vulnerability of Coastal Areas to Sea Level Rise — A Common Methodology, 1991.

II. SUPPLÉMENT DU GIEC, 1992

- a) **CLIMATE CHANGE 1992 — The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment.** The 1992 report of the IPCC Scientific Assessment Working Group.
- b) **CLIMATE CHANGE 1992 — The Supplementary Report to the IPCC Impacts Assessment.** The 1990 report of the IPCC Impacts Assessment Working Group.

CHANGEMENT CLIMATIQUE : Les évaluations du GIEC de 1990 et 1992 — Premier rapport d'évaluation du GIEC, Aperçu général et Résumés destinés aux décideurs, et Supplément 1992 du GIEC (*en anglais, chinois, espagnol, français et russe*).

Global Climate Change and the Rising Challenge of the Sea. Coastal Zone Management Subgroup of the IPCC Response Strategies Working Group, 1992.

Report of the IPCC Country Study Workshop, 1992.

Preliminary Guidelines for Assessing Impacts of Climate Change, 1992.

III. RAPPORT SPÉCIAL DU GIEC, 1994

- a) **Lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre** (3 volumes), 1994 (*en anglais, espagnol, français et russe*).

- b) **Directives techniques du GIEC pour l'évaluation des incidences de l'évolution du climat et des stratégies d'adaptation**, 1994 (*en anglais, arabe, chinois, espagnol, français et russe*).
- c) **CLIMATE CHANGE 1994 — Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios.**

IV. DEUXIÈME RAPPORT D'ÉVALUATION DU GIEC, 1995

- a) **CLIMATE CHANGE 1995 — The Science of Climate Change.** (Avec résumé destiné aux décideurs). Report of IPCC Working Group I, 1995.
- b) **CLIMATE CHANGE 1995 — Scientific-Technical Analyses of Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change.** (Avec résumé destiné aux décideurs). Report of IPCC Working Group II, 1995.
- c) **CLIMATE CHANGE 1995 — The Economic and Social Dimensions of Climate Change.** (Avec résumé destiné aux décideurs). Report of IPCC Working Group III, 1995.
- d) **Document de synthèse des informations scientifiques et techniques relatives à l'interprétation de l'article 2 de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques**, 1995.

(A noter que le Document de synthèse des informations scientifiques et techniques relatives à l'interprétation de l'article 2 de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et les trois résumés destinés aux décideurs sont disponibles en anglais, arabe, chinois, espagnol, français et russe).

V. DOCUMENTS TECHNIQUES DU GIEC

Techniques, politiques et mesures d'atténuation des changements climatiques — Document technique I du GIEC.
(également en anglais et espagnol)

Introduction aux modèles climatiques simples employés dans le Deuxième rapport d'évaluation du GIEC — Document technique II du GIEC.
(également en anglais et espagnol)

Stabilisation de gaz atmosphériques à effet de serre : conséquences physiques, biologiques et socio-économiques — Document technique III du GIEC.
(également en anglais et espagnol)

Règles s'appliquant à l'élaboration, à la révision et à la publication des documents techniques du GIEC

Lors de sa onzième session (Rome, 11-15 décembre 1995), le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a adopté à l'unanimité les règles qui suivent concernant l'élaboration de ses documents techniques.

Les documents techniques du GIEC traitent de sujets sur lesquels on juge essentiel d'obtenir un point de vue scientifique et technique international émanant de sources différentes. Chacun de ces documents :

- a) s'inspire de textes déjà inclus dans les rapports d'évaluation et les rapports spéciaux du GIEC;
- b) est établi i) à la demande officielle de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ou de ses organes subsidiaires, après acceptation du bureau du GIEC, ou bien ii) à la suite d'une décision du GIEC;
- c) est élaboré par une équipe d'experts, comprenant un coordinateur principal, sélectionné par le bureau du GIEC conformément aux directives concernant le choix des auteurs principaux, qui figurent dans les règlements du GIEC*;
- d) est expédié, sous forme de projet, à des experts et divers gouvernements, de façon que ceux-ci le reçoivent tous en même temps et disposent de quatre semaines au moins pour l'examiner et renvoyer leurs remarques;
- e) est ensuite révisé par les auteurs principaux en fonction des remarques reçues;
- f) est de nouveau expédié aux divers gouvernements de façon que ceux-ci disposent de quatre semaines au moins pour l'examiner une dernière fois et renvoyer leurs remarques;
- g) est parachevé par les auteurs principaux, en collaboration avec le bureau du GIEC tenant le rôle de comité de rédaction, en fonction des remarques reçues;

- h) contient en annexe, si le bureau du GIEC décide que cela est nécessaire, des points de vue divergents, fondés sur les remarques avancées par les gouvernements à l'occasion de la dernière révision, et dont le reste du document ne fait pas suffisamment état.

Lorsque les documents techniques sont élaborés à la demande officielle de la Conférence des Parties ou de ses organes subsidiaires, ils leur sont expédiés en premier lieu, puis ils sont publiés. Lorsqu'ils sont élaborés sur l'initiative du GIEC, ils sont directement publiés. Dans les deux cas, ils portent la mention suivante, en évidence en début de document :

“Le présent document technique du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a été élaboré [à la demande des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques]/[sur l'initiative du groupe d'experts]. Si les éléments d'information rassemblés ici ont été vérifiés par des experts et divers gouvernements, ils n'ont pas été examinés par le groupe d'experts aux fins d'une éventuelle acceptation ou approbation.”

* L'élaboration d'un premier projet de rapport incombe à des auteurs principaux choisis par le bureau du groupe de travail compétent à partir des listes d'experts fournies par tous les pays membres et par toutes les organisations participantes. Les experts sont choisis au regard notamment des publications ou des travaux qui les ont fait connaître. Dans la mesure du possible, le bureau du groupe de travail compétent doit constituer l'équipe d'auteurs principaux d'un chapitre donné de façon à faire apparaître un juste équilibre entre les différents points de vue qu'il est raisonnablement fondé à envisager et de façon qu'au moins un expert y représente un pays en développement.