



**TECHNIQUES, POLITIQUES
ET MESURES D'ATTÉNUATION DES
CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

Document technique I du GIEC



GRUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT



Techniques, politiques et mesures d'atténuation du changement climatique

Publié sous la direction de

Robert T. Watson
Banque mondiale

Marufu C. Zinyowera
Services météorologiques du Zimbabwe

Richard H. Moss
Battelle Pacific Northwest
National Laboratory

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.

Novembre 1996

Le présent document a été préparé sous les auspices du Groupe de travail II du GIEC, coprésidé par MM. Robert T. Watson (Etats-Unis d'Amérique) et M.C. Zinyowera (Zimbabwe).

© 1996, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

ISBN: 92-91-69200-X

Table des matières

<i>Préface</i>	v
Résumé technique	3
Secteur des bâtiments à usage résidentiel, commercial et institutionnel	3
Secteur des transports	4
Secteur industriel	5
Secteur de l'énergie	5
Secteur agricole	6
Secteur des forêts	6
Elimination des déchets et des eaux usées	7
Instruments économiques	7
1. Introduction	9
1.1 Objet et contexte	9
1.2 Portée et organisation	9
1.3 Sources d'information	9
1.4 Mesures envisagées	10
1.5 Critères d'analyse	11
1.6 Projections de référence concernant la consommation d'énergie et les émissions de dioxyde de carbone	12
2. Secteur des bâtiments à usage résidentiel, commercial et institutionnel	15
2.1 Introduction	15
2.2 Techniques de réduction des émissions de GES dans le secteur des bâtiments à usage résidentiel, commercial et institutionnel	15
2.3 Mesures de réduction des émissions de GES dans le secteur des bâtiments à usage résidentiel, commercial et institutionnel	20
2.4 Réduction des émissions mondiales de carbone attribuables aux techniques et aux mesures adoptées dans le secteur des bâtiments à usage résidentiel, commercial et institutionnel	24
3. Secteur des transports	25
3.1 Introduction	25
3.2 Tendances et prévisions des émissions mondiales de carbone	25
3.3 Techniques de réduction des émissions de GES dans le secteur des transports	26
3.4 Mesures de réduction des émissions de GES dans le secteur des transports	31
4. Secteur industriel	37
4.1 Introduction	37
4.2 Techniques de réduction des émissions de GES dans le secteur industriel	37
4.3 Mesures de réduction des émissions de GES dans le secteur industriel	39
4.4 Réductions des émissions mondiales de carbone attribuables aux techniques et aux mesures	43
5. Secteur de l'énergie	45
5.1 Introduction	45
5.2 Techniques de réduction des émissions de GES dans le secteur de l'énergie	46
5.3 Mesures de réduction des émissions de GES dans le secteur de l'énergie	54
6. Secteur de l'agriculture	59
6.1 Introduction	59
6.2 Techniques de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de l'agriculture	59
6.3 Mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agricole	62

7. Secteur des forêts	65
7.1 Introduction	65
7.2 Techniques de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des forêts	65
7.3 Mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des forêts	66
8. Evacuation des déchets solides et des eaux usées	75
8.1 Introduction	75
8.2 Solutions techniques permettant de lutter contre les émissions de méthane	75
8.3 Mesures de réduction et de récupération des émissions de méthane	76
8.4 Comparaison des différentes mesures et politiques	79
9. Instruments économiques	81
9.1 Introduction	81
9.2 Instruments économiques applicables au plan national	81
9.3 Instruments économiques applicables au plan international	83
9.4 Evaluation des instruments économiques	86
9.5 Comparaison des systèmes de permis ou de contingents négociables et des systèmes de taxes	87
Appendices	
A. Projections de référence	89
B. Documents du GIEC utilisés à des fins d'information	94
C. Acronymes et sigles	95
D. Unités	96
E. Glossaire	97
Liste des documents publiés par le GIEC	99

Préface

Le présent document technique du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) porte sur les techniques, les politiques et les mesures d'atténuation du changement climatique. Il a été élaboré à la demande du Groupe *ad hoc* du Mandat de Berlin 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 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. Le bureau du GIEC tient le rôle de comité de rédaction et veille à ce que les auteurs principaux, quand ils parachèvent le document, tiennent dûment compte des remarques issues des révisions.

Lors de sa onzième session (Genève, 7-8 novembre 1996), le bureau du GIEC a examiné les principales remarques que les gouvernements avaient envoyées 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 les a remercié d'avoir respecté les règles établies en la matière et a autorisé que le document technique soit expédié au Groupe *ad hoc* du mandat de Berlin, 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 MM. R.T. Watson et M.C. Zinyowera, coprésidents du Groupe de travail II du GIEC, qui ont supervisé les efforts déployés par le bureau du groupe de travail et en particulier M. Richard Moss, chef du service d'appui technique du Groupe de travail II, de son insistance sur la qualité et le respect des délais.

B. Bolin
Président du GIEC

N. Sundararaman
Secrétaire général du GIEC

Techniques, politiques et mesures d'atténuation du changement climatique

Publié sous la direction de **R.T. Watson, M.C. Zinyowera et R.H. Moss**

Le présent document a été préparé sous les auspices du Groupe de travail II du GIEC.

Auteurs principaux:

Roberto Acosta Moreno, Cuba; Richard Baron, AIE; Peter Bohm, Suède; William Chandler, USA; Vernon Cole, USA; Ogunlade Davidson, Sierra Leone; Gautam Dutt, Argentine; Erik Haites, Canada; Hisashi Ishitani, Japon; Dina Kruger, USA; Mark Levine, USA; Li Zhong, Chine; Laurie Michaelis, OCDE; William Moomaw, USA; Jose Roberto Moreira, Brésil; Arvin Mosier, USA; Richard Moss, USA (TSU); Nebojsa Nakicenovic, IIASA; Lynn Price, USA; N.H. Ravindranath, India; Hans-Holger Rogner, IIASA; Jayant Sathaye, USA; Priyadarshi Shukla, Indie; Laura Van Wie McGrory, USA (TSU); Ted Williams, USA (TSU)

Contributeurs:

Jan Corfee-Morlot, OCDE; James Edmonds, USA; Philip Fearnside, USA; Robert Friedman, USA; Fiona Mullins, OCDE; Lee Solsbery, IEA; Zhao Quiguo, Chine

Les auteurs souhaitent aussi remercier les personnes suivantes pour leur participation à la préparation du document : David Dokken, Groupe de travail II du GIEC (TSU); Sandy MacCracken, Groupe de travail II du GIEC (TSU); Martha Perdomo, Venezuela; Ken Richards, Etats-Unis d'Amérique; Hiroshi Tsukamoto, Japon; Steve Vogel, Etats-Unis d'Amérique; Motomu Yukawa, Japon.

RÉSUMÉ TECHNIQUE

Le présent document technique consiste en une vue d'ensemble et en une analyse des techniques et des mesures visant à limiter et à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) et à accroître les puits de ces gaz au titre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Les auteurs ont mis l'accent sur les techniques et les mesures concernant les pays figurant à l'Annexe I de cette convention, tout en donnant des informations utilisables, le cas échéant, par les pays qui n'y figurent pas. L'examen porte sur trois périodes distinctes : on a mis l'accent sur l'évolution à court terme (de l'époque présente à 2010) et à moyen terme (2010 à 2020), tout en examinant les perspectives à plus long terme (2050, par exemple). Pour mener à bien cette analyse, les auteurs se sont inspirés de la documentation rassemblée en vue de la rédaction du Deuxième Rapport d'évaluation (SAR) du GIEC et des précédents rapports et évaluations du Groupe.

Le Document technique se penche sur les techniques et mesures qui peuvent être adoptées dans trois secteurs d'utilisation finale de l'énergie (les bâtiments à usage commercial, résidentiel et institutionnel, les transports et l'industrie), dans le secteur de l'énergie ainsi que dans les secteurs de l'agriculture, des forêts et de la gestion des déchets. Le dernier chapitre, consacré aux instruments économiques, traite des mesures de portée plus large susceptibles d'influer sur les économies nationales. Les auteurs ont analysé une série de mesures possibles, et notamment les programmes fondés sur les lois du marché; les accords volontaires; les dispositions réglementaires; la recherche, le développement et la démonstration (RD&D); les taxes sur les émissions de GES; et les permis et contingents d'émission. Il convient de noter que le choix des instruments peut avoir des répercussions économiques sur d'autres pays.

Les auteurs ont défini et évalué différentes options en fonction de trois critères. Etant donné les difficultés que soulève l'estimation du potentiel économique et du potentiel offert par le marché (voir encadré 1) des différentes techniques et de l'efficacité des diverses mesures eu égard aux objectifs fixés en matière de réduction des émissions – et compte tenu du risque de comptabiliser deux fois les résultats obtenus au moyen de mesures fondées sur les mêmes potentiels techniques –, les auteurs n'ont pas fourni d'estimations de la réduction totale des émissions globales, ni ne se sont prononcés quant aux choix les plus opportuns.

Secteur des bâtiments à usage résidentiel, commercial et institutionnel

D'après les projections, les émissions globales de CO₂ provenant des bâtiments à usage résidentiel, commercial et institutionnel devraient augmenter, passant de 1,9 GtC par an en 1990 à 1,9 à 2,9 GtC par an en 2010, puis à 1,9 à 3,3 GtC par an en 2020 et enfin à 1,9 à 5,3 GtC par an en 2050. Alors qu'en 1990, 75 % des émissions de ce secteur étaient imputées à la consommation d'énergie dans des pays figurant à

l'Annexe I, cette proportion devrait tomber à un peu plus de 50 % en 2050.

L'emploi de techniques à haut rendement énergétique dans l'industrie du second œuvre, dont le surcoût pour le consommateur serait amorti en cinq ans ou moins, offre la possibilité économique de réduire les émissions de carbone provenant de bâtiments à usage résidentiel ou commercial de 20 % environ d'ici à 2010, de 25 % d'ici à 2020 et de près de 40 % d'ici à 2050 dans le cas des scénarios IS92 de référence correspondant à une amélioration du rendement énergétique.

Les améliorations de l'enveloppe des bâtiments (réduction des échanges thermiques, orientation convenable des bâtiments, fenêtres à haut rendement énergétique et albédo des parois extérieures adapté au climat), associées à une période d'amortissement de cinq ans ou moins, offrent également la possibilité économique de réduire la consommation d'énergie servant au chauffage et à la climatisation des bâtiments à usage résidentiel d'environ 25 % en 2010, de 30 % en 2020 et de 40 % au plus en 2050 dans le cas des scénarios IS92 de référence selon lesquels le libre jeu des mécanismes du marché contribuent à améliorer le rendement énergétique des bâtiments.

Pour parvenir à réduire les émissions, on dispose de quatre sortes principales de mesures : i) les programmes axés sur le marché, où les consommateurs ou les fabricants bénéficient d'une assistance technique et/ou de mesures d'incitation; ii) les normes obligatoires en matière de rendement énergétique, applicables au moment de la fabrication ou de la construction; iii) les normes librement adoptées en matière de rendement

Encadré 1. Potentiel technique, potentiel économique et potentiel offert par le marché

Potentiel technique — Ampleur possible de la réduction des émissions de GES ou de l'amélioration du rendement énergétique résultant de l'emploi d'une technologie ou d'une pratique dans tous les cas où ces dernières sont techniquement applicables, indépendamment de leur coût ou de la faisabilité pratique de leur adoption.

Potentiel économique — Fraction du potentiel technique de réduction des émissions de GES ou d'amélioration du rendement énergétique qui peut être réalisée de façon efficace par rapport au coût en l'absence d'obstacles liés au marché. La réalisation du potentiel économique exige que l'on mette en œuvre des politiques et des mesures supplémentaires destinées à lever ces obstacles.

Potentiel offert par le marché — Fraction du potentiel économique de réduction des émissions de GES ou d'amélioration du rendement énergétique qui peut être réalisée dans les conditions actuelles du marché, en l'absence de nouvelles politiques ou mesures.

énergétique; et enfin iv) l'intensification des programmes publics ou privés de RD&D en vue de mettre au point des produits de meilleur rendement énergétique. Il importe d'adapter avec soin ces mesures de manière à surmonter les éventuels obstacles commerciaux. Vu que l'ensemble de ces mesures entraînent certains frais d'administration et de transaction, elles auront une incidence globalement favorable sur l'économie dans la mesure où les économies d'énergie seront efficaces par rapport au coût.

D'après les estimations, les réductions réalisables (le potentiel offert par le marché) – à l'exclusion des réductions imputables à l'application de normes librement adoptées en matière de rendement énergétique – devraient atteindre quelque 10 à 15 % en 2010, 15 à 20 % en 2020 et 20 à 50 % en 2050 dans le cas des scénarios IS92. En conséquence, à l'échelle de la planète, la réduction totale réalisable des émissions de carbone imputables au secteur des bâtiments devrait varier approximativement (selon les scénarios IS92c, a et e) de 0,175 à 0,45 GtC par an d'ici à 2010, de 0,25 à 0,70 GtC par an d'ici à 2020 et de 0,35 à 2,5 GtC par an d'ici à 2050.

Secteur des transports

En 1990, l'énergie consommée par le secteur des transports a donné lieu à l'émission de 1,3 GtC, dont les trois quarts provenaient de pays figurant à l'Annexe I. Sur l'ensemble des émissions globales enregistrées en 1990, la moitié environ étaient imputables aux véhicules légers, un tiers, aux poids lourds et l'essentiel du reste, aux aéronefs. Selon une série de scénarios fondés sur une augmentation du trafic et une réduction de l'intensité énergétique, les émissions de CO₂ progresseront pour atteindre 1,3 à 2,1 GtC en 2010, 1,4 à 2,7 GtC en 2020 et 1,8 à 5,7 GtC en 2050. La part attribuable aux pays figurant à l'Annexe I atteindra 60 à 70 % environ d'ici à 2020 et devrait encore diminuer par la suite. Dans la plupart des scénarios, la part des émissions dues aux camions et aux aéronefs augmente. Le secteur des transports est également à l'origine d'émissions d'autres GES, et notamment de N₂O, de CFC et de HFC. C'est ainsi que les émissions de NO_x dues aux aéronefs, en contribuant à la formation d'ozone, peuvent avoir un effet radiatif aussi important que les émissions de CO₂ de ces mêmes aéronefs.

S'agissant des véhicules légers, la diminution de l'intensité énergétique – qui permettrait aux utilisateurs, grâce aux économies de carburant réalisées, de récupérer le capital investi en 3 ou 4 ans – pourrait, d'ici à 2020, réduire de 10 à 25 % leurs émissions de GES par rapport aux niveaux obtenus par projection. Quant au potentiel économique relatif aux diminutions de l'intensité énergétique pour ce qui est des poids lourds et des aéronefs, il peut donner lieu, toujours d'ici à 2020, à une réduction d'environ 10 % des émissions de GES par rapport aux niveaux prévus.

Le fait de remédier aux fuites de réfrigérant des systèmes de climatisation a le potentiel technique de réduire de 10 % d'ici à 2020 le forçage exercé, sur l'ensemble du cycle de vie, par les gaz à effet de serre rejetés par les automobiles. La mise au

point de convertisseurs catalytiques ne produisant pas de N₂O pourrait donner lieu à une réduction analogue du forçage dû aux automobiles. La production de moteurs d'aéronefs rejetant 30 à 40 % de NO_x de moins que les modèles actuels est techniquement réalisable et contribuerait aussi à réduire le forçage dû au transport aérien, bien que cela puisse s'effectuer aux dépens du rendement des moteurs et, par conséquent, des émissions de CO₂.

Dans le cas des véhicules légers, le remplacement de l'essence par le gazole, le gaz naturel ou le propane a le potentiel technique de réduire de 10 à 30 % les émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie. Quant aux autres carburants tirés de sources d'énergie renouvelables, ils ont le potentiel technique de les réduire de 80 % ou plus.

Il sera nécessaire d'avoir recours à de nouvelles mesures pour mettre en œuvre ces solutions techniques. Normes, accords volontaires et mesures d'incitation financière peuvent faciliter l'adoption des améliorations portant sur le rendement énergétique, qui peuvent d'ailleurs s'avérer d'un bon rapport coût-efficacité pour les utilisateurs de véhicules. Il faudra également recourir à la recherche, au développement et à la démonstration (RD&D) pour trouver le moyen de réduire les émissions de HFC et de N₂O ainsi que les rejets de NO_x dus aux aéronefs avant d'imposer des normes dans ce domaine, bien que les coûts impliqués ne soient pas encore connus.

Le transport routier a un coût social et environnemental, tant au plan local et régional qu'à l'échelle du globe. On peut employer des instruments du marché (péages, etc.) pour rendre compte de l'essentiel de ce coût, notamment au plan local et régional. Ces instruments peuvent aussi contribuer à réduire les émissions de GES en limitant la circulation. Si les taxes sur les carburants sont un moyen économiquement efficace de réduire les émissions de GES, elles peuvent se révéler moins efficaces lorsqu'il s'agit d'atteindre des objectifs de portée locale; elles ne soulèvent cependant guère de difficultés au plan administratif et sont applicables à l'échelle nationale. Une hausse du prix des carburants répercutant pleinement les coûts sociaux et environnementaux des transports sur les utilisateurs pourrait réduire les émissions projetées de CO₂ imputables au transport routier de 10 à 25 % d'ici à 2020 dans la plupart des régions, les réductions les plus importantes ayant lieu dans les pays où les prix sont actuellement les plus faibles. Des mesures incitant à utiliser des carburants de remplacement pourraient entraîner une réduction de 5 % des émissions projetées des véhicules légers d'ici à 2020 et avoir encore davantage d'effet à plus long terme.

Des modifications de l'infrastructure urbaine et de celle des transports visant à restreindre les besoins en matière de transport motorisé et à réorienter la demande vers des modes de transport à intensité énergétique moindre peuvent constituer l'un des principaux éléments d'une stratégie à long terme de réduction des émissions de GES dans ce secteur. Il sera indispensable d'élaborer, à l'échelle locale, des trains de mesures susceptibles d'amener ces modifications, en consultation avec

les parties impliquées. Dans certaines circonstances, la diminution de la circulation résultant de ces mesures pourrait se traduire par une réduction de 10 % ou plus des émissions de GES d'ici à 2020, tout en procurant d'importants avantages au plan social et environnemental.

Secteur industriel

Au cours des deux dernières décennies, les émissions de CO₂ imputables à l'utilisation de combustibles fossiles par le secteur industriel sont restées stables ou ont diminué dans la plupart des pays figurant à l'Annexe I, alors que l'économie était en expansion. Les causes de ce phénomène diffèrent selon qu'il s'agit de pays de l'OCDE (où ont primé les gains de rendement et une réorientation vers le secteur des services) ou de pays à économie de transition (où ont été mises en train de vastes opérations de restructuration ainsi qu'une réduction de leurs sous-secteurs de l'industrie lourde). En 1990, les émissions globales d'origine industrielle (y compris celles qui sont associées aux industries manufacturières, à l'agriculture, aux industries extractives et à la foresterie) se sont établies à 2,8 GtC (soit 47 % de l'ensemble des émissions), dont 75 % étaient imputables aux pays figurant à l'Annexe I. D'après les projections, ces émissions devraient atteindre 3,2 à 4,9 GtC en 2010, 3,5 à 6,2 GtC en 2020 et 3,1 à 8,8 GtC en 2050. Les émissions de CO₂ d'origine industrielle provenant des pays figurant à l'Annexe I devraient soit rester stables puis diminuer de 33 %, soit augmenter de 76 % d'ici à 2050 (voir tableaux A1 à A4 à l'appendice A). Il existe manifestement de nombreuses possibilités d'amélioration du rendement énergétique des procédés industriels, d'élimination des gaz de procédés et de mise en place, dans et entre les entreprises, d'une coordination efficace qui permette de tirer un meilleur parti des matériels, de mieux combiner chaleur et énergie et de procéder à une utilisation séquentielle plus efficace de l'énergie thermique. Il existe aussi d'excellentes perspectives de coopération entre les pays figurant à l'Annexe I de même qu'entre ces pays et les pays en développement.

Alors que, jusqu'ici, on a eu traditionnellement recours à l'établissement de normes et à la réglementation pour réduire les émissions indésirables, le très grand nombre de secteurs, d'entreprises et de particuliers touchés semble indiquer qu'il est nécessaire de compléter ces mesures par des mécanismes du marché, des accords volontaires, une politique fiscale appropriée et d'autres moyens non classiques. Il sera difficile, au plan politique, de mettre en œuvre des restrictions concernant un grand nombre de GES; il faut de plus veiller à ce que la charge administrative liée à leur exécution et les coûts de transaction restent modérés. Comme bon nombre d'entreprises ont fait part de leur intention d'adopter des pratiques s'inscrivant dans la durée, l'élaboration d'accords de coopération peut être une façon adéquate d'aborder la question (SAR II, 20.5; SAR III, chapitre 11).

On estime que les pays figurant à l'Annexe I pourraient réduire leurs émissions de CO₂ dues au secteur industriel de 25 % par rapport aux niveaux de 1990 simplement en remplaçant les installations et les procédés actuels par les options

technologiques les plus efficaces actuellement applicables (en se fondant sur l'hypothèse de la stabilité structurelle du secteur industriel). Il suffit que ce remplacement ait lieu au moment du renouvellement normal des biens de production pour qu'il s'avère efficace par rapport au coût (SAR II, SPM 4.1.1).

Secteur de l'énergie

En 1990, la consommation d'énergie a donné lieu au rejet de 6 GtC. Environ 72 % de cette énergie était destinée à des utilisateurs finals (ce qui s'est traduit par l'émission de 3,7 GtC); les 28 % restants ont été utilisés par le secteur de l'approvisionnement en énergie et ont provoqué le rejet de 2,3 GtC. Dans ce secteur, il est techniquement possible de réaliser d'importantes réductions des émissions en se conformant à l'échéancier normal des investissements consacrés au remplacement de l'infrastructure et des équipements usés ou obsolètes (SAR II, SPM 4.1.3). Au cours des 50 à 100 prochaines années, le système d'approvisionnement en énergie sera remplacé en totalité au moins deux fois. A cet égard, les pratiques les plus prometteuses (indépendamment de tout ordre de priorité) sont les suivantes : conversion plus efficace des combustibles fossiles; préférence donnée aux combustibles fossiles à faible teneur en carbone; décarburation des gaz de combustion et des combustibles et stockage du CO₂; préférence donnée à l'énergie nucléaire et aux sources d'énergie renouvelables (SAR II, SPM 4.1.3).

En matière de production d'électricité, le rendement peut passer de 30 % environ (moyenne mondiale actuelle) à plus de 60 % en certains cas d'ici à 2020-2050 (SAR II, SPM 4.1.3.1). Pour l'heure, les meilleures centrales au charbon et au gaz naturel en exploitation ont des rendements de 45 et 52 % respectivement (SAR II, 19.2.1). En se fondant sur l'hypothèse d'un rendement type de 40 % des nouvelles centrales à charbon (équipées de dispositifs d'extraction des SO_x et NO_x) dans les pays figurant à l'Annexe I, on en déduit qu'un accroissement de 1 % du rendement se traduirait par une réduction de 2,5 % des émissions de CO₂ (SAR II, 19.2.1.1). Si le coût associé à ces gains de rendement sera tributaire de nombreux facteurs, il existe des technologies de pointe efficaces par rapport au coût, comparables à certains équipements et installations déjà en service. L'utilisation de combustibles fossiles à basse teneur en carbone (par exemple le remplacement du charbon par le gaz naturel) peut contribuer, dans certains cas, à réduire de près de 50 % les émissions de CO₂. La décarburation des gaz de combustion et des combustibles offre, quant à elle, la possibilité de réduire ces émissions de 85 % et plus. En règle générale, les frais de décarburation varient de 80 à 150 dollars par tonne de carbone éliminé. La passage au nucléaire et aux sources d'énergie renouvelables permet de supprimer pratiquement la totalité des émissions directes de CO₂ et de réduire les autres émissions de CO₂ qui peuvent se produire au cours du cycle de vie des systèmes énergétiques (extraction, construction des installations, déclassement, etc.). Si les coûts d'atténuation peuvent se résumer à des frais supplémentaires négligeables, ils peuvent aussi représenter des centaines de dollars par tonne de carbone éliminé (SAR II, chapitre 19). Il existe aussi des méthodes permettant de

réduire les émissions de méthane (CH_4) dans une proportion atteignant 30 à 90 % pour ce qui est de l'extraction du charbon, plus de 50 % dans le cas de la mise à l'air libre et du flambage du gaz naturel et jusqu'à 80 % en ce qui concerne les systèmes de distribution de ce gaz (SAR II, 22.2.2). Dans de nombreuses régions du monde, certaines de ces réductions peuvent s'avérer économiquement viables et offrir une série d'avantages, notamment par le biais de l'utilisation du méthane comme source d'énergie (SAR II, 19.2.2.1).

Le degré de réalisation des possibilités offertes sera tributaire de l'ampleur de la baisse ultérieure des coûts, du rythme auquel les nouvelles techniques seront élaborées et mises en œuvre, du financement et du transfert de technologie ainsi que des mesures qui permettront de surmonter les nombreux obstacles non techniques, dont les effets néfastes sur l'environnement, l'acceptabilité sociale des options envisagées et autres particularités régionales, sectorielles ou nationales.

Par le passé, l'intensité énergétique de l'économie mondiale a progressé en moyenne de 1 % par an, principalement en raison des perfectionnements techniques qui ont accompagné le remplacement naturel des équipements amortis (SAR II, B.3.1). Il y a peu de chances que cette progression s'intensifie en l'absence de mesures nouvelles. Les mesures envisagées sont regroupées en cinq catégories (indépendamment de tout ordre de priorité) : i) programmes axés sur le marché; ii) dispositions réglementaires; iii) accords volontaires; iv) recherche, développement et démonstration; v) mesures infrastructurelles. A elle seule, aucune mesure ne suffit à assurer la mise au point en temps voulu, l'adoption et la diffusion des techniques d'atténuation. Il faut en fait avoir recours à un ensemble de mesures adaptées aux conditions qui prédominent à l'échelle nationale, régionale et locale. Des mesures adéquates doivent par conséquent refléter la profonde disparité des ressources institutionnelles, sociales, économiques, techniques et naturelles dont disposent les différentes nations et régions.

Secteur agricole

L'agriculture contribue pour un cinquième environ à l'effet de serre anthropique projeté et produit environ 50 % et 70 % respectivement des émissions globales anthropiques de CH_4 et de N_2O ; les activités agricoles (conversion des forêts non comprise) sont à l'origine de quelque 5 % des émissions de CO_2 d'origine humaine (SAR II, figure 23.1). D'après les estimations, la réduction globale du forçage radiatif imputable au secteur agricole pourrait atteindre 1,1 à 3,2 gigatonnes d'équivalent carbone par an. Sur ce total, environ 32 % correspondraient à la réduction des émissions de CO_2 , 42 %, aux compensations des émissions de carbone par la production de biocombustibles sur les terres agricoles en exploitation, 16 %, à la réduction des émissions de CH_4 et 10 %, à la réduction des émissions de N_2O .

Les pays figurant à l'Annexe I devraient jouer un rôle important dans la réduction des émissions. C'est ainsi qu'ils pourraient assurer 40 % de la réduction totale possible des émissions de CO_2 , et 32 % de la compensation des émissions de

carbone par la production de biocombustibles sur les terres agricoles existantes. En ce qui concerne la réduction totale des émissions de CH_4 à l'échelle du globe, les pays figurant à l'Annexe I pourraient assurer 5 % de la réduction imputable à l'emploi de techniques rizicoles perfectionnées, et 21 % des réductions attribuables à l'amélioration de la gestion des ruminants. Ces pays pourraient aussi assurer 30 % environ des réductions des émissions de N_2O résultant d'un usage plus restreint et efficace des engrais azotés, et 21 % des réductions dues à une meilleure utilisation des fumiers. Certaines techniques telles que la culture sans préparation du sol ou l'emploi d'engrais à l'endroit et au moment opportuns ont déjà été adoptées pour des raisons autres que les préoccupations liées au changement climatique. Dans l'optique d'une réduction des émissions, des options telles que l'amélioration de la gestion des exploitations et l'utilisation plus efficace des engrais azotés permettront de préserver ou d'accroître la production agricole tout en ayant une incidence positive sur l'environnement.

Secteur des forêts

On estime actuellement que les forêts des latitudes hautes et moyennes constituent un puits net de carbone à raison d'environ $0,7 \pm 0,2$ GtC/an. Quant aux forêts des basses latitudes, on estime qu'elles constituent une source nette de carbone à raison de $1,6 \pm 0,4$ GtC/an, principalement par suite du défrichement et de la dégradation des forêts (SAR II, 24.4.2). Ces chiffres peuvent être comparés aux rejets carboniques résultant de la combustion des combustibles fossiles, qui étaient estimés à 6 GtC en 1990.

On évalue à 700 Mha la superficie éventuellement disponible pour la mise en œuvre de mesures d'aménagement forestier à des fins de conservation et de fixation du carbone. D'ici à 2050, 60 à 87 gigatonnes de carbone au total pourraient être fixées et conservées sur l'ensemble de cette superficie. Ce sont les régions tropicales qui offrent les meilleures possibilités en la matière (80 % de la quantité de carbone susceptible d'être fixée et conservée), suivies par les régions tempérées (17 %) et les régions boréales (3 %).

Le ralentissement de la déforestation et l'aide à la régénération, la création de forêts et l'agroforesterie constituent les principales mesures d'atténuation aux fins de conservation et de fixation du carbone. Parmi ces mesures, le ralentissement de la déforestation et l'aide à la régénération dans les régions tropicales (22 à 60 GtC environ) ainsi que la création de forêts et l'agroforesterie dans les régions tropicales (23 GtC) et tempérées (13 GtC) présentent le potentiel technique le plus prometteur. Dans la mesure où les programmes de création de forêts permettent d'obtenir des produits du bois qui peuvent contribuer au remplacement des matériaux et de l'énergie tirés des combustibles fossiles, l'avantage que l'on peut en tirer pour ce qui concerne le carbone peut être jusqu'à quatre fois supérieur à celui découlant de la fixation de cet élément. Si l'on ne tient pas compte du coût d'opportunité des terres et des frais indirects qu'entraîne la création de forêts, le coût de la conservation et de la fixation du carbone atteint en moyenne 3,7 à 4,6 dollars par tonne de carbone, quoiqu'il puisse varier considérablement selon les projets.

Dans un certain nombre de pays en développement (Brésil, Inde, etc.), les pouvoirs publics ont pris des mesures en vue de lutter contre le déboisement. Pour que ces mesures soient durablement couronnées de succès, il faut que les responsables du déboisement reçoivent des compensations économiques ou autres qui soient au moins égales à leur rémunération antérieure. Des programmes nationaux de plantation d'arbres et de reboisement ont été mis en œuvre avec un succès variable dans nombre de pays industrialisés et en développement. Là encore, seuls des avantages adéquats accordés aux habitants des zones forestières et aux agriculteurs permettront d'assurer le succès durable de ces programmes. Le secteur privé a joué un rôle important dans la plantation d'arbres aux fins d'usages précis tels que la production de papier. Il élargit actuellement son champ d'activité dans les pays en développement en mobilisant des ressources en vue de la plantation d'arbres destinés à différents usages (industries du bâtiment et du mobilier, etc.).

Les résidus du bois sont souvent utilisés pour produire de la vapeur et/ou de l'électricité dans la plupart des fabriques de papier et des plantations d'hévéas et servent même, dans certaines circonstances, à produire de l'électricité de centrale. Produire du bois de plantation en quantités suffisantes pour alimenter des centrales électriques nécessitera un accroissement des rendements en biomasse ainsi que du rendement thermique, de façon à s'aligner sur les caractéristiques des centrales électriques classiques. Les pouvoirs publics peuvent faciliter la chose en levant les restrictions touchant l'approvisionnement en bois et l'achat d'électricité.

Ces trois sortes d'options en matière d'atténuation ont donné lieu à des projets qui sont actuellement mis en œuvre de façon conjointe. Les résultats obtenus serviront à élaborer les projets d'atténuation ultérieurs. Toutefois, en l'absence de leur promotion et de leur répétition à l'échelle nationale, ces projets devraient, en eux-mêmes, avoir un impact limité sur la conservation et la fixation du carbone. Pour parvenir à réduire de façon notable les émissions globales de carbone, les gouvernements des différents pays devront adopter des mesures qui, outre leurs effets sur le carbone, procureront des avantages économiques ou autres à l'échelon local et national.

Élimination des déchets et des eaux usées

D'après les estimations, les installations d'élimination de déchets solides (décharges contrôlées et décharges brutes) et les stations d'épuration des eaux usées ont émis 50 à 80 millions de tonnes de méthane (290 à 460 millions de tonnes de carbone) en 1990. Bien que, pour un certain nombre de raisons, les estimations concernant les émissions soient entachées d'importantes incertitudes, les projections montrent que les émissions globales devraient considérablement augmenter à l'avenir.

Pour réduire les émissions de méthane, les diverses options techniques dont on dispose peuvent, dans de nombreux cas, être mises en œuvre avec profit. On peut diminuer les émissions de 30 à 50 % en procédant à une réduction à la source des déchets solides (par recyclage des papiers, compostage et

incinération) et en récupérant le méthane qui se dégage des décharges contrôlées et des eaux usées (SAR II, 22.4.4.2). Le méthane récupéré peut être utilisé comme source d'énergie, ce qui contribue à faire baisser le coût d'élimination des déchets. Il arrive que le méthane provenant des décharges contrôlées et des eaux usées puisse concurrencer d'autres formes d'énergie (SAR II, 22.4.4.2). Si l'on se fonde sur les estimations des différents scénarios IS92, on en déduit que la réduction des émissions d'équivalent carbone devrait se chiffrer à environ 90 Mt en 2010, à 100 Mt en 2020 et à 130 Mt en 2050.

Pour qu'il soit possible de réduire les émissions de méthane, il faut au préalable que les différentes parties s'engagent à gérer les déchets et que les obstacles à la réalisation de cet objectif soient éventuellement levés au moyen de l'une ou l'autre des quatre mesures générales suivantes : i) renforcement du cadre institutionnel et assistance technique; ii) accords volontaires; iii) dispositions réglementaires; iv) programmes axés sur le marché. Il importe en particulier de noter que, dans de nombreux cas, la réduction des émissions de méthane sera perçue comme une conséquence positive secondaire de ces mesures, qui visent souvent d'autres objectifs environnementaux et sanitaires.

Instruments économiques

Il existe une large gamme d'instruments économiques permettant d'influer sur les émissions imputables à plus d'un secteur. À l'échelle tant nationale qu'internationale, les instruments économiques devraient s'avérer plus efficaces en termes de coût que les autres méthodes de réduction des émissions de GES. Ces instruments, au nombre desquels figurent les subventions, les taxes, les permis et contingents négociables ainsi que la mise en œuvre conjointe, auront une incidence variable selon les particularités régionales et nationales, et notamment les politiques en vigueur, les institutions, l'infrastructure, l'expérience acquise et la situation politique.

Parmi les instruments économiques applicables au plan national figurent i) la modification de la répartition des subventions, dans le but de restreindre les subventions dont bénéficient des activités donnant lieu à des émissions de GES ou de subventionner des activités visant à limiter les émissions de GES ou à accroître les puits, ii) les taxes intérieures sur les émissions de GES et iii) les permis négociables.

Au nombre des instruments économiques applicables au plan international figurent i) les taxes internationales et les taxes intérieures harmonisées, ii) les contingents négociables et iii) la mise en œuvre conjointe.

Les instruments économiques appliqués à l'échelle nationale ou internationale nécessitent que l'on tienne compte des préoccupations que suscitent les questions d'équité, la compétitivité au plan international, le "resquillage" (certaines des parties qui tirent profit d'une réduction des émissions ne participent pas aux frais que cette réduction entraîne) et le transfert d'émissions (les mesures de réduction prises dans les pays

participants provoquent une augmentation des émissions dans d'autres pays).

A de rares exceptions près, aussi bien les taxes que les permis négociables imposent des frais aux entreprises et aux consommateurs. Les sources d'émissions devront engager des dépenses pour limiter leurs émissions ou procéder à des décaissements pour acquérir des permis ou payer des taxes.

Si les systèmes de permis sont supérieurs aux systèmes de taxes lorsqu'il s'agit d'atteindre un objectif précis en matière d'émission, ceux-ci permettent de mieux contrôler les coûts que les systèmes de permis. Pour qu'un système de permis négociables donne les résultats escomptés, il faut qu'une certaine concurrence se manifeste sur les marchés des permis (et des produits). Un marché des permis où joue la concurrence peut favoriser l'établissement de contrats ultérieurs, ce qui contribuera à lever l'incertitude au sujet de l'évolution du prix des permis.

Un système de taxes intérieures harmonisées sur les émissions de GES nécessite un accord au sujet des transferts financiers

compensatoires à l'échelon international. Pour être efficace, un tel système exige en outre qu'on interdise aux participants de mettre en œuvre des politiques qui accroissent indirectement les émissions de GES.

Les systèmes de contingents négociables permettent à chacun des participants de décider de la politique intérieure à appliquer. L'attribution initiale de contingents aux différents pays soulève des problèmes de répartition. Il est toutefois impossible de connaître à l'avance les conséquences exactes en matière de répartition, puisque que le prix des contingents ne peut être connu avant que les échanges n'aient commencé. En conséquence, il est parfois indispensable d'assurer une certaine protection contre l'évolution défavorable des prix.

S'agissant de l'application d'instruments économiques visant à limiter les émissions de GES au plan international, l'équité entre pays est fonction des attributions de contingents dans le cas des systèmes de contingents négociables, de l'accord de partage des recettes négocié dans le cas d'une taxe internationale et des paiements de transfert négociés dans le cas de taxes intérieures harmonisées sur les émissions de GES.

1. INTRODUCTION

1.1 Objet et contexte

Le présent document technique a pour objet de donner un aperçu et une analyse des techniques et des mesures destinées à limiter et à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) et à renforcer les puits de ces gaz, au titre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Le “mandat de Berlin”, qui a été adopté lors de la première Conférence des Parties à la Convention (Berlin, mars-avril 1995), définit le contexte propre au présent document et jette les bases d’un processus visant à élaborer des politiques et des mesures adéquates ainsi qu’à établir des objectifs chiffrés en matière de limitation et de réduction des émissions.

1.2 Portée et organisation¹

Le présent document technique propose une analyse sectorielle des techniques et des pratiques qui contribueront à réduire la progression des émissions de gaz à effet de serre ainsi que des mesures susceptibles d’encourager et d’accélérer leur mise en application; les moyens d’action économique de grande ampleur font l’objet d’une analyse distincte. Les auteurs ont mis l’accent sur les techniques et les mesures concernant les pays figurant à l’Annexe I de la Convention-cadre, tout en donnant, le cas échéant, des informations en vue de leur application dans les pays qui n’y figurent pas. L’analyse de ces diverses techniques et mesures est fondée sur un ensemble de critères (voir encadré 1) qui ont été approuvés par les participants à la douzième session du GIEC (Mexico, 11-13 septembre 1996).

L’analyse des techniques et des mesures a porté sur trois périodes de temps. Quoique l’accent ait été mis sur le court terme (de l’époque présente à 2010) et le moyen terme (2010-2020), les auteurs se sont également intéressés à l’évolution possible à plus long terme (par exemple jusqu’en 2050). Bon nombre des données du Deuxième Rapport d’évaluation ont été résumées sous la forme de données mondiales; pour les besoins du présent rapport, les données relatives aux pays cités à l’Annexe I sont aussi, dans la mesure du possible, réunies de sorte que ces pays forment un seul groupe, ou classées par catégories selon qu’elles concernent les pays industrialisés à économie de marché ou les pays à économie de transition. L’ensemble des informations et des conclusions contenues dans le présent rapport sont cohérentes avec celles du Deuxième Rapport d’évaluation et des autres rapports publiés précédemment par le GIEC.

Le Document technique commence par l’examen de trois secteurs d’utilisation finale de l’énergie, à savoir les bâtiments à usage commercial, résidentiel et institutionnel, les transports et l’industrie. Suit un chapitre consacré au secteur de l’approvisionnement en énergie, qui produit et transforme l’énergie primaire de manière à alimenter en énergie secondaire les secteurs d’utilisation finale². Les chapitres suivants sont consacrés aux techniques et aux mesures susceptibles d’être adoptées dans les secteurs de l’agriculture, des forêts et de la gestion des déchets.

Les mesures qui auront une incidence sur les émissions relevant pour l’essentiel de secteurs précis (par exemple l’instauration de taxes sur les carburants dans le secteur des transports) sont traitées dans les différents chapitres cités plus haut, alors que les mesures de portée plus large qui concernent l’économie d’un pays dans son ensemble (par exemple l’instauration de taxes sur l’énergie ou d’impôts sur les émissions carboniques) sont abordées dans un chapitre distinct consacré aux instruments économiques.

Les auteurs ont indiqué et évalué différentes options en fonction de trois critères (voir encadré 2). Etant donné les difficultés que soulève l’estimation du potentiel économique et commercial des différentes techniques et de l’efficacité des diverses mesures eu égard aux objectifs fixés en matière de réduction des émissions – et compte tenu du risque de comptabiliser deux fois les résultats obtenus au moyen de mesures fondées sur les mêmes potentiels techniques –, les auteurs n’ont pas fourni d’estimations de la réduction totale des émissions globales, ni ne se sont prononcés quant aux choix les plus opportuns. Il appartiendra à chacune des Parties à la Convention d’adopter les solutions les mieux adaptées à ses propres besoins, obligations et priorités, en tenant compte de la situation qui prédomine au plan national.

1.3 Sources d’information

Le présent document technique a été rédigé conformément aux règles établies à ce sujet lors de la onzième réunion du GIEC (Rome, 11 au 15 décembre 1995) et réinterprétées lors de la douzième réunion du Groupe. Les contributeurs et les représentants des gouvernements participants estiment qu’il est nécessaire de simplifier le processus de révision, afin que les documents techniques puissent être achevés dans des délais qui soient conformes aux besoins des Parties à la Convention-cadre sur les changements climatiques. En conséquence, pour rédiger le présent document technique, on s’est strictement fondé sur les informations tirées des différents rapports du GIEC et des ouvrages de référence appropriés mentionnés dans ces rapports

¹ Le présent texte s’inspire de plusieurs documents élaborés à l’intention du Groupe ad hoc du mandat de Berlin, et notamment des documents FCCC/AGBM/1995/4 et FCCC/AGBM/1996/2.

² Par énergie primaire, on entend l’énergie chimique contenue dans les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) ou la biomasse, l’énergie potentielle d’un réservoir d’eau, l’énergie électromagnétique du rayonnement solaire et l’énergie produite dans les réacteurs nucléaires. Cette énergie primaire est presque entièrement transformée en électricité, en combustibles tels que l’essence, le kérosène, le fioul, ou en charbon de bois; c’est ce qu’on appelle l’énergie secondaire. Les secteurs qui sont les utilisateurs finals de la filière énergétique fournissent divers services énergétiques : cuisson des aliments, éclairage, climatisation, réfrigération, transport et biens de consommation; ils utilisent, selon les circonstances, des formes d’énergie primaires ou secondaires.

ainsi que sur les modèles et scénarios utilisés pour obtenir les informations en question. En conformité avec ces exigences, les informations et les études qui n'ont été mentionnées dans aucun rapport du GIEC n'ont pas été prises en considération dans la présente analyse. On ne dispose toujours pas, dans la littérature disponible, d'informations cruciales sur les réductions potentielles auxquelles peuvent donner lieu les économies d'énergie ou de renseignements afférents à des mesures particulières; en l'absence de ces informations, les auteurs du présent rapport se sont fondés, dans certains cas, sur leurs propres estimations et sur leur jugement professionnel pour évaluer l'efficacité de ces mesures.

1.4 Mesures envisagées

Il est peu probable qu'on parvienne à mettre en œuvre des techniques et des pratiques destinées à réduire les émissions de gaz à effet de serre au-delà du rythme habituel de perfectionnement des techniques et de remplacement des équipements amortis en l'absence de mesures visant à encourager leur emploi. Vu que les circonstances diffèrent d'un pays ou d'une région à l'autre et qu'une multitude d'obstacles s'opposent actuellement à l'amélioration et à l'application de ces techniques et pratiques, il n'existe pas de mesure qui permette à elle seule de mener à bien l'élaboration, l'adoption et la diffusion des diverses solutions possibles en matière d'atténuation. On aura plutôt recours à un ensemble de mesures adaptées aux particularités nationales, régionales et locales. Ces mesures doivent traduire la forte disparité des ressources institutionnelles, sociales, culturelles, économiques, techniques et naturelles dont disposent les divers pays et régions, et leur combinaison optimale variera d'un pays à l'autre. Ces ensembles de mesures devraient permettre de lever les obstacles à la commercialisation, à la diffusion et au transfert des techniques de réduction des émissions de GES, à mobiliser les ressources financières indispensables, à faciliter le renforcement des capacités dans les pays en développement et les pays à économie de transition et à faire évoluer les comportements. Un certain nombre de mesures pertinentes peuvent être mises en œuvre pour d'autres raisons que l'atténuation du changement climatique, et notamment afin d'accroître l'efficacité ou de résoudre des questions économiques et environnementales de portée locale ou régionale.

Les auteurs du présent document ont analysé un éventail de mesures possibles : programmes axés sur le marché (taxes sur le carbone ou l'énergie, fixation des prix en fonction du coût complet, octroi ou suppression de subventions, permis ou contingents d'émission négociables); accords volontaires (normes concernant la consommation d'énergie et les émissions carboniques, achats gouvernementaux³, programmes visant à promouvoir les produits à haut rendement énergétique); dispositions réglementaires (normes obligatoires en matière d'équipement ou de construction, interdiction de certains produits et procédés, permis ou contingents d'émission non négociables); recherche, développement et démonstration. Certaines de ces mesures pourraient être appliquées à l'échelon national ou international.

1.4.1 Communication d'informations et renforcement des capacités

La communication d'informations et le renforcement des capacités sont considérés comme des éléments indispensables de bon nombre des mesures et des politiques examinées dans le présent document et ne font donc pas, en général, l'objet d'un examen distinct.

Pour que les techniques et les technologies de réduction des émissions de GES puissent être communiquées avec succès à un grand nombre d'utilisateurs, il est nécessaire de déployer des efforts concertés pour diffuser les informations voulues au sujet de leurs divers aspects techniques et économiques ainsi qu'à propos des modalités de leur gestion. Il faut en outre consentir des efforts dans le domaine de la formation, de sorte que les programmes puissent être mis en œuvre avec succès. Le transfert international de connaissances vers les pays ne figurant pas à l'Annexe I est encore assez limité. Il pourrait être fort judicieux que les organismes de prêt et tous ceux qui accordent leur aide incluent l'information et la formation dans leurs programmes d'assistance et de prêt. Des organismes internationaux tels que l'Institut des Nations Unies pour la formation et la recherche (UNITAR) peuvent jouer un rôle de premier plan en matière d'information et de formation pour ce qui concerne le transfert de technologie relative aux GES. Les organisations internationales et nationales du commerce peuvent aussi prendre une part active dans ce domaine.

Au nombre des mesures d'information et d'éducation figurent les efforts déployés pour informer les décideurs du secteur privé et infléchir ainsi leur comportement. Ces efforts peuvent contribuer à pallier la relative méconnaissance des caractéristiques économiques, environnementales ou autres des techniques d'avenir qui sont déjà applicables ou que l'on met actuellement au point. Certaines mesures d'information ont facilité l'élaboration et la commercialisation de nouvelles techniques d'approvisionnement en énergie et de gestion de la demande à l'échelon national ou régional. De plus, l'information et l'éducation peuvent contribuer à façonner les pratiques socio-économiques ainsi que les conduites eu égard à la façon dont les services énergétiques sont fournis et sollicités. Il est cependant difficile d'évaluer avec précision l'incidence des programmes d'information et d'éducation sur les émissions de gaz à effet de serre.

La formation et le renforcement des capacités sont des éléments indispensables d'une meilleure compréhension du changement climatique et de la formulation de politiques et de mesures appropriées permettant d'y faire face et jouent souvent un rôle déterminant dans la diffusion en temps opportun de l'information à tous les niveaux de la société et dans l'acceptation des nouvelles réglementations ou des accords volontaires.

³ Compte tenu de leurs effets potentiels sur l'établissement du marché, les achats gouvernementaux sont considérés comme un programme fondé sur les lois du marché dans certains chapitres du présent document.

Encadré 2. Critères d'évaluation des techniques et mesures

1. Gaz à effet de serre et autres considérations touchant l'environnement
 - Ampleur possible de la réduction des émissions de GES
 - Nombre de tonnes d'équivalent carbone⁴
 - Pourcentage du niveau de référence (scénario IS92a) et des niveaux limites (scénarios IS92c et e)
 - Autres considérations touchant l'environnement
 - Variation en pourcentage des émissions d'autres gaz ou particules
 - Diversité biologique, conservation des sols, aménagement des bassins versants, qualité de l'air à l'intérieur des habitations, etc.
2. Considérations d'ordre économique et social
 - Rapport coût-efficacité
 - Coûts moyens et marginaux
 - Considérations relatives aux projets
 - Dépenses d'investissement et frais d'exploitation, coûts d'opportunité et coûts supplémentaires
 - Aspects macroéconomiques
 - PIB, nombre d'emplois créés ou perdus, incidences sur les taux d'inflation ou d'intérêt, répercussions sur le développement à long terme, changes et commerce extérieur, autres avantages ou inconvénients économiques
 - Considérations relatives à l'équité
 - Disparité des incidences sur les pays, les tranches de revenus ou les générations futures
3. Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
 - Charge administrative
 - Capacités institutionnelles de mener à bien les opérations nécessaires en matière de collecte des informations, de surveillance, de mise à exécution, d'autorisation, etc.
 - Considérations politiques
 - Capacité d'endurer les procédés politiques et bureaucratiques et de maintenir un appui politique
 - Cohérence avec les autres mesures d'intérêt public
 - Reproductibilité
 - Faculté d'adaptation aux différentes particularités géographiques, socio-économiques et culturelles

Le renforcement des capacités peut en outre contribuer à catalyser et à accélérer la mise au point de techniques d'approvisionnement durable en énergie.

1.4.2 *Coordination et cadre institutionnel au plan international*

Les questions d'équité, au même titre que les considérations touchant la compétitivité économique à l'échelle internationale, peuvent nécessiter de conforter certaines mesures par des accords régionaux ou internationaux, alors que d'autres politiques peuvent être mises en œuvre de façon unilatérale. Il est par conséquent primordial de définir jusqu'à quel point une mesure particulière peut requérir ou tirer profit d'une "action commune" et de déterminer la forme que cette action peut prendre. C'est ainsi qu'un certain nombre de pays peuvent se regrouper dans l'intention d'adopter des mesures communes, de coordonner la mise en application de mesures analogues ou de s'employer à atteindre des objectifs communs, tout en faisant preuve d'une certaine souplesse pour ce qui concerne les techniques, les mesures et les politiques utilisées. Parmi les autres formes d'action concertée pourraient figurer l'élaboration d'un menu commun d'actions positives où chaque pays choisirait les mesures les mieux adaptées à sa situation, ou encore l'instauration de protocoles de coordination régissant la

surveillance et la comptabilité des réductions d'émissions ou la mise en train et la surveillance d'initiatives internationales concernant les droits d'émission négociables.

Le présent document ne donne lieu à aucune évaluation des différents niveaux ou types de coordination internationale; les éléments de l'analyse illustrent plutôt les avantages et les inconvénients potentiels des mesures prises, aussi bien au plan national qu'à l'échelon international.

1.5 Critères d'analyse

Pour définir une structure et une base de comparaison communes des diverses solutions envisageables, les auteurs ont élaboré un ensemble de critères permettant d'analyser les différentes techniques et mesures (voir encadré 2). Ces critères orientent l'examen vers certains des principaux avantages et inconvénients d'un large éventail de mesures.

⁴ Les équivalents carbone correspondant aux GES autres que le CO₂ sont calculés à partir des équivalents CO₂ en fonction des potentiels de réchauffement de la planète (PRP) centennaux : CH₄ = 21, N₂O = 310 (SAR I, 2.5, tableau 2.9).

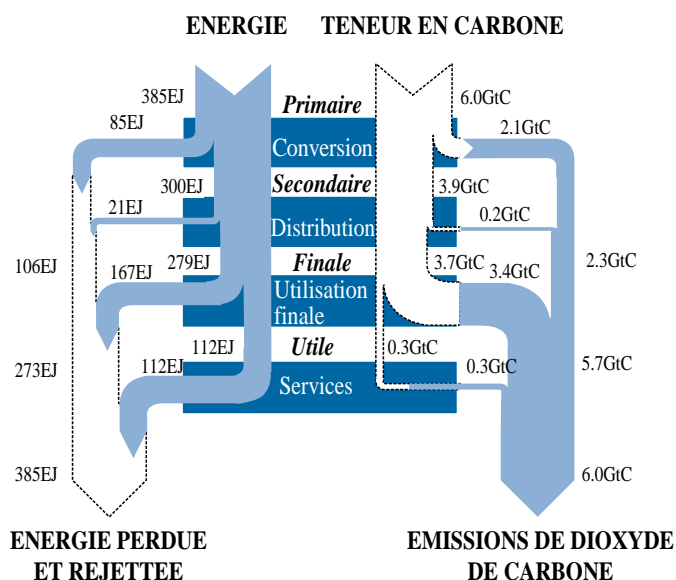


Figure 1 : Principaux flux d'énergie et de carbone au sein de la filière énergétique mondiale en 1990 [en exajoules (EJ) et en milliards de tonnes de carbone élémentaire (GtC)]. Les flux de carbone ne prennent pas en compte la biomasse (SAR II, B.2.1, figure B-2).

Les auteurs ont axé leurs évaluations sur les principaux critères (réduction des émissions de gaz à effet de serre et autres résultats en matière d'environnement; conséquences économiques et sociales; considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique) et ont incorporé des éléments de ces trois catégories dans l'examen de chacune des techniques et des mesures considérées (voir les tableaux à la fin de chaque chapitre). Compte tenu du format limité du présent document et de l'ampleur des sujets couverts, il n'a pas été possible d'apprécier les diverses options à partir de chacun des critères détaillés énumérés. Il est en particulier difficile d'évaluer avec précision l'efficacité des différents instruments en matière de réduction des émissions, les coûts économiques de ces initiatives tant à l'échelle des projets qu'au plan macroéconomique ainsi que des facteurs tels que les autres sortes d'incidences de la mise en œuvre de ces options sur l'environnement. Dans certains cas, les auteurs ne sont pas parvenus à quantifier le rapport coût-efficacité ou à apprécier pleinement d'autres considérations de coût prises en compte dans les critères d'évaluation. Il se peut qu'on ne puisse mener à bien cette estimation des coûts, du fait que ces derniers sont fonction de la solution technique particulière que l'on cherche à promouvoir et des moyens que l'on consacre à son application; les pays figurant à l'Annexe I n'ont guère donné de précisions sur les coûts des mesures, et l'on ne trouve aucune estimation de ces coûts dans les publications actuellement disponibles. L'évaluation de l'efficacité de ce large éventail de techniques et de mesures est encore compliquée par le fait qu'il est nécessaire de tenir compte des aspects de la mise en application qui peuvent influencer sur les résultats obtenus et que l'efficacité d'une mesure donnée varie généralement selon la nature des autres mesures qui l'accompagnent.

Les critères sur lesquels se fondent les gouvernements pour évaluer les différentes techniques et mesures – et le degré de

priorité accordé à ces divers critères – peuvent différer des critères mentionnés ici. Les informations fournies au sujet de l'efficacité des techniques et des mesures décrites dans le Deuxième Rapport d'évaluation au regard de ces critères ont pour objet de faciliter l'action des gouvernements au moment du choix des solutions.

1.6 Projections de référence concernant la consommation d'énergie et les émissions de dioxyde de carbone

Jusqu'ici, la consommation mondiale d'énergie a augmenté à un rythme annuel moyen d'environ 2 % pendant près de deux siècles, bien que ce rythme ait varié considérablement selon l'époque et la région considérées. Le principal gaz à effet de serre est le dioxyde de carbone (CO₂), qui est à l'origine de plus de la moitié de la progression du forçage radiatif d'origine anthropique. La plus grande partie du CO₂ résulte de l'utilisation des combustibles fossiles, qui représente à son tour 75 % environ de la consommation totale d'énergie à l'échelle du globe.

L'énergie consommée en 1990 a entraîné l'émission de 6 gigatonnes de carbone (GtC) sous la forme de CO₂. Environ 72 % de cette énergie ont servi à approvisionner les utilisateurs finals, donnant lieu à l'émission de 3,7 GtC sous forme de CO₂; quant aux 28 % restants, ils ont servi à la conversion et à la distribution de l'énergie, ce qui s'est traduit par l'émission de 2,3 GtC sous forme de CO₂ (figure 1). En 1990, les trois secteurs d'utilisation finale de l'énergie responsables des plus fortes émissions de CO₂ résultant de l'utilisation directe de combustibles ont été l'industrie (45 % des rejets totaux de CO₂), les transports (21 %) et les bâtiments à usage résidentiel, commercial ou institutionnel (29 %). Le secteur des transports est celui où la consommation d'énergie et la quantité de CO₂ rejeté se sont accrues le plus rapidement depuis 20 ans.

Comme l'indiquent les tableaux A3 et A4 de l'appendice A, les pays figurant à l'Annexe I sont de grands consommateurs d'énergie et sont responsables de la part la plus importante des émissions de CO₂ émanant de combustibles fossiles, même si cette part diminue régulièrement. Si les pays non cités à l'Annexe I rejettent au total moins de CO₂ que les pays qui y figurent, les projections indiquent néanmoins que leur part dans le processus d'émission augmentera de façon marquée d'ici à 2050, et cela dans tous les scénarios.

On estime la capacité d'atténuation de bon nombre de techniques et de mesures à l'aide d'une série de projections de référence fournies par les scénarios IS92 "a", "c" et "e" mis au point par le GIEC pour 2010, 2020 et 2050 (voir tableaux A1 à A4 à l'appendice A). Ces scénarios (GIEC 1992, 1994) décrivent la situation actuelle pour ce qui concerne la consommation mondiale d'énergie et les émissions globales de gaz à effet de serre et proposent une série de projections fondées sur les hypothèses et les informations conjoncturelles disponibles à la fin de 1991, en l'absence de toute mesure d'atténuation. Outre qu'ils procurent un niveau de référence commun et cohérent auquel les auteurs comparent les

réductions, en pourcentage, de la consommation d'énergie et des émissions connexes de GES, les scénarios IS92 permettent de procéder à une estimation approchée de l'influence des différentes techniques et mesures sur l'ampleur possible de la réduction des émissions. Ces scénarios ne tiennent pas compte de l'évolution rapide des conjonctures économiques nationales dans plusieurs pays à économie de transition cités à l'Annexe I, et ce facteur n'est par conséquent pas pris en considération dans les éléments quantitatifs des analyses effectuées.

Selon les scénarios IS92, la demande mondiale d'énergie devrait continuer à progresser, au moins pendant la première moitié du siècle prochain. En l'absence d'interventions, les émissions de CO₂ augmenteront, même si cet accroissement est moins prononcé que celui de la consommation énergétique; la décarbonation des sources d'énergie à l'échelle du globe ne parviendra pas à compenser le taux de croissance annuel moyen de la demande mondiale d'énergie, qui s'établit à 2 %.

2. SECTEUR DES BÂTIMENTS À USAGE RÉSIDENTIEL, COMMERCIAL ET INSTITUTIONNEL⁵

2.1 Introduction

D'après les estimations, les bâtiments à usage résidentiel, commercial et institutionnel étaient responsables en 1990 d'environ un tiers de la consommation globale d'énergie et des émissions correspondantes de carbone, aussi bien dans les pays cités à l'Annexe 1 que dans le monde. Dans les pays cités à l'Annexe I, le secteur a consommé, en 1990, 86 EJ d'énergie primaire et émis 1,4 GtC, soit environ 75 % de la consommation mondiale par le secteur (112 EJ, avec 1,9 GtC d'émissions correspondantes)⁶. On prévoit cependant que la consommation énergétique et les émissions correspondantes attribuées aux pays cités à l'Annexe I diminueront; selon le scénario IS92a, la part des émissions des pays cités à l'Annexe I imputables au secteur des bâtiments passera environ à 70 % en 2020 et à légèrement plus de 50 % en 2050.

L'amélioration du rendement énergétique dans le secteur des bâtiments, par le biais d'une utilisation accrue des techniques disponibles d'un bon rapport coût-efficacité, peut conduire à des réductions marquées des émissions de CO₂ et d'autres GES imputables à la production, à la distribution et à l'utilisation des combustibles fossiles et de l'électricité nécessaires à toutes les activités consommatrices d'énergie menées dans les bâtiments à usage résidentiel, commercial et institutionnel. Le secteur en question se caractérise par la grande diversité à la fois des utilisations finales de l'énergie et des types de constructions érigées sous toutes sortes de climats. Ces deux dernières décennies en particulier, les pays cités à l'Annexe I ont élaboré et mis en place de nombreuses techniques et mesures pour réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments.

Le tableau 1 résume les mesures et les solutions techniques visant à atténuer les émissions de GES dans le secteur. Il fournit aussi, pour chaque mesure, une brève description des incidences favorables sur le climat et l'environnement ainsi que les conséquences économiques et sociales (y compris les coûts d'application des mesures) et les considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique. Les tableaux 2 et 3 présentent, l'un pour l'ensemble de la planète et l'autre pour les pays cités à l'Annexe I, les estimations des réductions d'émissions qu'à la fois les techniques à haut rendement énergétique et les mesures d'amélioration du rendement énergétique permettraient de réaliser⁷. Les estimations des réductions attribuables aux techniques à haut rendement énergétique sont fondées sur les études décrites dans le deuxième rapport d'évaluation (SAR), et l'on a fait appel à des experts pour calculer par extrapolation la situation dans le monde ainsi que les réductions possibles en 2020 et en 2050, puisque la plupart des études en question ne proposent des évaluations d'économies d'énergie que pour 2010. Les estimations des réductions attribuables aux techniques à haut rendement énergétique découlant de l'application de mesures sont fondées sur des avis d'experts quant à l'efficacité des politiques envisagées. Il ne faut pas additionner

les deux catégories de réductions : "Réductions attribuables aux techniques à haut rendement énergétique" et "Réductions attribuables aux techniques à haut rendement énergétique découlant de l'application de mesures", car la deuxième catégorie correspond à une estimation de la partie de la première qui découlerait de l'adoption des mesures indiquées.

2.2 Techniques de réduction des émissions de GES dans le secteur des bâtiments à usage résidentiel, commercial et institutionnel

Pour réduire de façon sensible les émissions de GES dans le secteur des bâtiments, il conviendrait d'accélérer l'application, dans l'industrie du second œuvre (appareils électroménagers, systèmes de chauffage et de climatisation, éclairage et autres appareils électriques), de techniques visant à réduire la consommation énergétique et de réduire les pertes d'énergie relatives au chauffage et à la climatisation par l'amélioration de l'intégrité thermique des bâtiments (SAR II, 22.4.1, 22.4.2). Il existe d'autres moyens efficaces de réduire les émissions de GES : un urbanisme et une planification de l'utilisation des sols qui privilégieraient les économies d'énergie et réduiraient les îlots de chaleur urbains (SAR II, 22.4.3); le remplacement des hydrocarbures (SAR II, 22.4.1.1, tableau 22-1); l'amélioration de l'efficacité des systèmes de climatisation et de chauffage urbains (SAR II, 22.4.1.1.2, 22.4.2.1.2); l'utilisation de techniques de construction s'inscrivant dans l'optique du développement durable (SAR II, 22.4.1.1); l'installation correcte, la bonne utilisation et le bon dimensionnement de l'équipement ainsi que l'utilisation de systèmes de gestion énergétique des bâtiments (SAR II, 22.4.2.1.2). Le remplacement des biocombustibles solides par un combustible liquide ou gazeux ou encore l'application de techniques de pointe à l'utilisation des biocombustibles solides apporterait des réductions importantes d'émissions de GES autres que le CO₂. On estime (avec une incertitude considérable) que l'utilisation de la biomasse engendre des émissions de 100 MtC par an en équivalent-CO₂, provenant principalement des produits d'une combustion incomplète dotés d'un potentiel de réchauffement du globe (SAR II, résumé à l'intention des décideurs).

⁵ Pour rédiger le présent chapitre, les auteurs se sont inspirés du document SAR, chapitre 22 (auteurs principaux : M. Levine, H. Akbari, J. Bosh, G. Dutt, K. Hogan, P. Komor, S. Meyers, H. Tsuchiya, G. Henderson, L. Price, K. Smith et Lang Siwei).

⁶ Ces chiffres sont fondés sur les scénarios IS92.

⁷ Les tableaux 2 et 3 ne comprennent que les émissions de carbone découlant de l'utilisation des combustibles vendus sur le marché. Ils ne tiennent pas compte des grandes quantités de biocombustibles utilisés dans les pays en développement pour la cuisson des aliments. Le remplacement des biocombustibles ainsi utilisés par des combustibles renouvelables constituant une solution écologiquement viable, tels que le biogaz ou l'alcool, pourrait réduire ces émissions (SAR II, 22.4.1.4).

Tableau 1 : Exemples choisis de mesures et de solutions techniques visant à atténuer les émissions de GES dans le secteur des bâtiments

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
<p>Second œuvre</p> <ul style="list-style-type: none"> – Chauffage – Chaudière à condensation – Thermopompe électrique utilisant l'air comme source – Thermopompes utilisant le sol comme source <p>Climatisation</p> <ul style="list-style-type: none"> – Climatiseurs à haut rendement énergétique <p>Chauffage de l'eau</p> <ul style="list-style-type: none"> – Chauffe-eau à haut rendement énergétique – Chauffe-eau à thermopompe utilisant comme l'air comme source – Chauffe-eau à thermopompe utilisant l'air évacué comme source 	<p>Programmes axés sur le marché</p> <ul style="list-style-type: none"> – Accords volontaires – Attraction des besoins sur le marché et agrégation de marchés – Programmes d'incitation au progrès dans le domaine – Gestion de la demande de services publics – Entreprises de services énergétiques 	<p>Incidences favorables sur le climat</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des émissions dues aux bâtiments atteignant 2,5 à 4 % d'ici à 2010 – Réduction des émissions dues aux bâtiments atteignant 3 à 5 % d'ici à 2020 – Réduction des émissions dues aux bâtiments atteignant 5 à 13 % d'ici à 2050 <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Qualitativement analogues à ceux des normes obligatoires de rendement énergétique 	<ul style="list-style-type: none"> – Qualitativement analogues à celles des normes obligatoires de rendement énergétique (voir ci-dessous), sans les coûts du matériel utilisé dans les laboratoires d'essai et de production initiale – Coûts du contrôle et de la mise en oeuvre 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Difficultés quant à l'amélioration des systèmes intégrés – Besoin en personnel qualifié – Questions relatives aux incitations aux propriétaires ou aux locataires – Conception des programmes pour englober toutes les solutions – Nécessité de créer de nouvelles structures institutionnelles <p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Interfinancement par les subventions
<p>Réfrigération</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réfrigérateurs à haut rendement énergétique <p>Autres appareils</p> <ul style="list-style-type: none"> – Lave-linge à axe horizontal – Vitesse d'essorage plus élevée sur les lave-linge – Sèche-linge à thermopompe <p>Cuisson des aliments</p> <ul style="list-style-type: none"> – Fourneaux à biocombustible <p>Eclairage</p> <ul style="list-style-type: none"> – Ampoules fluorescentes compactes – Lampes à halogène – Ampoules fluorescentes à haut rendement énergétique – Ballasts électromagnétiques – Surfaces de réflexion spéculaires – Remplacement des lampes à pétrole – Systèmes de commande d'éclairage 	<p>Dispositions réglementaires</p> <ul style="list-style-type: none"> – Normes obligatoires de rendement énergétique 	<p>Incidences favorables sur le climat</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des émissions dues aux bâtiments atteignant 4 à 7 % d'ici à 2010 – Réduction des émissions dues aux bâtiments atteignant 6 à 10 % d'ici à 2020 – Réduction des émissions dues aux bâtiments atteignant 10 à 25 % d'ici à 2050 <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Incidences moindres, sur les sols, l'air et l'eau, des processus d'extraction, de transport et transmission, de conversion et de consommation de l'énergie 	<p>Aspects économiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Les réductions des émissions de carbone sont rentables quand on estime que le surcoût sera amorti en moins de cinq ans. <p>Aspects macroéconomiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Economies avantageuses pour l'économie <p>Conséquences au niveau des projets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Besoin en personnel qualifié – Coût des analyses, des essais et de la formation – Coûts du matériel utilisé par les laboratoires d'essai – Coûts de production initiale – Nécessité de créer de nouvelles structures institutionnelles – Modification des caractéristiques des produits 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Capacité d'analyse, d'essai et d'évaluation – Laboratoires d'essai – Matériel d'attestation de conformité – Accords national, régional et international sur les méthodes d'essai et sur la sévérité des normes – Mobilisation de fonds destinés aux essais – Moindres besoins en puissance installée <p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Opposition des fabricants – Opposition d'autres groupes touchés – Apaisement des préoccupations environnementales et des inquiétudes des consommateurs

Tableau 1 (suite)

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
<ul style="list-style-type: none"> – Matériel de bureau – Ordinateurs à haut rendement énergétique – Matériel à mode de fonctionnement à faible consommation d'énergie Moteurs – Variateurs de vitesse – Moteurs à haut rendement énergétique Gestion de l'énergie – Systèmes de gestion énergétique de bâtiments – Systèmes de gestion énergétique perfectionnés 	<p>Mesures volontaires</p> <ul style="list-style-type: none"> – Normes de rendement énergétique librement adoptées 	<p>Incidences favorables sur le climat</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des émissions mondiales atteignant 10 à 50 % des réductions attribuables aux normes obligatoires <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Analogues à ceux des normes obligatoires de rendement énergétique 	<ul style="list-style-type: none"> – Qualitativement analogues à celles des normes obligatoires de rendement énergétique 	<ul style="list-style-type: none"> – Qualitativement analogues à celles pour les normes obligatoires de rendement énergétique
<p>Intégrité thermique des bâtiments</p> <ul style="list-style-type: none"> – Meilleure étanchéité des conduites – Orientation adéquate – Isolation et étanchéité – Fenêtres à haut rendement énergétique 	<p>Programmes axés sur le marché</p> <ul style="list-style-type: none"> – Systèmes d'évaluation des économies d'énergie domestiques – Aide aux architectes et aux constructeurs dans le domaine de la gestion de la demande de services publics – Programmes d'achat dans le bâtiment 	<p>Incidences favorables sur le climat</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des émissions dues aux bâtiments de 1,5 à 2 % d'ici à 2010 – Réduction des émissions dues aux bâtiments de 1,5 à 2,5 % d'ici à 2020 – Réduction des émissions dues aux bâtiments de 2 à 5 % d'ici à 2050 <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Qualitativement analogues à ceux des normes obligatoires de rendement énergétique 	<ul style="list-style-type: none"> – Qualitativement analogues à celles des normes obligatoires de rendement énergétique dans le second œuvre, sans les coûts du matériel utilisé dans les laboratoires d'essai et de production initiale – Coûts du contrôle et de la mise en œuvre 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Difficultés quant à l'amélioration des systèmes intégrés – Besoin en personnel qualifié – Questions relatives aux incitations aux propriétaires ou aux locataires – Conception des programmes pour englober toutes les solutions – Nécessité de créer de nouvelles structures institutionnelles <p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Interfinancement par les subventions
	<p>Mesures réglementaires</p> <ul style="list-style-type: none"> – Normes obligatoires de rendement énergétique 	<p>Incidences favorables sur le climat</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des émissions dues aux bâtiments de 1,5 à 2 % d'ici à 2010 – Réduction des émissions dues aux bâtiments de 1,5 à 2 % d'ici à 2020 – Réduction des émissions dues aux bâtiments de 2 à 5 % d'ici à 2050 <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Qualitativement analogues à ceux des normes obligatoires de rendement énergétique 	<ul style="list-style-type: none"> – Qualitativement analogues à celles des normes obligatoires de rendement énergétique dans le second œuvre, mais coûts de formation et d'application probablement plus élevés 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Difficulté d'application – Difficulté du contrôle de la mise au normes <p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Opposition des constructeurs – Opposition d'autres groupes touchés – Apaisement des préoccupations environnementales et des inquiétudes des consommateurs

Remarque : Les pourcentages indiqués dans ce tableau correspondent aux valeurs absolues données dans la partie du tableau 2 intitulée "Réductions possibles attribuables aux techniques à haut rendement énergétique découlant de l'application de mesures". Pour faire correspondre les chiffres, il suffit d'établir la somme des réductions d'émissions en pourcentage pour les programmes axés sur le marché et pour les normes obligatoires de rendement énergétique, tant dans le cas du second œuvre que dans celui de l'intégrité thermique des bâtiments (ex. : la réduction de 2,5 à 4 % réalisable en 2010 grâce aux programmes axés sur le marché applicables au second œuvre, on ajoute la réduction de 1,5 à 2 % réalisable en 2010 grâce aux programmes axés sur le marché, applicables à l'intégrité thermique des bâtiments, pour obtenir 4 à 6 %, ce qui correspond à l'intervalle 95-160 MtC, indiqué dans le tableau 2, des réductions que les programmes axés sur le marché permettraient de réaliser).

Tableau 2 : Emissions annuelles de carbone dans le monde et potentiels de réduction des techniques et des mesures visant à réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments (en MtC), selon le scénario IS92a du GIEC

Emissions annuelles de carbone dans le monde imputables au secteur des bâtiments (en MtC)				
	1990	2010	2020	2050
Source des émissions – Cas de référence^a				
Bâtiments d'habitation	1 200	1 500	1 600	2 100
Bâtiments à usage commercial	700	1 000	1 100	1 700
TOTAL	1 900	2 500	2 700	3 800
Réductions des émissions annuelles de carbone dans le monde imputables au secteur des bâtiments (en MtC)				
Réductions possibles attribuables aux techniques à haut rendement énergétique, dans l'hypothèse de travaux de RD&D importants^b (fondées sur SAR)				
Second œuvre des bâtiments d'habitation ^c		300	400	840
Intégrité thermique des bâtiments d'habitation ^d		150	190	335
Second œuvre des bâtiments à usage commercial ^c		200	275	680
Intégrité thermique des bâtiments à usage commercial ^d		65	85	170
TOTAL DES RÉDUCTIONS POSSIBLES		715	950	2 025
Réductions possibles attribuables aux techniques à haut rendement énergétique découlant de l'application de mesure^e (fondées sur des avis d'experts)				
Normes obligatoires de rendement énergétique ^f		135–225	210–350	450–1,125
Normes librement adoptées de rendement énergétique		^g	^g	^g
Programmes axés sur le marché ^h		95–160	125–210	275–685
TOTAL DES RÉDUCTIONS RÉALISABLES		230–385	335–560	725–1 810
Remarque : Il ne faut pas additionner "Réductions possibles attribuables aux techniques à rendement énergétique élevé" et "Réductions possibles attribuables aux techniques à haut rendement énergétique découlant de l'application de mesures", car la deuxième catégorie correspond à la partie de la première qui découlerait de l'adoption des mesures indiquées.				
^a La ventilation entre les bâtiments d'habitation et ceux à usage commercial en 2010, 2020 et 2050 est fondée sur la répartition observée en 1990, soit 65 % pour l'habitation et 35 % pour le commercial (SAR II 22.2.1), et sur une augmentation prévue de l'importance du secteur commercial qui représentera 45 % en 2050.				
^b Sans efforts importants déployés en matière de RD&D, il sera impossible de réaliser quelques-unes des réductions prévues en 2010, une partie importante de celles prévues en 2020 et la plus grande partie des réductions prévues en 2050. Les réductions attribuables aux travaux de RD&D ne sont pas indiquées séparément, car on prend pour hypothèse qu'elles font partie des « Réductions possibles attribuables aux techniques à haut rendement énergétique ». Les chiffres fournis pour 2050 prennent en compte la possibilité de grandes percées dans le domaine de la RD&D.				
^c On inclut dans le second œuvre les appareils électroménagers, les systèmes de chauffage et de climatisation, l'éclairage et tous les autres appareils électriques (y compris le matériel de bureau). Les réductions possibles dans le second œuvre des bâtiments d'habitation et à usage commercial représentent dans les calculs 20 % des émissions de carbone des bâtiments d'habitation et à usage commercial en 2010, 25 % en 2020 et 40 % en 2050.				
^d Les réductions possibles dans le domaine de l'intégrité thermique des bâtiments d'habitation représentent dans les calculs 25 % des émissions attribuées à l'énergie utilisée pour chauffer et climatiser l'ensemble des bâtiments (40 % de la consommation totale d'énergie des habitations) en 2010, 30 % en 2020 et 40 % en 2050. Les réductions possibles dans le domaine de l'intégrité thermique des bâtiments à usage commercial représentent dans les calculs 25 % des émissions attribuées à l'énergie utilisée pour chauffer et climatiser l'ensemble des bâtiments (25 % de la consommation totale d'énergie des bâtiments à usage commercial) en 2010, 30 % en 2020 et 40 % en 2050.				
^e Il est possible d'ajouter aux réductions des émissions de carbone que les normes obligatoires de rendement énergétique permettraient de réaliser celles que les programmes axés sur le marché permettraient de réaliser, car les estimations sont prudentes et tiennent compte des possibilités d'interactions et de double comptabilité. Les réductions possibles des émissions de carbone varient entre 60 et 100 % des réductions calculées, comme cela est expliqué dans les renvois f et h pour 2010 et 2020, et entre 60 et 150 % des réductions calculées pour 2050 ; 60 % correspond à une application partielle des mesures, tandis que 150 % en 2050 sous-entend des percées dans le domaine de la RD&D.				
^f Les réductions des émissions de carbone que les normes obligatoires de rendement énergétique permettraient de réaliser représentent dans les calculs la somme suivante : 40 % des réductions dans le second œuvre des bâtiments d'habitation, 25 % des réductions dans le second œuvre des bâtiments à usage commercial et 25 % des réductions dans le domaine de l'intégrité thermique des bâtiments d'habitation et à usage commercial, en 2010, comme cela est décrit dans les renvois b et c et montré dans le tableau sous la rubrique "Réductions possibles attribuables aux techniques à haut rendement énergétique". Pour 2020 et 2050, les réductions représentent dans les calculs 50 % des réductions dans le second œuvre des bâtiments d'habitation, 30 % des réductions dans le second œuvre des bâtiments à usage commercial et 25 % des réductions dans le domaine de l'intégrité thermique des bâtiments d'habitation et à usage commercial.				
^g Les réductions des émissions de carbone que les normes librement adoptées permettraient de réaliser varient entre 10 et 50 % des estimations faites pour les normes obligatoires, en fonction de la manière de les appliquer et de la participation des fabricants. Compte tenu de l'incertitude, elles ne sont pas incluses dans le total des réductions réalisables				
^h Les réductions des émissions de carbone que les programmes axés sur le marché permettraient de réaliser représentent dans les calculs la somme suivante : 15 % des réductions dans le second œuvre des bâtiments d'habitation, 30 % des réductions dans le second œuvre des bâtiments à usage commercial et 25 % des réductions dans le domaine de l'intégrité thermique des bâtiments d'habitation et à usage commercial, en 2010. Pour 2020 et 2050, les réductions représentent dans les calculs 15 % des réductions dans le second œuvre des bâtiments d'habitation, 30 % des réductions dans le second œuvre des bâtiments à usage commercial et 25 % des réductions dans le domaine de l'intégrité thermique des bâtiments d'habitation et à usage commercial.				

Dans le secteur des bâtiments, il est possible d'améliorer de façon importante le rendement énergétique suivant un bon rapport coût-efficacité dans toutes les régions et pour toutes les utilisations finales principales. L'augmentation prévue de la demande d'énergie est en général considérablement plus grande dans les pays non cités à l'Annexe I, puisque la croissance démographique y est plus élevée et que l'on y projette une plus forte augmentation des services énergétiques par habitant (SAR II, 22.3.2.2). Bien que les modèles de développement varient sensiblement d'un pays et d'une région à l'autre, les tendances générales observées dans les pays à économie de transition cités à l'Annexe I et dans les pays non cités à l'Annexe I montrent un accroissement de l'urbanisation (SAR II, 22.3.2.2), une augmentation de la superficie consacrée au logement et de la consommation énergétique par habitant (SAR II, 22.3.2.2, 22.3.2.3), un accroissement de l'électrification (SAR II, 22.3.2.2), le remplacement des

biocombustibles par des combustibles fossiles pour la cuisson des aliments (SAR II, 22.4.1.4), une pénétration accrue des appareils électroménagers (SAR II, 22.3.2.3) et une augmentation de l'utilisation des systèmes de climatisation (SAR II, 22.4.1.1). Pour simplifier, les auteurs considèrent que, d'ici à 2020, la répartition des utilisations finales de l'énergie dans les zones urbaines des pays non cités à l'Annexe I sera équivalente à ce qu'elle est actuellement dans celles des pays cités à l'Annexe I, de sorte que les possibilités et les mesures d'économie d'énergie applicables à la plupart des appareils électroménagers, à l'éclairage, à la climatisation et au matériel de bureau seront analogues dans les deux groupes de pays. Le chauffage fait exception puisqu'il est vraisemblable que la consommation d'énergie dans ce domaine ne sera élevée que dans quelques-uns des pays non cités à l'Annexe I, notamment en Chine (SAR II, 22.2.1, 22.4.1.1.1). On admet en outre que l'éventail des possibilités d'économie d'énergie d'un bon

Tableau 3 : Emissions annuelles de carbone dans les pays cités à l'Annexe I et potentiels de réduction des techniques et des mesures visant à réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments (en MtC), selon le scénario IS92a du GIEC.

Emissions annuelles de carbone dans les pays cités à l'Annexe I imputables au secteur des bâtiments (en MtC)				
	1990	2010	2020	2050
Source des émissions – Cas de référence^a				
Bâtiments d'habitation	900	1 000	1 050	1 100
Bâtiments à usage commercial	500	700	750	900
TOTAL	1 400	1 700	1 800	2 000
Réductions des émissions annuelles de carbone dans les pays cités à l'Annexe I imputables au secteur des bâtiments(en MtC)				
Réductions possibles attribuables aux techniques à haut rendement énergétique, dans l'hypothèse de travaux de RD&D importantsb (fondées sur SAR)				
Second œuvre des bâtiments d'habitation ^c		200	260	440
Intégrité thermique des bâtiments d'habitation ^d		125	160	220
Second œuvre des bâtiments à usage commercial ^c		140	190	360
Intégrité thermique des bâtiments à usage commercial ^d		45	55	90
TOTAL DES RÉDUCTIONS POSSIBLES		510	665	1 110
Réductions possibles attribuables aux techniques à haut rendement énergétique découlant de l'application de mesurese (fondées sur des avis d'experts)				
Normes obligatoires de rendement énergétique ^f		95–160	145–240	245–610
Normes librement adoptées de rendement énergétique		<i>g</i>	<i>g</i>	<i>g</i>
Programmes axés sur le marché ^h		70–115	90–150	150–380
TOTAL DES RÉDUCTIONS RÉALISABLES		165–275	235–390	395–990

Remarque : Il ne faut pas additionner "Réductions possibles attribuables aux techniques à haut rendement énergétique" et "Réductions possibles attribuables aux techniques à haut rendement énergétique découlant de l'application de mesures", car la deuxième catégorie correspond à la partie de la première qui découlerait de l'adoption des mesures indiquées.

Les renvois sont les mêmes que ceux du tableau 2, sauf le suivant :

^d Les réductions possibles dans le domaine de l'intégrité thermique des bâtiments d'habitation représentent dans les calculs 25 % des émissions attribuées à l'énergie utilisée pour chauffer et climatiser l'ensemble des bâtiments (50 % de la consommation totale d'énergie des habitations) en 2010, 30 % en 2020 et 40 % en 2050. Les réductions possibles dans le domaine de l'intégrité thermique des bâtiments à usage commercial représentent dans les calculs 25 % des émissions attribuées à l'énergie utilisée pour chauffer et climatiser l'ensemble des bâtiments (25 % de la consommation totale d'énergie des bâtiments à usage commercial) en 2010, 30 % en 2020 et 40 % en 2050.

rapport coût-efficacité sera le même dans les deux groupes de pays en 2020.

2.2.1 *Second œuvre*

C'est dans le second œuvre qu'il serait possible de réaliser les économies d'énergie les plus importantes. Les économies d'énergie, efficaces par rapport à leur coût, applicables aux utilisations finales que regroupe le second œuvre varient en fonction du prix des produits et de l'énergie. Il est possible cependant qu'elles s'échelonnent entre 10 et 70 % (le plus souvent entre 30 et 40 %) si l'on remplace les techniques actuelles par des techniques à haut rendement énergétique, notamment : chaudières à condensation, thermopompes électriques utilisant l'air comme source, thermopompes utilisant le sol comme source, climatiseurs à bon rendement énergétique, chauffe-eau à thermopompe utilisant comme source de chaleur l'air extérieur ou encore l'air évacué, réfrigérateurs à bon rendement énergétique, lave-linge à axe horizontal, sèche-linge à thermopompe, fourneaux à pétrole, ampoules fluorescentes compactes, ampoules fluorescentes à bon rendement énergétique, ballasts électroniques, systèmes de commande d'éclairage, ordinateurs à bon rendement énergétique, moteurs électriques à variateur de vitesse et moteurs à bon rendement énergétique (SAR II, 22.4) (voir le tableau 1).

On prévoit que la part des bâtiments à usage résidentiel représentera, en 2010, 60 % de la consommation énergétique globale du secteur, et plus que 55 % en 2050. Compte tenu de ce pourcentage, le scénario IS92a montre que les émissions découlant de la consommation énergétique des bâtiments d'habitation atteindront 1,5 GtC en 2010, 1,6 GtC en 2020 et 2,1 GtC en 2050, tandis que, dans le cas des bâtiments à usage commercial, elles seront de 1 GtC en 2010, 1,1 GtC en 2020 et 1,7 GtC en 2050. Compte tenu de l'information présentée dans le deuxième rapport d'évaluation, les auteurs estiment que l'application de mesures d'amélioration des rendements énergétiques, dont le surcoût pour le consommateur serait amorti en cinq ans ou moins, permettrait de réduire les émissions de carbone provenant de l'ensemble des bâtiments à usage résidentiel et commercial de 20 % environ d'ici à 2010, de 25 % d'ici à 2020 et de jusqu'à 40 % d'ici à 2050, dans le cas d'un scénario de référence correspondant à une amélioration du rendement énergétique (voir la partie du tableau 2 intitulée : "Réductions possibles attribuables aux techniques à haut rendement énergétique").

2.2.2 *Intégrité thermique des bâtiments*

Dans les bâtiments d'habitation, le chauffage et la climatisation est nécessaire en grande partie en raison de l'échange thermique au niveau de l'enveloppe (parois, toits et fenêtres). On a estimé que la rénovation des bâtiments construits avant 1975 aux Etats-Unis d'Amérique, qui ne serait efficace par rapport au coût que dans la moitié des cas, permettrait une économie d'énergie atteignant 30 à 35 % entre 1990 et 2010. En appliquant les méthodes de construction employées en Suède à l'ensemble de l'Europe occidentale et à l'Amérique du Nord,

on pourrait réduire les besoins en chauffage de 25 % environ dans les nouveaux bâtiments, à comparer à ceux construits vers la fin des années 80 (SAR II, 22.4.1.1.1). Bien que dans les grands bâtiments à usage commerciaux la charge thermique tende à être principalement interne, des progrès dans la conception de l'enveloppe pourraient apporter d'importantes économies (SAR II, 22.4.2.1.1). Les économies possibles, efficaces par rapport à leur coût, sont bien plus considérables dans les nouvelles constructions que dans les bâtiments existants (SAR II, 22.5.1). Sachant que la croissance de la demande énergétique du secteur des bâtiments proviendra vraisemblablement, dans sa plus grande partie, des pays non cités à l'Annexe I et qu'elle sera principalement attribuable aux nouvelles constructions, on estime qu'il est fort possible d'y concrétiser ces économies considérables si les bâtiments y sont conçus et construits pour consommer peu d'énergie (SAR II, 22.4.1).

Compte tenu de l'information présentée dans le deuxième rapport d'évaluation et des avis recueillis auprès d'experts, les auteurs estiment que, dans l'ensemble, les améliorations de l'enveloppe des bâtiments (réduction des échanges thermiques, orientation convenable des bâtiments, fenêtres à haut rendement énergétique, et albédo des parois extérieures adapté au climat), dont le surcoût serait amorti en cinq ans (ou moins), permettraient une réduction de la consommation d'énergie servant au chauffage et à la climatisation dans les bâtiments d'habitation d'environ 25 % en 2010, de 30 % en 2020 et de jusqu'à 40 % en 2050, dans le cas d'un scénario de référence correspondant à une amélioration de l'intégrité thermique des bâtiments. Le chauffage et la climatisation représentent environ 40 % de la consommation d'énergie globale des bâtiments d'habitation, cette proportion devant baisser quelque peu. Les progrès réalisables en ce qui concerne l'intégrité thermique des fenêtres et des parois des bâtiments à usage commercial, dont le surcoût serait amorti en cinq ans ou moins, amèneraient quant à eux une réduction moindre des émissions de carbone à l'échelle mondiale. En effet, ce n'est que 25 % environ de la consommation d'énergie qui est imputable au chauffage et à la climatisation dans ce type de bâtiments et les réductions touchant les charges thermiques y sont plus difficiles à réaliser que dans les bâtiments d'habitation (voir la partie du tableau 2 intitulée : "Réductions possibles attribuables aux techniques à haut rendement énergétique"). Par ailleurs, ces réductions ne s'appliquent pour la plupart qu'aux bâtiments à usage commercial neufs, car il est onéreux d'améliorer le rendement énergétique des fenêtres et parois des bâtiments déjà construits.

2.3 **Mesures de réduction des émissions de GES dans le secteur des bâtiments à usage résidentiel, commercial et institutionnel**

Ces deux dernières décennies, une multitude de mesures ont été mises en place dans le but d'améliorer le rendement énergétique dans le secteur des bâtiments. Il est essentiellement question ici de quatre grands secteurs d'action par les pouvoirs publics : i) les programmes axés sur le marché, selon lesquels les consommateurs ou les fabricants bénéficient d'une assis-

tance technique et/ou d'incitations; ii) les normes obligatoires en matière de rendement énergétique, applicables au moment de la fabrication ou de la construction; iii) les normes librement adoptées en matière de rendement énergétique; et enfin iv) l'intensification des programmes publics ou privés de recherche, développement et démonstration (RD&D) en vue de mettre au point des produits de meilleur rendement énergétique. Pour pouvoir appliquer de telles mesures, il faudra préalablement établir des programmes d'information et de formation, mais il est difficile d'évaluer directement quelles seront les économies que ceux-ci permettront d'accomplir (SAR II, 22.5.1.6). Quant aux subventions et aux emprunts publics, il ne constituent pas un secteur distinct, mais sont considérés, dans le cadre des autres mesures, comme des moyens de réduire les coûts des investissements privés⁸.

Les mesures examinées ci-dessous fournissent souvent de meilleurs résultats lorsqu'elles sont combinées. Le meilleur moyen de concrétiser une proportion importante du potentiel d'amélioration du rendement énergétique selon un bon rapport coût-efficacité consiste à mettre en œuvre toute une série de programmes de réglementation, d'information, d'incitation et autres se renforçant mutuellement (SAR II, 22.5.1.8). Il est possible de regrouper les projets axés sur la demande afin qu'ils représentent une quantité d'énergie relativement importante et attirent ainsi des capitaux, en particulier dans les pays non cités à l'Annexe I (SAR II, 22.5.1.7). Il convient d'adapter avec soin les mesures à chaque cas en fonction des problèmes et obstacles propres aux différentes caractéristiques des bâtiments, notamment celles des bâtiments à usage commerciaux par opposition aux bâtiments d'habitation, des nouvelles constructions par opposition aux bâtiments rénovés et des bâtiments occupés par les propriétaires par opposition aux bâtiments occupés par des locataires. (SAR II, 22.5.1).

Pour toutes les mesures envisagées, il faut ajouter à la réduction des émissions de carbone attendue d'autres effets favorables sur l'environnement associés à l'utilisation d'appareils et de bâtiments d'un meilleur rendement énergétique, notamment une réduction des autres émissions provenant des centrales électriques (en particulier les oxydes de soufre, les oxydes d'azote et les particules), une réduction des incidences de l'extraction du charbon sur les sols et l'eau, une réduction du rejet dans l'atmosphère des substances toxiques émanant de l'exploitation des combustibles fossiles, ainsi que tous les autres effets favorables découlant d'une réduction de tous les processus d'extraction, de transport et de transmission, de conversion et d'exploitation de l'énergie (Levine *et al.*, 1994).

2.3.1 Programmes axés sur le marché

Il est possible de classer en cinq types les programmes axés sur le marché, qui apportent d'une façon ou d'une autre un encouragement à l'emploi de techniques et pratiques à haut rendement énergétique :

- Les *accords volontaires* avec les fournisseurs (en règle générale les industries et les propriétaires ou les exploitants de grands bâtiments à usage commercial), dans le cadre de

programmes gouvernementaux ou d'utilité publique, selon lesquels ceux-ci s'engagent à appliquer des mesures de bon rapport coût-efficacité visant à améliorer le rendement énergétique, en échange d'une assistance technique et commerciale (ex. : des programmes tels que *Green Lights*, *Motor Challenge* et *Energy Star Computers* lancés aux Etats-Unis d'Amérique par le Ministère de l'énergie et par l'Agence de protection de l'environnement) (SAR II, 22.5.1.6).

- Les *programmes d'achat* selon lesquels de très gros acheteurs (notamment l'Etat) commandent en grand nombre des appareils à haut rendement énergétique (SAR II, 22.5.1.1). On peut citer en exemple le programme suédois d'achats technologiques NUTEK et le regroupement des achats de technologies novatrices relevant de l'Agence internationale de l'énergie.
- Les *Programmes d'incitation des fabricants* selon lesquels la mise au point et la commercialisation de produits à haut rendement énergétique sont adjugés par mise en concurrence, le fabricant retenu recevant une aide substantielle (ex. : le programme américain de production de réfrigérateurs à très haut rendement énergétique SERP) (SAR II, 22.5.1.1).
- Les *programmes de gestion de la demande de services publics*, selon lesquels on encourage l'achat de produits à bon rendement énergétique (SAR II, 22.5.1.4).
- La création d'*entreprises de services énergétiques*, souvent encouragée dans le cadre de programmes gouvernementaux ou d'utilité publique, qui, pour bénéficier en partie de la réduction future des coûts de l'énergie, paient le coût complet des produits à bon rendement énergétique (SAR II, 22.5.1.4).

Il est possible de mettre en œuvre des programmes axés sur le marché en complément des normes ou à la place de celles-ci. Combinés à des normes, les programmes en question permettent d'introduire sur le marché des technologies novatrices plus tôt qu'elles n'auraient été acceptées selon le cours normal des choses. Combinés à des programmes productifs de RD&D en cours, de tels efforts auront vraisemblablement des effets à long terme importants sur la disponibilité et les performances de technologies de pointe à haut rendement énergétique. En ce qui concerne l'appareillage électroménager, l'éclairage et le matériel de bureau, de tels programmes peuvent influencer un très grand nombre d'acheteurs, parmi lesquels nombreux sont ceux pour qui le rendement énergétique du produit qu'ils comptent acquérir est relativement méconnu ou ne présente que peu d'intérêt. En combinant des programmes axés sur le marché à des normes obligatoires, on pourrait lever quelques-unes des difficultés associées à l'application de ces normes et donc renforcer grandement l'effet que cette application produirait isolément.

Il importe de noter que les programmes axés sur le marché peuvent s'appliquer aux installations d'immeubles (par opposition à des éléments distincts) pour réduire la consommation d'énergie qui résulte de problèmes liés à la conception, l'installation, l'entretien et le fonctionnement des systèmes de chauffage et de climatisation. Les exemples de tels problèmes

⁸ Voir aussi le chapitre 9 sur les instruments économiques.

sont nombreux : déséquilibres entre systèmes de traitement de l'air et dispositifs de refroidissement, absence ou mauvais fonctionnement de systèmes de régulation, fonctionnement simultané du chauffage et de la climatisation dans différentes parties d'un même immeuble, etc.

Compte tenu des avis recueillis auprès d'experts, les auteurs estiment que les programmes axés sur le marché entraîneront une réduction des émissions mondiales de carbone imputables aux bâtiments qui atteindrait 5 % environ d'ici à 2010 par rapport aux projections (scénarios IS92), 5 à 10 % environ d'ici à 2020 et 10 à 20 % environ d'ici à 2050 (voir la partie du tableau 2 intitulée : "Réductions possibles attribuables aux techniques à haut rendement énergétique découlant de l'application de mesures"). Les auteurs tiennent compte dans leurs estimations de la partie des économies annulée par l'augmentation des services (plus grand nombre d'appareils utilisés).

Les enquêtes réalisées aux Etats-Unis d'Amérique sur les coûts et les effets favorables de ces programmes montrent en général que ceux-ci présentent un rapport coût-efficacité avantageux. Il est cependant impossible de généraliser en raison du caractère restreint des analyses et étant donné que les coûts et les économies sont fonction des technologies mises en avant et du mode d'application des programmes.

Voici les grands problèmes d'ordre administratif, institutionnel et politique soulevés par la mise en œuvre de tels programmes adaptés au second œuvre des bâtiments d'habitation et à usage commercial :

- La difficulté d'améliorer les systèmes intégrés.
- Le nombre insuffisant de professionnels qualifiés capables de diagnostiquer et de résoudre les problèmes associés aux systèmes.
- L'obstacle important à l'amélioration du rendement énergétique découlant du fait que souvent l'énergie n'est pas payée directement par ceux qui la consomment (SAR II, 22.5.1).
- La nécessité de structurer les mesures d'incitation afin que les interventions en faveur des bâtiments visent à faire appliquer toutes les mesures efficaces par rapport au coût en faveur d'une amélioration du rendement énergétique.
- La nécessité de créer des structures institutionnelles qui permettraient aux programmes axés sur le marché d'atteindre leurs objectifs.
- Les formes d'interfinancement à craindre et l'injustice qu'il faut y associer en matière de dépenses.

2.3.2 Dispositions réglementaires

Dans le secteur des bâtiments d'habitation et à usage commercial, les normes obligatoires de rendement énergétique constituent un dispositif de réglementation important. Elles permettent aux pouvoirs publics d'exiger que les critères établis en matière de consommation d'énergie soient respectés pour tous les produits (ou un échantillon moyen de tous les produits) fabriqués et tous les bâtiments construits. Ces normes présentent

le plus grand potentiel économiquement réalisable dans le secteur (SAR II, 22.5.1.2, 22.5.1.3). En règle générale, les appareils électroménagers ont une durée de vie allant de 10 à 20 ans (SAR II, 22.4.1.5) ; quant aux appareils de chauffage et de climatisation, on les remplace au bout d'une durée un peu plus longue. Compte tenu de cette rapidité de renouvellement, il est possible de remplacer assez vite les appareils d'un faible rendement énergétique par des appareils plus efficaces répondant aux normes établies. Les bâtiments d'habitation et à usage commercial durent cependant d'ordinaire entre 50 et 100 ans.

Les auteurs estiment (compte tenu des avis recueillis auprès d'experts) que l'application de normes obligatoires aux appareils électroménagers, aux autres matériels consommateurs d'énergie et à l'enveloppe des bâtiments entraînerait, en fonction du degré de sévérité des normes, une réduction des émissions de carbone imputables aux bâtiments dans le monde qui atteindrait 5 à 10 % environ d'ici à 2010 par rapport aux projections (scénarios IS92), 10 à 15 % environ d'ici à 2020 et 10 à 30 % environ d'ici à 2050 (voir la partie du tableau 2 intitulée : "Réductions possibles attribuables aux techniques à haut rendement énergétique découlant de l'application de mesures"). Les auteurs tiennent compte dans leurs estimations de la partie des économies annulée par l'augmentation des services (plus grand nombre d'appareils utilisés).

En règle générale, les normes obligatoires de rendement énergétique sont établies en fonction de leur rapport coût-efficacité de sorte que les économies d'énergie équilibrent tous les surcoûts que représentent les produits ou les bâtiments de meilleur rendement énergétique. Ces normes permettent donc une réduction des émissions de carbone à un coût net moyen négatif. Si l'on prend pour exemple les incidences, au cours de la période de 1990 à 2015, des normes s'appliquant aux appareils électroménagers dans les bâtiments d'habitation, promulguées par la loi des Etats-Unis d'Amérique sur les appareils électroménagers et les économies d'énergie (NAECA), on estime actuellement que les coûts nets totaux des normes imposées aux Etats-Unis d'Amérique s'élèveront à 32 milliards de dollars tandis que les économies nettes atteindront 78 milliards de dollars (en EU\$ de 1987) (Levine *et al.*, 1994).

Les coûts d'exécution des projets découlant de l'application des normes obligatoires comprennent les coûts des programmes attribuables à l'analyse, aux essais et à l'évaluation des produits. Dans les pays ou groupes de pays où la demande en appareils électroménagers augmente et qui ne disposent pas des aménagements voulus, il faudra installer des laboratoires et du matériel d'essai pour certifier les performances des appareils en question. Parmi les dépenses importantes à engager, il faut aussi inclure les investissements nécessaires pour lancer la fabrication de nouveaux produits à bon rendement énergétique, la nécessité de former le personnel et la nécessité de créer de nouvelles structures institutionnelles.

Voici certains problèmes d'ordre administratif, institutionnel et politique soulevés par l'application de normes obligatoires de rendement énergétique :

- Une opposition de l'industrie pour diverses raisons (la perception d'une moindre rentabilité, les investissements accrus requis par les pouvoirs publics, les risques de faillite parmi les entreprises et d'une réduction de la concurrence).
- Une opposition de la part d'autres groupes qui subirait les effets néfastes de telles mesures (ex. : les services publics d'électricité, selon les normes imposées).
- La difficulté d'accorder différents pays sur des méthodes d'essai uniformes et des normes comparables, quand cela se révèle souhaitable.
- La difficulté de mobiliser des fonds pour les investir dans les laboratoires d'essai et pour payer l'exécution des essais nécessaires (problème particulièrement aigu dans les pays non cités à l'Annexe I, les bénéfices nets escomptés étant cependant bien plus importants que ces coûts).

Il faudra déployer des efforts importants pour surmonter ces difficultés. Beaucoup d'appareils électroménagers sont conçus, autorisés, fabriqués et vendus dans différents pays où les prix de l'énergie varient et où les consommateurs utilisent les appareils de façons différentes. Il sera donc probablement nécessaire, pour lever les nombreuses barrières institutionnelles, de conclure des ententes à l'échelle régionale quant au financement et à la mise en place des normes et des laboratoires d'essai, en particulier dans les pays à économie de transition cités à l'Annexe I et les pays non cités à l'Annexe I.

De l'application de normes obligatoires en matière de rendement énergétique découle aussi des avantages d'ordre administratif, institutionnel et politique. Ces normes permettraient entre autres d'apaiser les inquiétudes des consommateurs et les préoccupations environnementales, de réduire les besoins futurs en puissance installée et de donner crédit aux fabricants qui prennent l'initiative de lancer des produits à haut rendement énergétique, puisque des méthodes d'essai uniformes seraient adoptées. Par l'harmonisation des méthodes d'essai et des normes, on pourrait en outre réduire les coûts de fabrication qui découlent des différents critères à satisfaire.

2.3.3 Normes librement adoptées

Les normes de rendement énergétique que des fabricants et des constructeurs adoptent librement (sans que l'Etat promulgue de loi) pour fabriquer des produits ou construire des bâtiments en se conformant à des critères établis en matière de consommation d'énergie peuvent servir d'étape préalable ou de solution de remplacement aux normes obligatoires (SAR II, 22.5.1.2). En ce qui concerne les produits auxquels s'appliqueraient les normes librement adoptées, il faudra parvenir à des accords sur les méthodes d'essai, sur le matériel et les laboratoires d'essai appropriés nécessaires à l'attestation de conformité, et sur l'étiquetage de ces produits, ce qui satisferaient des exigences préalables à l'application de normes obligatoires. L'application de normes librement adoptées donne de meilleurs résultats dans le secteur commercial que dans le secteur du logement, probablement parce que les clients du secteur commercial sont mieux informés dans le domaine de la consommation et du rendement énergétique que les clients du secteur du logement.

Les réductions de consommation d'énergie et d'émissions de carbone que de telles normes permettraient d'obtenir varient grandement en fonction de la manière d'appliquer les normes et de la participation des fabricants. Compte tenu des avis recueillis auprès d'experts, les auteurs estiment que les normes librement adoptées entraîneraient une réduction des émissions de carbone dans le monde qui atteindrait entre 10 et 50 % des estimations faites pour les normes obligatoires (ou même plus encore en les renforçant par des mesures d'incitation importantes).

Les coûts d'exécution des projets découlant de l'application des normes librement adoptées (matériel et laboratoires d'essai et investissements initiaux) sont les mêmes que dans le cas des normes obligatoires. L'augmentation des investissements que nécessite la fabrication de produits d'un meilleur rendement énergétique sera cependant moindre, puisque, en principe, l'application de normes librement adoptées aura moins d'influence sur le marché.

Les problèmes d'ordre administratif, institutionnel et politique soulevés par l'application de normes de rendement énergétique librement adoptées sont analogues à ceux que soulèvent l'application de normes obligatoires, mais de moindre ampleur, en proportion avec leur capacité d'influer sur les gains de rendement énergétique en ce qui concerne les appareils électroménagers, d'autres équipements et les bâtiments.

2.3.4 Recherche, développement et démonstration

Les programmes de RD&D favorisent la création de nouvelles techniques, ce qui permet aux mesures adoptées d'avoir des effets à long terme. Les grandes industries et les gouvernements sont en général les seuls à disposer des ressources nécessaires pour mener de tels programmes et à avoir un intérêt dans ce sens. L'industrie du bâtiment étant très fragmentée, il lui est difficile de réunir des fonds pour mener des travaux de RD&D. De telles travaux subventionnés par les gouvernements ont joué un rôle essentiel dans la mise au point et la commercialisation de plusieurs techniques à haut rendement énergétique, telles que les fenêtres à faible émissivité, les ballasts électroniques et les compresseurs frigorifiques à haut rendement énergétique. Bien qu'il soit souvent possible de transmettre aux pays non cités à l'Annexe I les résultats des travaux de RD&D exécutés dans les pays cités à l'Annexe I, il existe des conditions particulières qui nécessitent une attention spéciale, notamment la conception et la construction de bâtiments sous des climats chauds et humides. Il est donc essentiel de mettre sur pied une infrastructure de RD&D qui permette la collaboration entre les chercheurs oeuvrant dans les pays non cités à l'Annexe I et les spécialistes en matière de RD&D des pays cités ou non à l'Annexe I. (SAR II, 22.5.1.5).

Le tableau 2 ne donne pas d'estimation quant à la réduction des émissions de carbone attribuable spécifiquement aux travaux de RD&D. Il y est noté par contre qu'il est essentiel de mener de tels travaux dans le domaine des mesures visant à utiliser l'énergie plus efficacement dans les bâtiments – ce qui comprend les améliorations des équipements, de l'isolation, des fenêtres, des parois

extérieures et particulièrement des installations d'immeubles – si l'on veut réaliser des économies d'énergie importantes après 2010. Il faut bien prendre conscience que, sans travaux efficaces de RD&D, il ne sera pas possible de concrétiser les réductions d'émissions que l'on peut envisager dans le secteur des bâtiments à usage résidentiel, commercial et institutionnel.

2.4 Réduction des émissions mondiales de carbone attribuables aux techniques et aux mesures adoptées dans le secteur des bâtiments à usage résidentiel, commercial et institutionnel

Les tableaux 2 et 3 donnent une idée de l'ensemble des réductions d'émissions que l'on pourrait réaliser, à l'échelle de la planète, dans le secteur des bâtiments à usage résidentiel, commercial et institutionnel. On estime que ces réductions atteindront 10 à 15 % environ des émissions prévues en 2010, 15 à 20 % en 2020 et 20 à 50 % en 2050, selon les scénarios IS92. En conséquence, la réduction totale réalisable des émissions de carbone imputables au secteur des bâtiments devrait varier approximativement (selon les scénarios IS92) de 0,175 à 0,45 GtC par an d'ici à 2010, de 0,25 à 0,70 GtC par an d'ici à 2020 et de 0,35 à 2,5 GtC par an d'ici à 2050.

Il est possible de différencier les mesures décrites en fonction des réductions d'émissions de carbone qu'elles permettraient de réaliser, de leur rapport coût-efficacité et des difficultés propres à leur application. Toutes ces mesures auront des conséquences favorables sur l'ensemble de l'économie, à condition que les économies d'énergie soit réalisées suivant un bon rapport coût-efficacité. Les effets favorables sur l'environnement sont approximativement proportionnels aux réductions de la demande d'énergie et donc à celles des émissions de carbone. Selon les mesures, les frais administratifs et les frais de transaction peuvent fortement varier. Certes les codes et les normes du bâtiment peuvent se révéler difficiles à administrer, mais de nombreux pays doivent à présent appliquer des mesures visant à introduire un minimum de rendement énergétique dans les nouvelles constructions. Beaucoup de programmes axés sur le marché sont relativement complexes à mettre en œuvre, mais il est souvent possible de les concevoir dans le but d'obtenir des économies qu'il serait très difficile de concrétiser autrement. Les programmes de normes applicables aux appareils électroménagers sont en principe les moins ardues à gérer, mais il peut se révéler difficile d'obtenir un consensus politique à leur sujet.

3. SECTEUR DES TRANSPORTS⁹

3.1 Introduction

D'après les estimations, la consommation d'énergie dans le secteur des transports libérait en 1990 des émissions de CO₂ équivalant à 1,25 GtC environ, soit un cinquième des émissions de CO₂ imputables à l'utilisation des combustibles fossiles (SAR II, 21.2.1). Les autres émissions de GES importantes imputables au secteur sont les suivantes : le N₂O, que l'on trouve dans les gaz d'échappement des automobiles équipées de pots catalytiques, les CFC et les HFC, qui s'échappent des systèmes de climatisation, et les NO_x que relâchent les aéronefs près de la tropopause (soit une altitude où l'ozone qui se forme à partir des NO_x est un GES très puissant). C'est dans le secteur des transports que l'on a observé la plus forte augmentation de la consommation d'énergie, soit en moyenne 2,4 % par an entre 1973 et 1990 (SAR II, 21.2.1).

Le transport des personnes et des biens qui permet de répondre à des besoins personnels, sociaux et économiques doit être considéré comme un secteur particulier dans lequel l'atténuation des émissions de GES représente un véritable défi (SAR II, 21.2.3). Le secteur pourrait aussi offrir des perspectives particulières en raison de la relative uniformité des véhicules dans leur conception et de celle des carburants dans leurs caractéristiques. Nombreux sont les intervenants dans ce secteur, notamment les utilisateurs des transports privés et commerciaux, les fabricants de véhicules, les producteurs de carburant, les constructeurs de routes, les aménageurs et les compagnies de transport. Les mesures visant à réduire les émissions de GES imputables aux transports mettent souvent en cause les intérêts

de l'un ou l'autre de ces intervenants. Les stratégies d'atténuation s'appliquant à ce secteur risquent fort d'échouer quand elle ne tiennent pas compte des préoccupations des intervenants et n'offrent pas de meilleurs moyens pour répondre aux besoins que les transports satisfont. Le choix des stratégies reposera sur les capacités économiques et techniques du pays ou de la région considéré (SAR II, 21.4.7).

3.2 Tendances et prévisions des émissions mondiales de carbone

Le tableau 4 montre la consommation d'énergie attribuable aux différents modes de transport en 1990, avec les quantités de CO₂ libérées, ainsi que deux scénarios possibles jusqu'à 2050 quant à l'évolution des émissions de CO₂ (SAR II, 21.2). Ces deux scénarios sont utilisés dans le présent chapitre en tant que base de calcul dans l'évaluation des effets des mesures visant à réduire les émissions de GES. On observe une réduction de l'intensité énergétique atteignant 0,5 à 1 % par an entre 1970 et 1990 dans les transports routiers et 3 à 3,5 % par an entre 1976 et 1990 dans les transports aériens. Le tableau fournit des écarts de valeurs pour l'accroissement futur de la circulation et la réduction future de l'intensité énergétique qui accuseront un

⁹ Pour rédiger le présent chapitre, les auteurs se sont inspirés du document SAR II, chapitre 21 (auteurs principaux : L. Michaelis, D. Bleiviss, J.-P. Orfeuill, R. Pischinger, J. Crayston, O. Davidson, T. Kram, N. Nakicenovic et L. Schipper).

Tableau 4 : Consommation mondiale d'énergie dans le secteur des transports jusqu'à 2050, selon deux scénarios : hypothèse basse (B) et hypothèse haute (H)^a

Mode de transport	Energie consommée en 1990 (EJ)	Emissions de CO ₂ en 1990 ^c (Mt C)	Croissance de la circulation ^d (%)	Intensité énergétique ^e (%)	Emissions de CO ₂ (Mt C)					
					2010		2020		2050	
					BAS	HAUT	BAS	HAUT	BAS	HAUT
Automobiles ou autres véhicules particuliers et utilitaires légers	30–35	555–648	1,4–2,1	–1,0–0,0	592	989	612	1 223	674	2 310
Poids lourds, autobus et autocars	20–23	370–426	1,9–2,7	–0,6–0,0	470	718	530	933	758	2 047
Transports aériens	8	148	3,2–4,0	–2,0–0,6	187	308	210	444	297	1 330
Autres modes (rail, voies d'eau intérieures)	4	74	0	–0,3–0,3	70	78	68	80	62	87
ENSEMBLE DU SECTEUR	63–71	1 166–1 314			1 318	2 094	1 418	2 680	1 791	5 774

^a Chiffres tirés de SAR II, 21,2,5 et 21,3,1, sauf indication contraire,

^b Chiffres tirés de SAR II, 21,2,1,

^c Les émissions de CO₂ sont obtenues ici à partir de la consommation d'énergie à laquelle est appliquée une constante d'émission égale à 18,5 MtC/EJ pour tous les modes de transport,

^d Chiffres tirés de SAR II, 21,2,4,

^e Consommation d'énergie par voiture-kilomètre; par tonne-kilomètre pour les transports de marchandises par route, par chemin de fer, par mer et par air; par passager-kilomètre pour les transports de passagers par route, par chemin de fer et par air,

ralentissement (SAR II, 21.2.5). Alors que la plupart des scénarios présentés dans la littérature spécialisée prévoient une réduction ininterrompue des taux de croissance de la consommation d'énergie, les deux scénarios utilisés dans le tableau sont fondés sur des taux de croissance constants. C'est pourquoi les estimations hautes en 2050 sont bien plus élevées que celles du scénario IS92e. Les estimations basses en 2050 sont de leur côté inférieures de 10 % environ à celles du scénario IS92c et il y a peu de chances pour qu'elles se concrétisent si le marché demeure relativement stable (pas de flambée des prix du pétrole, par exemple) ou si les pouvoirs publics ne lancent aucune nouvelle action pour réduire par exemple la pollution atmosphérique et les encombrements routiers dans les villes.

Jusqu'à 2050, il est fort probable que, dans le secteur des transports, les automobiles et les autres utilitaires légers, les poids lourds et les avions demeureront les principales sources de GES. A l'heure actuelle, tous ces sous-secteurs connaissent en Asie du Sud-Est une croissance annuelle en pourcentage particulièrement élevée et le taux de possession d'automobile s'accroît très rapidement dans certains pays de l'Europe centrale et orientale. Les deux-roues, et surtout les cyclomoteurs deux temps, constituent l'un des moyens de transport dont le nombre augmente le plus rapidement dans certaines régions de l'Asie du Sud et de l'Est et de l'Amérique latine, mais on ne leur attribue que 2 à 3 % seulement de la consommation mondiale d'énergie dans le secteur des transports (SAR II, 21.2.4). Ces véhicules libèrent une grande quantité de polluants à l'échelle locale.

Les pays cités à l'Annexe I sont responsables des trois quarts environ des émissions de CO₂ imputables au secteur des transports en 1990. Cette proportion n'atteindra plus que 60 à 70 % en 2020 (SAR II, 21.2.2) et moins encore en 2050, si l'on suppose que la croissance rapide observée dans les pays non cités à l'Annexe I se poursuivra.

3.3 Techniques de réduction des émissions de GES dans le secteur des transports

Les systèmes de transport et la technologie dans le domaine progressent rapidement. Bien que les progrès accomplis par le passé aient entraîné une réduction de l'intensité énergétique pour la plupart des types de véhicules, cette réduction n'a que peu avancé au cours des dix dernières années. En effet les derniers perfectionnements techniques ont surtout porté sur les performances, la sécurité et les accessoires (SAR II, 21.2.5). Rien ou presque n'indique que la demande d'énergie ait atteint un maximum dans le secteur des transports : d'une part le revenu marginal continue de servir à accentuer le rôle des transports dans le mode de vie et d'autre part la majoration de la valeur ajoutée dans la production suppose une circulation accrue des biens intermédiaires et une amélioration de la rapidité et de la souplesse des systèmes de transport de marchandises.

Des solutions d'atténuation de nature technique et infrastructurelle sont examinées dans le document SAR II (21.3). Plusieurs présentent déjà un bon rapport coût-efficacité selon

les circonstances (leur application entraîne une réduction des frais de transport privé, compte tenu des économies d'énergie, des améliorations de performances, etc.). Ces solutions sont de divers types : améliorations du rendement énergétique; sources d'énergie de remplacement; et aussi modifications d'infrastructure, changements de modes de transport et gestion des parcs de véhicules. L'efficacité de ces solutions techniques par rapport à leur coût présente de grandes variations suivant les différents utilisateurs et suivant les pays, en fonction de la disponibilité des ressources, des connaissances techniques, des capacités d'ordre institutionnel, de la technologie ainsi qu'en fonction de la situation locale du marché.

3.3.1 Améliorations du rendement énergétique

Parmi les réductions d'intensité énergétique, certaines présentent un bon rapport coût-efficacité pour les utilisateurs des véhicules, car les économies de carburant compenseront le supplément de prix des véhicules d'un meilleur rendement énergétique (SAR II, 21.3.1). Les résultats de plusieurs études montrent que les économies possibles ne sont pas réalisées pour différentes raisons, notamment parce qu'elles n'ont que peu d'importance aux yeux des fabricants et des acheteurs de véhicules par rapport à des priorités telles que la fiabilité, la sécurité et les performances. Beaucoup d'acheteurs envisagent séparément les frais de fonctionnement et le prix d'achat, en particulier lorsque l'achat du véhicule est fonction de l'obtention d'un prêt ; ainsi n'établissent-ils pas de corrélation directe de compensation entre les frais de fonctionnement et le prix du véhicule. Bien que, du point de vue de l'acheteur, qu'il s'agisse d'un particulier ou d'une entreprise, les économies de carburant puissent ne pas justifier le temps, les efforts et les risques qu'elles impliquent, il est possible d'y parvenir par des mesures qui minimiseraient ou lèveraient de tels obstacles. En ce qui concerne les automobiles et d'autres véhicules particuliers, il se pourrait que, en 2020, les économies dont le rapport coût-efficacité serait considéré comme bon par les utilisateurs représentent environ 10 à 25 % de la consommation prévue d'énergie, l'augmentation du prix d'achat des véhicules variant entre 500 et 1 500 dollars des Etats-Unis d'Amérique. Il serait possible de réaliser davantage d'économies, mais l'augmentation de prix serait plus élevée et le rapport coût-efficacité négatif. (NRC, 1992; ETSU, 1994, DeCicco et Ross, 1993; Greene et Duleep, 1993).

On a surtout étudié les possibilités d'économies d'énergie d'un bon rapport coût-efficacité pour les véhicules particuliers. Néanmoins, on pense que, dans le cas des véhicules utilitaires, elles seront plus faibles – probablement 10 % pour les autobus et les autocars, les trains, les camions de poids moyen et lourd, et les avions – car les utilisateurs commerciaux bénéficient déjà d'incitations relativement importantes à utiliser des techniques d'un bon rapport coût-efficacité (SAR II, 21.3.1.5).

Il est possible aussi de réaliser des réductions d'intensité énergétique importantes, dépassant le niveau de rentabilité pour les utilisateurs. Toutefois les modifications de conception qu'il faudrait alors apporter aux véhicules affecteraient probablement

aussi les performances sous des angles divers (SAR II, 21.3.1.5). Pour que de tels changements s'opèrent, il faudrait que les fabricants et les acheteurs modifient leurs priorités ou que survienne une percée technologique qui bouleverserait les performances et les coûts.

Lorsque les réductions d'intensité énergétique découlent d'améliorations au niveau de la carrosserie, l'atténuation des émissions de GES peut s'accompagner d'une réduction des émissions d'autres polluants atmosphériques, là où ces polluants ne font pas l'objet de normes qui nécessitent l'utilisation de convertisseurs catalytiques. Par contre, certains types de moteur à bon rendement énergétique (ex. : moteurs à injection directe et à mélange pauvre) rejettent des quantités relativement élevées de NO_x et de particules (SAR II, 21.3.1.1).

Pour faire évoluer la technologie des véhicules de transport, il faudra probablement consentir des investissements très importants dans la conception, les techniques et les chaînes de fabrication. Il est possible de réduire au minimum ces coûts à court terme à condition d'intégrer les améliorations du rendement énergétique dans le cycle normal des produits chez les fabricants de véhicules. Pour les automobiles et les camions, cela signifie qu'il pourrait y avoir un délai de dix ans entre un changement de priorité ou d'incitation sur le marché en question et l'application complète des résultats de ce changement sur les véhicules produits. Dans le cas des avions, ce délai serait plus long car il convient d'établir, au terme de plusieurs années d'essai, la fiabilité et la sécurité de toute nouvelle technologie avant d'en approuver l'usage général.

3.3.2 Sources d'énergie de remplacement

Compte tenu du cycle complet des combustibles, les carburants de substitution tirés de sources d'énergie renouvelables offrent un potentiel de réduction des émissions de GES dues à l'utilisation des véhicules (mais non à leur fabrication) de 80 % au moins (SAR II, 21.3.3.3). A l'heure actuelle, ces carburants sont, dans la plupart des cas, plus chers que les produits pétroliers. Toutefois les véhicules à biocarburants liquides, dont les coûts de fabrication en série n'ont pas lieu d'être plus élevés que ceux des véhicules classiques, fonctionnent aussi bien que ces derniers. Avant qu'il soit possible de généraliser l'emploi de ces carburants de remplacement, il faudra surmonter divers obstacles, notamment les coûts de transition à de nouveaux types de véhicules, les techniques de production et de distribution de ces carburants, les problèmes de sécurité et de toxicité et l'abaissement éventuel des performances sous certains climats. L'utilisation généralisée de l'hydrogène et de l'électricité comme source d'énergie pour les véhicules routiers pose encore des défis techniques et financiers.

Les carburants fossiles qui remplacent l'essence (ex. : le gazole, le GPL – gaz de pétrole liquéfié, le GNC – gaz naturel comprimé) peuvent apporter des réductions d'émission de 10 à 30 % au kilomètre et sont déjà rentables sur certains créneaux, notamment les véhicules qui roulent beaucoup et les parcs de véhicules, y compris les petits autobus et les camionnettes de

livraison (SAR II, 21.3.3.1). Plusieurs gouvernements encouragent l'utilisation du GPL et du GNC, car ils libèrent moins de polluants classiques que l'essence ou le gazole. Toutefois, remplacer l'essence par le gazole peut entraîner davantage d'émissions de particules et de NO_x . Par rapport aux véhicules à carburant de remplacement et aux véhicules électriques, il se pourrait que les véhicules polycarburant et les véhicules hybrides répondent aux besoins de mobilité d'un segment d'utilisateurs plus important, mais ceux-ci coûteraient plus chers et entraîneraient moins de réductions d'émissions de GES que les véhicules à carburant unique (SAR II, 21.3.4). Il est peu probable de trouver des carburants de remplacement du gazole rentables pour les conducteurs de poids lourds, d'autant que beaucoup de ces carburants entraîneraient une augmentation des émissions de GES (SAR II, 21.3.3.2). Néanmoins, bien que leur nombre demeure faible, on utilise de plus en plus d'autobus et de véhicules de livraison fonctionnant au GNC, au GPL ou au GNL (gaz naturel liquéfié), pour réduire les émissions de NO_x et de particules dans les villes. Par ailleurs, on effectue des essais sur des combustibles qui pourraient remplacer le kérosène utilisé par les avions, mais il est peu probable que l'on puisse atteindre un rapport coût-efficacité intéressant dans un avenir proche (SAR II, 21.3.3.3). Les actions entreprises par les pouvoirs publics en faveur de l'utilisation de combustibles de remplacement ont pour la plupart d'autres objectifs que l'atténuation des émissions de GES, notamment l'amélioration de la qualité de l'air dans les villes, le maintien des emplois dans l'agriculture et la sécurité énergétique.

3.3.3 Modification des infrastructures et des systèmes

La densité urbaine, l'infrastructure des villes et des transports et la conception des systèmes de transport peuvent toutes avoir une influence sur les distances que les personnes parcourent pour satisfaire leurs besoins et sur le mode de transport dont elles se servent dans ce but. (SAR II, 21.4.2). Ces facteurs influent aussi sur le volume des marchandises transportées et sur le mode utilisé. L'étendue de ces diverses influences porte à controverse et il convient de noter que l'infrastructure des villes et des transports est habituellement conçue à partir d'objectifs pour la plupart différents de l'atténuation des émissions de GES.

Dans les villes, les systèmes de gestion de la circulation et de gestion des parcs de véhicules pourraient entraîner des économies d'énergie de 10 % environ ou plus encore (SAR II, 21.4.2). Il serait possible aussi de réaliser des économies d'énergie importantes dans le domaine du transport des marchandises, à condition de modifier la gestion des parcs de camions. Le passage de la route au rail pourrait permettre aussi des économies d'énergie allant de 0 à 50 %, souvent accompagnées de réductions d'émissions de GES du même ordre, voire plus importantes, en particulier si les trains sont électriques et que l'électricité n'est pas obtenue à l'aide de combustibles fossiles (SAR II, 21.3.4, 21.4.2). La rentabilité et la faisabilité du transport des marchandises par le rail varient grandement en fonction des régions et des marchandises à transporter (SAR II, 21.2.5). Le potentiel à long terme du transport ferroviaire des marchandises sera probablement fonction de l'évolution de ce

Tableau 5 : Exemples choisis de solutions techniques visant à atténuer les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agricole^a

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
<p>Réduction de l'intensité énergétique des véhicules</p> <ul style="list-style-type: none"> - Modification des carrosseries - Modification des moteurs - Modification des chambres de combustion - Modification du mélange air-carburant - Gestion du véhicule et du moteur assistée par ordinateur - Encouragement à la réduction de la taille des véhicules (réduction de masse et de puissance) <p>[Estimations des effets fondées sur SAR II, 21.4.3; SAR II, 21.4.5.1; NRC, 1992; DeCicco et Ross, 1993; OTA, 1991; ETSU, 1994; Goodwin, 1992]</p>	<p>Programmes axés sur le marché</p> <ul style="list-style-type: none"> - Allègement des redevances : Nouvelle augmentation des taxes sur les automobiles de \$EU 400 par l/100 km (en moyenne, aucune modification des taxes sur les automobiles) 	<p>Incidences favorables sur le climat</p> <ul style="list-style-type: none"> - Réduction des émissions de CO₂ dues aux véhicules légers atteignant 10 à 20 % pour tous les scénarios <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> - Circulation accrue (jusqu'à 6 %) et ses effets sur l'environnement, à moins que d'autres mesures aient un effet inverse 	<p>Rapport coût-efficacité</p> <ul style="list-style-type: none"> - Augmentation du prix moyen des automobiles atteignant 1 à 9 %, remboursée par les économies de carburant <p>Aspects macroéconomiques</p> <ul style="list-style-type: none"> - Baisse possible des ventes d'automobiles à court terme, en raison des coûts d'application - Analogue à l'allègement des redevances, mais entraînant une relance économique probablement plus faible <p>Equité</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pour les consommateurs : effet positif ressenti par les propriétaires de petites voitures et négatif par ceux qui ne possèdent pas d'automobile et par les propriétaires de grosses voitures - Bouleversement possible de la compétitivité dans l'industrie de l'automobile, mais de façon rationnelle du point de vue économique 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coûts administratifs modérés pour les gouvernements - Besoin moindre en compétences dans les gouvernements que pour les normes <p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> - Opposition de la part des fabricants de véhicules - Inquiétudes quant aux conséquences sur la sécurité
	<p>Dispositions réglementaires</p> <ul style="list-style-type: none"> - Normes d'économie de carburant ou accords volontaires : Réduction de 30 % de l'intensité énergétique des véhicules légers entre 1995 et 2010 ; la réduction relative à la tendance est fonction du scénario 	<p>Incidences favorables sur le climat en 2020</p> <ul style="list-style-type: none"> - Réduction des émissions de CO₂ dues aux véhicules légers atteignant 3 à 5 % par rapport à l'hypothèse basse - 22 à 28 % par rapport à l'hypothèse haute <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> - Circulation accrue (3 à 10 %) avec effets locaux sur l'environnement selon l'hypothèse haute, à moins que d'autres mesures aient un effet inverse 	<p>Rapport coût-efficacité</p> <ul style="list-style-type: none"> - Augmentation du prix moyen des automobiles <0,5 % selon l'option basse, de 5 à 15 % selon l'hypothèse haute, remboursée par les économies de carburant - A court terme, coûts éventuellement élevés pour l'industrie de l'automobile, mais réduction des coûts d'utilisation sur le cycle de vie d'une automobile 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> - Besoin de compétences dans les gouvernements pour définir les normes - Coûts administratifs modérés pour les gouvernements <p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> - Opposition de la part des fabricants de véhicules - Inquiétudes quant aux conséquences sur la sécurité

Tableau 5 (suite)

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
		<p>Aspects macroéconomiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des importations de pétrole et des coûts de fonctionnement des automobiles pouvant entraîner une augmentation à long terme des ventes d'automobiles et de la circulation, et donc relancer l'économie <p>Équité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Effets sur les consommateurs analogues à ceux des allègements des redevances – Bouleversement possible de la compétitivité dans l'industrie de l'automobile, mais de façon rationnelle du point de vue économique 		
<p>Réduction de l'intensité énergétique des véhicules (voir ci-dessus); Réduction de la vitesse ou régulation améliorée de la vitesse; Amélioration de la gestion des parcs de véhicules causant une augmentation du facteur de chargement des véhicules; Passage aux transports en commun ou non motorisés ; Passage à des sources d'énergie de remplacement (voir ci-dessous) [SAR II, 21.4.5; Goodwin, 1992]</p>	<p>Programmes axés sur le marché</p> <ul style="list-style-type: none"> – Taxes sur les carburants utilisés par les transports routiers : fixées localement de manière à inclure les coûts sociaux et environnementaux • Entre \$0,2 et 0,5 /l si les taxes actuelles sont déjà fortes • Entre \$0,3 et 0,8 /l si les taxes actuelles sont faibles 	<p>Incidences favorables sur le climat en 2020</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des émissions de CO₂ dues aux véhicules légers atteignant 10 à 25 %^b dans les pays où les taxes sont déjà fortes – 40 à 60 %^b dans les pays où les taxes sont très faibles <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Incidences sur les émissions de GES découlant pour moitié au moins d'une diminution de la circulation, avec effets favorables proportionnels sur l'environnement 	<p>Rapport coût-efficacité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Augmentation des coûts pour les usagers de la route <p>Aspects macroéconomiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Baisse des ventes d'automobiles ; possibilités d'effets plus étendus suivant l'utilisation faite des recettes [SAR III, 11.3.2] <p>Équité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Régression des taxes sur l'essence en Amérique du Nord et progression en Europe indiquées dans quelques études [SAR III, 11.5.6] 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Coûts sociaux et environnementaux difficiles à évaluer – Source de recettes pour les gouvernements contre un surcoût administratif négligeable <p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Opposition de la part des producteurs et des fournisseurs de carburants – Opposition de la part des associations d'automobilistes et d'autres groupes d'intérêts
<p>Passage à des sources d'énergie de remplacement</p> <ul style="list-style-type: none"> – Remplacement de l'essence par le gazole, le GNC ou le GPL – Carburants synthétiques provenant de la biomasse – Hydrogène ou électricité obtenu à partir de sources d'énergie renouvelables – Groupes motopropulseurs hybrides [SAR II, 21.3.3.1; IEA, 1993]	<p>Instruments économiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Incitations fiscales ou subventions en faveur des véhicules électriques ou des véhicules mus par des carburants de remplacement <p>Dispositions réglementaires</p> <ul style="list-style-type: none"> – Mandats en faveur de véhicules électriques ou mus par des carburants de remplacement 	<p>Incidences favorables sur le climat en 2020</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réduction atteignant 10 à 30 % pour une utilisation du GNC ou du GPL; possibilité rentable jusqu'à 5 % des émissions totales dues aux véhicules légers – Réduction de 80 % au moins grâce aux véhicules à biocarburants ou électriques, si l'électricité provient de sources renouvelables 	<p>Rapport coût-efficacité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Par rapport à l'essence, coûts inférieurs pour l'utilisateur du GPL, du GNC et du gazole dans certaines applications – Coûts supérieurs pour l'utilisateur des véhicules à biocarburants, électriques ou à hydrogène; coûts éventuellement très élevés (jusqu'à \$1 000 par tonne de CO₂ non émis) 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Coûts administratifs faibles pour les gouvernements – Nécessité éventuelle de définir de nouvelles normes techniques et de sécurité – Utilité de la coopération internationale

Tableau 5 (suite)

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
		<p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Diminution locale de la pollution de l'air avec certains carburants de remplacement, mais augmentation avec d'autres; éventuellement incidences accrues sur l'environnement dues aux cultures intensives en cas d'incitation à une utilisation des biocarburants 	<p>Aspects macroéconomiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Relance de l'emploi possible en cas de remplacement du pétrole par des carburants produits dans le pays <p>Équité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Emploi possible dans les zones rurales en cas d'utilisation de la biomasse 	<p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Importance de la coopération avec les fabricants d'automobiles – Appui des producteurs de carburants de remplacement, y compris des agriculteurs dans le cas des biocarburants
<p>Réduction des fuites de frigorigènes dans les circuits de climatisation et de refroidissement [SAR II, 21.3.1.6]</p>	<p>Dispositions réglementaires</p> <ul style="list-style-type: none"> – Normes sur les fuites de frigorigènes (ex. : limitant les fuites de HFC à 5 % de la charge totale par an) 	<p>Incidences favorables sur le climat en 2020</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des émissions de HFC atteignant 70 à 80 % (ce qui équivaut à 7-8 % des émissions des véhicules légers sur un cycle de vie) 	<p>Rapport coût-efficacité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Non évalué 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Importance de la coopération internationale <p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Opposition éventuelle des fabricants à l'application des normes
<p>Réduction des gaz d'échappement autres que le CO₂ – Catalyseur à faible émission de N₂O</p>	<p>RD&D</p> <ul style="list-style-type: none"> – Objectif : élimination des émissions de N₂O provenant des convertisseurs catalytiques 	<p>Incidences favorables sur le climat</p> <ul style="list-style-type: none"> – Élimination équivalant à environ 10 % des émissions de GES dans les gaz d'échappement 	<p>Rapport coût-efficacité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Non évalué 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Importance de la coopération internationale
<p>Diminution de l'utilisation des véhicules à moteur; Réduction de l'intensité énergétique dans les transports (changements de mode, modification du comportement des conducteurs); Amélioration de la gestion des véhicules, des parcs de véhicules et de la circulation par la technologie de l'information; Modification de l'urbanisme et des systèmes de transport, y compris amélioration des infrastructures en faveur des transports non motorisés; Télécommunications (télétravail, systèmes de réalité virtuelle, etc.) [SAR II, 21.4.6]</p>	<p>Organisation des transports et urbanisme, infrastructures</p> <ul style="list-style-type: none"> – Initiatives locales dans le domaine des transports, y compris éventuellement redevances et taxes, réglementation, planification, prestations, éducation et information 	<p>Incidences favorables sur le climat en 2020</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réduction possible à long terme des émissions dues aux véhicules légers atteignant 10 % au moins, peut-être plus en cas d'évolution rapide des infrastructures <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Incidences sur les émissions de GES découlant pour moitié au moins d'une diminution de la circulation, avec effets favorables proportionnels sur l'environnement – Vastes effets favorables éventuels sur l'environnement 	<p>Rapport coût-efficacité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Mesures principalement adoptées en général pour des raisons autres que l'atténuation des émissions de GES, si bien que le coût de cette atténuation est faible, voire négatif <p>Aspects macroéconomiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Conséquences positives ou négatives suivant la situation au plan local et la structure des mesures <p>Équité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Conséquences positives ou négatives suivant la situation au plan local et la structure des mesures 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Importance des processus décisionnels à l'échelle locale – Importance de la coopération entre les différents paliers de gouvernement et les différents acteurs du processus de décision <p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Opposition de l'industrie de la construction des routes – Opposition éventuelle des commerces de proximité aux limitations d'accès

Tableau 5 (suite)

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
Toutes les solutions [SAR II, 21.3.6, 21.3.1.5, 21.3.3.1]	RD&D et information	Incidences favorables sur le climat – Réduction des émissions dues aux véhicules légers atteignant plus de 20 % en 2020, et peut-être à long terme (2050+) 80 % voire plus Autres effets – Vastes effets favorables éventuels sur l'environnement	Équité Rapport coût-efficacité – Intrinsèquement imprévisible, mais possibilités de réduction d'émissions à coût négatif Aspects macroéconomiques – Intrinsèquement imprévisible, mais possibilités de bénéfices importants Équité – Imprévisible	Facteurs administratifs et institutionnels – Besoin d'encourager les initiatives locales et indépendantes – Utilité de la coopération internationale
<p>^a Effets des émissions de GES calculés pour 2020, selon deux scénarios : une hypothèse basse (diminution rapide de l'intensité énergétique, augmentation lente de la circulation) et une hypothèse haute (diminution lente de l'intensité énergétique, augmentation rapide de la circulation), dans lesquels les émissions correspondent respectivement à peu près à celles des scénarios IS92c et IS92e (voir le tableau 4). Les intervalles de valeurs donnés pour les coûts et les effets traduisent les différences relevées dans la littérature et les intervalles d'incertitude ; les scénarios et les différences nationales sont indiqués.</p> <p>^b Pour une élasticité des prix des carburants de -0,7. Selon Goodwin (1992), cette élasticité pourrait osciller entre -0,7 et -1, ce qui entraînerait des incidences plus marquées.</p>				

mode de transport et de celle des technologies de transport multimodal qui permettraient de répondre à la priorité croissante accordée à la souplesse et à la capacité de réaction dans le secteur.

3.4 Mesures de réduction des émissions de GES dans le secteur des transports

Dans le secteur des transports, on franchirait un premier pas dans le sens de l'atténuation du changement climatique en mettant en place des mesures de réduction des émissions de GES que d'autres orientations justifient entièrement. De telles mesures peuvent accroître la compétitivité dans le secteur industriel, contribuer à la sécurité énergétique, améliorer la qualité de vie des populations ou encore permettre de protéger l'environnement (SAR II, 21.4). En principe, la façon de traiter tous ces problèmes, la plus efficace du point de vue économique, consiste à éliminer les subventions que certains pays accordent aux transports routiers et à introduire des mécanismes de fixation des prix qui prennent en compte l'ensemble des coûts sociaux et environnementaux imputables aux transports (SAR II, 21.4.5).

Dans la pratique, les mesures économiquement efficaces, telles que la taxation des usagers de la route, peuvent se révéler difficiles à appliquer pour des raisons techniques ou politiques. Certes les problèmes locaux nécessitent des solutions locales, mais il se peut que les stratégies n'aboutissent qu'à condition que le processus menant à leur élaboration intègre :

- la compréhension du système actuel et de son évolution,
- la prise en compte de toute une série de mesures,
- la consultation avec les intervenants,

- la surveillance et les ajustements des mécanismes (SAR II, 21.4.7).

La présente analyse ne peut fournir une évaluation mondiale, mais elle examine des intervalles de probabilité en ce qui concerne les effets possibles des mesures. Elle porte sur trois groupes de véhicules dont on pense qu'ils constitueront en 2020 les sources les plus importantes de GES : les véhicules légers, les poids lourds et les avions.

Les pays cités à l'Annexe I détiennent la vaste majorité des véhicules du parc mondial ; en 1990, les pays en développement représentaient environ un dixième du parc automobile. En outre, presque tous les véhicules produits dans le monde sont fabriqués dans les pays cités à l'Annexe I ou d'après des modèles provenant de ces pays (SAR II, 21.2.4). Il est donc probable que les politiques appliquées dans les pays cités à l'Annexe I et qui touchent à la technologie des véhicules auront des effets dans le monde entier.

3.4.1 Mesures touchant les véhicules légers et la circulation urbaine

A long terme, la régulation des émissions de GES attribuables aux véhicules légers sera probablement liée à la mise en œuvre de stratégies globales touchant plusieurs domaines de décision et plusieurs paliers de gouvernement (SAR II, 21.4.1). Ces stratégies pourraient comprendre diverses mesures, y compris des normes d'économie d'énergie (SAR II, 21.4.3), des taxes sur les carburants (SAR II, 21.4.5.2), des incitations en faveur de l'utilisation des carburants de remplacement (SAR II, 21.3.3), des mesures visant à réduire l'usage des véhicules

(SAR II, 21.4.2) et des travaux de RD&D sur les techniques applicables aux véhicules et aux systèmes de transport (SAR II, 21.3.6), certaines étant chiffrées dans le tableau 5. L'efficacité relative des actions gouvernementales varie suivant la situation de chaque pays, notamment les institutions en place et les politiques en vigueur, et suivant les évolutions techniques sous-jacentes. Les mesures en faveur d'une réduction des émissions de GES attribuables aux automobiles s'appliquent en général aussi bien aux autres véhicules légers, tels que les camionnettes, les fourgonnettes, les minibus et les utilitaires de sport. Ces divers types de véhicules servent de plus en plus de véhicules de tourisme, ce qui entraîne une augmentation des émissions de GES. Le fait de ne pas soumettre ces véhicules aux mêmes mesures que les automobiles risque d'en accroître encore l'utilisation.

Parmi les mesures citées au tableau 5, beaucoup peuvent se justifier entièrement ou en partie par des objectifs autres que l'atténuation des émissions de GES. Les normes d'économie d'énergie et les allègements des redevances peuvent se justifier en tant que moyens permettant de surmonter les barrières commerciales qui s'opposent à l'application de techniques à haut rendement énergétique, d'un bon rapport coût-efficacité. L'augmentation des taxes sur les carburants peut aussi entraîner une série d'effets sociaux et environnementaux favorables, tout en engendrant des recettes qu'il serait possible de réinjecter dans le secteur des transports ou dans d'autres secteurs pour répondre aux besoins les plus pressants. Elle peut aussi constituer une gêne pour certains utilisateurs des transports.

Il y a de fortes chances pour que les gouvernements optent pour des combinaisons de mesures. A titre d'exemple, l'adoption de normes d'économie d'énergie et d'incitations à une telle économie peut réduire les coûts d'utilisation des véhicules et donc augmenter la circulation, à moins qu'elles ne s'accompagnent de l'application de taxes sur les carburants, de péages sur les routes ou d'autres mesures encore qui auraient l'effet inverse. Par ailleurs, il est plus probable que les sources d'énergie renouvelables permettent de répondre à la demande future d'énergie dans le secteur des transports si l'on réussit à maintenir l'intensité énergétique et la densité de circulation à de faibles niveaux. Par conséquent, il conviendrait peut-être, pour en améliorer l'efficacité, d'accompagner les mesures d'incitation à l'achat de véhicules à carburant de remplacement de taxes sur les carburants classiques, ce qui pousseraient les consommateurs à utiliser les carburants de remplacement, mais aussi à réduire leur consommation d'énergie.

Une stratégie d'atténuation à long terme des émissions de GES dans le secteur des transports pourrait compter, parmi ses éléments essentiels, les actions gouvernementales élaborées à l'échelle locale pour faire face à l'ensemble des priorités économiques sociales et environnementales locales (SAR II, 21.4.2). Les mesures locales à appliquer comprendraient notamment : mettre en place une régulation de la circulation assistée par ordinateur, restreindre le stationnement et prélever des droits de stationnement, établir des péages et restreindre l'accès à certaines zones, modifier le dessin des routes pour ralentir la

circulation et aussi accorder une priorité relativement élevée, dans la circulation, aux piétons, aux cyclistes et aux transports en commun et améliorer les installations en ce sens.

L'élaboration d'une infrastructure nécessite énormément de fonds qui seront probablement engagés pour tout un éventail de raisons économiques, sociales, environnementales et autres. Il se peut que des barrières institutionnelles s'opposent à l'inclusion des objectifs d'atténuation des GES dans les processus décisionnels, inclusion qui pourrait néanmoins apporter une série d'avantages, et peut-être notamment conduire à une diminution des dépenses si une priorité plus élevée qu'auparavant était accordée aux moyens de transport non motorisés, au détriment des transports motorisés. Un urbanisme tourné vers les transports non motorisés et les transports en commun peut offrir des avantages économiques à long terme, puisque l'amélioration de l'environnement urbain qu'il entraîne favorise le commerce de proximité (SAR II, 21.4.2).

Parmi les exemples les plus connus de stratégies ayant réussi à réduire la circulation urbaine et atténuer ses effets sur l'environnement, y compris les émissions de GES, il faut citer celles appliquées dans la ville-Etat de Singapour, dans la ville de Curitiba au Brésil et dans plusieurs villes européennes (SAR II, 21.4.6). Ces villes montrent l'importance que revêt l'initiative locale et les modes d'aménagement intégré et axés sur le marché quand il s'agit d'élaborer des combinaisons appropriées de mesures.

Des stratégies locales visant à réduire la circulation et à favoriser l'accès des véhicules non motorisés peuvent avoir toute une série d'effets favorables sur le plan social et environnemental (SAR II, 21.4.6), mais elles peuvent aussi constituer une gêne pour certains utilisateurs des transports.

A long terme, les évolutions combinées de la culture et du mode de vie en ce qui concerne les transports ainsi que de l'urbanisme pourraient entraîner une diminution importante de l'utilisation des transports motorisés dans les villes d'Amérique du Nord et d'Australie. L'effet serait moins marqué dans les villes de l'Europe occidentale (SAR II, 21.4.2). C'est dans les pays à économie de transition et dans les pays en développement rapide que l'urbanisme pourrait avoir les effets les plus importants sur la consommation d'énergie à long terme dans les transports, puisque l'automobile y est encore un mode de transport minoritaire mais dont l'importance croît rapidement (SAR II, 21.4.2).

3.4.2 Mesures touchant les poids lourds et le trafic des marchandises

Le tableau 6 résume quelques-uns des effets possibles des mesures visant à réduire les émissions de GES dues aux poids lourds. Ces mesures diffèrent de celles applicables aux véhicules légers. En effet, par rapport aux automobiles, les poids lourds présentent des modèles et des utilisations bien plus variés, ce qui complique l'élaboration de normes d'intensité

énergétique. Il est cependant possible de réduire la consommation d'énergie en rendant obligatoires les limiteurs de vitesse et en limitant les puissances massiques (SAR II, 21.2.4.3). En attendant, les utilisateurs de véhicules utilitaires sont relativement sensibilisés aux prix des carburants tant dans la gestion des véhicules existants que dans le choix de nouveaux véhicules. Un ensemble de mesures composé de taxes sur les carburants et d'accords volontaires, de campagnes de publicité et d'incitations (portant par exemple sur les droits d'immatriculation) en faveur de l'achat de véhicules d'un bon rendement énergétique suffirait peut-être à encourager l'application des perfectionnements techniques (SAR II, 21.2.4.3).

Les études menées dans certains pays indiquent que le secteur des poids lourds reçoit plus de subventions que celui des

véhicules légers, compte tenu de la part importante des coûts engagés pour réparer les routes, imputable aux poids lourds. Si l'on appliquait des mesures efficaces pour répercuter ces coûts sur les entreprises de transport de marchandises, l'augmentation du coût de ce transport atteindrait entre 10 et 30 % (SAR II, 21.4.5). Cela entraînerait alors une diminution du transport routier des marchandises et une réduction correspondante des émissions de GES qui se situeraient aussi entre 10 et 30 % (chiffres fondés sur les élasticités par rapport aux prix dans Oum *et al.*, 1990).

On préconise souvent aussi l'application d'autres actions gouvernementales, prônant notamment la mise en place d'installations de transport multimodal pour encourager le recours au rail. L'amélioration de l'infrastructure ferroviaire peut en effet

Tableau 6 : Exemples choisis de mesures visant à atténuer les émissions de GES dues aux poids lourds

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
<p>Réduction de l'intensité énergétique des véhicules (voir tableau 4);</p> <p>Réduction de la vitesse ou régulation améliorée de la vitesse;</p> <p>Amélioration de la gestion des parcs de véhicules causant une augmentation du facteur de chargement des véhicules;</p> <p>Passage aux transports en commun ou non motorisés;</p> <p>Passage à des sources d'énergie de remplacement (voir ci-dessous)</p> <p>[SAR II, 21.4.5; Oum <i>et al.</i>, 1990]</p>	<p>Instruments axés sur le marché</p> <ul style="list-style-type: none"> – Augmentation des taxes sur le gazole : fixée localement de manière à inclure les coûts sociaux et environnementaux – Augmentation des prix des carburants atteignant entre 50 et 200 % <p>Accords volontaires</p> <ul style="list-style-type: none"> – Avec les exploitants de parcs et les fabricants de véhicules pour réduire l'intensité énergétique 	<p>Incidences favorables sur le climat</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des émissions dues aux poids lourds atteignant 10 à 40 %^a <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Diminution de la circulation, avec effets favorables correspondants sur l'environnement 	<p>Rapport coût-efficacité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Augmentation des coûts pour les conducteurs de véhicules, justifiée par les coûts sociaux et environnementaux <p>Aspects macroéconomiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Effets économiques plus étendus suivant l'utilisation faite des recettes [SAR II, 11.3.2] <p>Equité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Effets sur la compétitivité à l'échelle internationale dans le domaine du camionnage notamment 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Source de recettes importantes pour les gouvernements, contre un surcoût administratif négligeable – Utilité éventuelle de la coopération internationale <p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Opposition probable des transporteurs routiers
<p>Réduction de l'intensité énergétique des véhicules (voir tableau 4)</p> <p>[SAR II, 21.3.1.5]</p>	<p>Instruments économiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Incitations en faveur d'une réduction de l'intensité énergétique par le biais de taxes sur les véhicules, de droits sur les permis, d'une dépréciation accélérée, etc. <p>Accords volontaires</p> <ul style="list-style-type: none"> – Avec les exploitants de parcs et les fabricants de véhicules pour réduire l'intensité énergétique 	<p>Incidences favorables sur le climat</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des émissions dues aux poids lourds atteignant jusqu'à 10 % <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réduction possible des émissions de NO_x et de particules – Augmentation possible de la circulation et des autres effets sur l'environnement en raison de la réduction des coûts de fonctionnement 	<p>Rapport coût-efficacité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Augmentation du coût des véhicules éventuellement remboursée en trois ans par les économies de carburant <p>Aspects macroéconomiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Relance probable de l'économie en raison de la diminution des prix du camionnage 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Besoin de grandes compétences dans les gouvernements et nécessité de communiquer avec les fabricants et les utilisateurs pour parvenir à des accords <p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Opposition probable des transporteurs routiers aux modifications de taxes

^a Pour une élasticité des prix des carburants de -0,2. Selon Oum *et al.* (1990), les élasticités des prix du transport des marchandises varient énormément en fonction du type des marchandises, de celui des trajets et d'autres facteurs encore.

Tableau 6 (suite)

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
Passage à des sources d'énergie de remplacement – Carburants synthétiques provenant de la biomasse – Hydrogène ou électricité obtenu à partir de sources d'énergie renouvelables – Groupes motopropulseurs hybrides [SAR II, 21.3.3.1; IEA, 1993, 1994; CEC, 1992]	Instruments axés sur le marché – Subventions et incitations fiscales en faveur de véhicules électriques ou de véhicules mus par des carburants de remplacement	Incidences favorables sur le climat – Plus de 80 % de réduction des émissions par tonne-km, pour certains biocarburants; généralement 50 % pour le "biogazole" – Dans l'ensemble, incidences subordonnées aux ressources disponibles et aux coûts Autres effets – Diminution locale de la pollution de l'air – Possibilité d'incidences accrues sur l'environnement dues à la production des biocarburants	Rapport coût-efficacité – Coût des subventions et des pertes de recettes fiscales éventuellement très élevé (jusqu'à 1 000 \$EU par tonne de CO ₂ non émis), mais pouvant être justifié par une politique agricole notamment – Coûts administratifs faibles Aspects macroéconomiques – Relance de l'emploi possible en cas de remplacement du pétrole par des carburants produits dans le pays Équité – Augmentation éventuelle des emplois dans les zones rurales en cas d'utilisation de la biomasse	Facteurs administratifs et institutionnels – Appui des producteurs de carburants de remplacement – Nécessité éventuelle d'établir de nouvelles normes techniques et de sécurité – Utilité éventuelle de la coopération internationale Facteurs politiques – Appui des producteurs de carburants de remplacement
Réduction de l'intensité énergétique dans les transports (gestion des parcs de véhicules) et diminution de la circulation [SAR II, 21.3.2]	Organisation, infrastructure et information – Systèmes de gestion du transport des marchandises (ex. : GPS) – Systèmes multimodaux, avec dissuasion du transport routier	Incidences favorables sur le climat – Réduction des émissions de GES par tonne-kilomètre pouvant atteindre 10 à 30 % par une augmentation des facteurs de charge des poids lourds – Réduction de 80 % de la consommation d'énergie possible par le passage au transport ferroviaire, mais uniquement pour les longs trajets et les petites vitesses Autres effets – Vastes effets favorables sur l'environnement découlant de la diminution de la circulation	Rapport coût-efficacité – Coûts justifiés par des incidences favorables sur l'environnement autres que l'atténuation des émissions de GES	Facteurs administratifs et institutionnels – Importance des processus décisionnels à l'échelle locale – Importance de la coopération entre les différents paliers de gouvernement et les différents acteurs du processus de décision – Utilité de la coopération internationale Facteurs politiques – Opposition de l'industrie de la construction des routes
Toutes les solutions techniques [SAR II, 21.3.6, 21.3.1.5, 21.3.3.2]	RD&D et information	Incidences favorables sur le climat – Réduction de plus de 10 % en 2020 des émissions dues aux poids lourds, mais pouvant atteindre à long terme (2050+) 80 % voire plus, avec des vastes effets favorables sur l'environnement	Rapport coût-efficacité – Imprévisible Aspects macroéconomiques – Imprévisibles Équité – Imprévisible	Facteurs administratifs et institutionnels – Besoin d'encourager les initiatives locales et indépendantes – Utilité de la coopération internationale Facteurs politiques – Appui du secteur

Tableau 7 : Exemples choisis de mesures visant à atténuer les émissions de GES dues aux aéronefs

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
Diminution de la circulation aérienne et réduction de l'intensité énergétique (conception des aéronefs, exploitation) <ul style="list-style-type: none"> – Amélioration de la maintenance – Modification des cellules – Modification des moteurs – Amélioration de la gestion des vols – Augmentation du facteur de charge des aéronefs 	Instruments axés sur le marché <ul style="list-style-type: none"> – Taxes sur les carburants : 10 % d'augmentation sur le prix des carburants (taxe de 2 ¢/L) – [SAR II, 21.4.5.2] 	Incidences favorables sur le climat <ul style="list-style-type: none"> – Diminution de la circulation atteignant 1 % à court terme – Pourcentage plus important pour la réduction à long terme des émissions de GES imputables à l'aviation 	Rapport coût-efficacité <ul style="list-style-type: none"> – Fonction de l'utilisation faite des recettes 	Facteurs administratifs et institutionnels <ul style="list-style-type: none"> – Nécessité de parvenir à des accords internationaux ou régionaux Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Opposition des compagnies aériennes
Réduction des émissions	Dispositions réglementaires <ul style="list-style-type: none"> – Normes sur les NOx applicables aux moteurs d'avions [SAR II, 21.3.1.6, 21.4.1] 	Incidences favorables sur le climat <ul style="list-style-type: none"> – Réduction possible du coefficient d'émission des NOx, à vitesse de croisière, atteignant 30 à 40 % – Objectif éventuel de réduction à plus long terme : 80 % Autres effets <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des NO_x dans le voisinage des aéroports – Augmentation possible des émissions de particules 		Facteurs administratifs et institutionnels <ul style="list-style-type: none"> – Possibilité de s'inspirer des normes existantes – Nécessité de parvenir à un accord général international Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Opposition possible des fabricants de moteurs d'avion à l'application de normes strictes
Réduction de l'intensité énergétique (exploitation) <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des délais – Optimisation des trajectoires de vol 	Organisation, infrastructure <ul style="list-style-type: none"> – Amélioration du contrôle de la circulation aérienne – Amélioration de la gestion des flottes et de celle des itinéraires [SAR II, 21.3.2 ; ETSU, 1994] 	Incidences favorables sur le climat <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des émissions atteignant 3 à 5 % Autres effets <ul style="list-style-type: none"> – Réduction du bruit et de la pollution atmosphérique 	Rapport coût-efficacité <ul style="list-style-type: none"> – Conséquences économiques favorables pour l'industrie Aspects macroéconomiques <ul style="list-style-type: none"> – Coûts élevés pour les gouvernements 	Facteurs administratifs et institutionnels <ul style="list-style-type: none"> – Nécessité d'une coopération à l'échelle internationale ou régionale Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Appui des compagnies aériennes
Réduction de l'intensité énergétique, diminution de la circulation aérienne et passage à des carburants de remplacement	RD&D et information [SAR II, 21.3.1.3, 21.3.1.5, 21.3.6, 21.3.3.3, 21.3.1.6]	Incidences favorables sur le climat <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des émissions de GES de 10 % en 2020, mais pouvant atteindre à long terme (2050+) 80 % Autres effets <ul style="list-style-type: none"> – Imprévisibles 	Rapport coût-efficacité <ul style="list-style-type: none"> – Imprévisible Aspects macroéconomiques <ul style="list-style-type: none"> – Imprévisibles Équité <ul style="list-style-type: none"> – Imprévisible 	Facteurs administratifs et institutionnels <ul style="list-style-type: none"> – Utilité de la coopération internationale Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Appui des compagnies aériennes et des avionneurs

contribuer à l'atténuation des émissions de GES, lorsqu'on y associe des restrictions relatives au transport routier des marchandises ainsi que des mesures de dissuasion telles que les péages (SAR II, 21.4.3). Une utilisation intense du transport ferroviaire étant surtout adaptée aux longs trajets, de telles actions gouvernementales se révéleraient le plus efficaces dans les grands pays ou lorsqu'elles sont le fruit d'une collaboration internationale au sein de régions regroupant plusieurs petits pays (SAR II, 21.2.4).

3.4.3 Mesures touchant les aéronefs¹⁰

Le tableau 7 résume les effets d'une série d'actions gouvernementales visant à réduire les émissions de GES dues aux aéronefs. Il serait probablement plus aisé du point de vue politique de réduire de façon importante les émissions de NO_x. On y parviendrait en établissant des normes applicables aux moteurs d'avions (SAR II, 21.3.1.6) et en finançant des travaux de RD&D. Toutefois l'effet radiatif des NO_x relâchés par les

aéronefs est de courte durée et très incertain, sans compter qu'une réduction des émissions de NO_x pourrait avoir des effets négatifs sur le rendement du carburant (SAR II, 21.3.1.6).

Le Conseil de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) des Nations Unies recommande l'exonération des prix des carburants utilisés par l'aviation internationale (SAR II, 21.4.5.2), sans cependant écarter les redevances au profit de l'environnement. Sachant que certains aéroports prélèvent déjà des redevances d'atterrissage en raison du niveau sonore élevé des aéronefs, on pourrait aussi créer de telles redevances environnementales pour les émissions de GES attribuables aux aéronefs. Dans le cadre d'une coopération internationale, au moins à l'échelle régionale, on pourrait dissuader les compagnies aériennes de choisir, en fonction du prix du carburant, les aéroports qui servent à l'avitaillement en carburant ou comme plaque tournante des lignes long-courrier.

A long terme, si l'on veut que les émissions de CO₂ et de NO_x dues aux aéronefs diminuent de façon importante, il faudra probablement mener à bien des travaux de RD&D et exploiter les incitations offertes par le marché pour élaborer et appliquer des techniques et des pratiques de moindre intensité énergétique (SAR II, 21.3.1.3) et mettre au point et utiliser des carburants tirés des sources d'énergie renouvelables (SAR II, 31.3.3.3). Des barrières institutionnelles et techniques importantes, comprenant les problèmes de sécurité, s'opposent aujourd'hui à la mise en place de telles techniques.

¹⁰ Dans le cadre du protocole de Montréal et du processus international d'évaluation de la couche d'ozone, et en collaboration avec l'OACI, le GIEC a accepté d'effectuer une évaluation des incidences, sur l'atmosphère de la planète, des émissions des aéronefs, ce qui comprend l'évaluation des techniques et des mesures qui permettraient de réduire ces émissions. Les résultats de cette évaluation seront publiés en 1998.

4. SECTEUR INDUSTRIEL¹¹

4.1 Introduction

D'après les estimations, le secteur mondial de l'industrie¹² a consommé 91 EJ d'énergie directement destinée à une utilisation finale (y compris l'énergie verte) pour dégager une valeur ajoutée de $6,7 \times 10^{12}$ dollars des Etats-Unis d'Amérique, ce qui a entraîné des émissions de 1,8 GtC. En tenant compte des utilisations industrielles de l'électricité, on estime à 161 EJ l'énergie primaire consommée par le secteur industriel et à 2,8 GtC les émissions qui en découle, soit 47 % des émissions mondiales de CO₂ (SAR II, 20.1; tableaux A1 à A4). Les émissions de GES imputables au secteur découlent non seulement de sa consommation d'énergie, mais aussi des procédés qu'il emploie. A ce sujet, toutefois, la fiabilité des estimations varie. Les effluents gazeux des procédés industriels comprennent notamment (SAR II, 20.2.2) :

- le CO₂ issu de la fabrication de la chaux et du ciment (procédé de calcination), de l'acier (fabrication de coke et de fonte d'affinage), de l'aluminium (oxydation des électrodes), de l'hydrogène (raffinage et industrie chimique) et de l'ammoniac (engrais et produits chimiques);
- les CFC, les HFC et les hydrochlorofluorocarbones (HCFC) produits comme solvants, gaz propulseurs d'aérosol, frigorigènes et agents de gonflement pour mousse;
- le CH₄ issu de divers procédés industriels (fer et acier, raffinage du pétrole, ammoniac et hydrogène);
- le N₂O issu de la fabrication de l'acide nitrique et de l'acide adipique (nylon); les hydrocarbures perfluorés, tels que le tétrafluorométhane (CF₄) et l'hexafluoroéthane (C₂F₆), issus de la fabrication de l'aluminium (électrolyse) et servant à la fabrication des semi-conducteurs; et l'hexafluorure de soufre (SF₆) issu de la fabrication du magnésium.

Dans les pays cités à l'Annexe I, le secteur industriel représente généralement entre 25 et 30 % de la consommation d'énergie totale. Dans les pays non cités à l'Annexe I, cette proportion est en moyenne de 35 à 45 %, mais a atteint jusqu'à 60 % en Chine en 1988. On a observé dans les pays à économie de transition cités à l'Annexe I une diminution de la consommation industrielle d'énergie qui, vraisemblablement, ne s'inversera pas avant la seconde moitié des années 90. Il va sans dire que pour parvenir à leur conjoncture économique actuelle, les pays ont suivi des trajectoires très variées dans le domaine de l'utilisation des combustibles fossiles. Les variations de la proportion d'énergie consommée par l'industrie, suivant les pays, découlent non seulement des différences d'intensité énergétique, mais aussi de la croissance plus rapide du secteur industriel dans les pays non cités à l'Annexe I, de la transition des pays de l'OCDE cités à l'Annexe I du secondaire vers le tertiaire, d'une amélioration du rendement énergétique dans l'industrie de transformation et du déplacement de certaines industries grandes consommatrices d'énergie des pays de l'OCDE cités à l'Annexe I vers les pays non cités à l'Annexe I (SAR II, 20.2.1).

Entre 1990 et 1995, les émissions de carbone imputables au secteur industriel dans l'Union européenne et dans les Etats-Unis d'Amérique sont demeurées au-dessous des maximums observés entre 10 et 15 ans auparavant, tandis qu'elles n'évoluaient pas au Japon. Dans les pays non cités à l'Annexe I, les émissions de CO₂ imputables au secteur industriel ont continué d'augmenter compte tenu de la progression du secteur, et ce, malgré une diminution de l'intensité énergétique dans certains pays comme la Chine. Si les pays non cités à l'Annexe I continuent d'améliorer leur intensité énergétique et s'orientent, comme les pays de l'OCDE cités à l'Annexe I, vers une décarbonation dans le domaine énergétique, il se pourrait que les émissions totales de GES attribuables aux pays en développement augmentent plus lentement que ce qui était prévu suivant les scénarios IS92 du GIEC. La figure 2, qui présente les émissions de CO₂ imputables au secteur industriel par rapport au PIB par habitant, montre que, dans certains pays, ces émissions ont diminué ou sont demeurées constantes, malgré une croissance économique importante, par suite de l'amélioration de l'intensité énergétique, de la décarbonation dans le domaine ou de changements structurels dans l'industrie.

4.2 Techniques de réduction des émissions de GES dans le secteur industriel

Techniquement, il est possible, pour les pays de l'OCDE cités à l'Annexe I, d'atteindre à l'avenir 25 % de réduction des émissions de CO₂ imputables au secteur industriel. Il suffirait pour cela d'appliquer des technologies comparables à celles exploitées dans les installations de transformation efficaces de la génération actuelle, au fur et à mesure du renouvellement normal des biens de production (SAR II, SPM 4.1.1). Dans le cas des pays à économie de transition cités à l'Annexe I, les solutions industrielles visant à réduire les émissions de GES se rattachent de près aux décisions prises en matière de réaménagement économique et à la forme que prendra la reconversion industrielle.

4.2.1 Lancement de techniques et procédés nouveaux

Certes les procédés industriels ont beaucoup gagné en efficacité ces deux dernières décennies, mais l'amélioration du rendement énergétique constitue toujours le meilleur moyen de réduire les émissions de CO₂. Le potentiel de réduction le plus fort est détenu par les pays à économie de transition cités à l'Annexe I et les pays non cités à l'Annexe I, où l'intensité énergétique industrielle (mesurée soit en EJ/tonne de produits, soit en EJ/valeur économique) est généralement entre deux et quatre fois plus grande que dans les pays de l'OCDE cités à

¹¹ Pour rédiger le présent chapitre, les auteurs se sont inspirés du document SAR II, chapitre 20 (auteurs principaux : T. Kashiwagi, J. Bruggink, P.-N. Giraud, P. Khanna et W. Moomaw).

¹² Dans les scénarios IS92, et donc dans le présent document, le secteur industriel mondial englobe les activités industrielles dans le domaine de la fabrication, de l'agriculture, de l'exploitation minière et de la sylviculture.

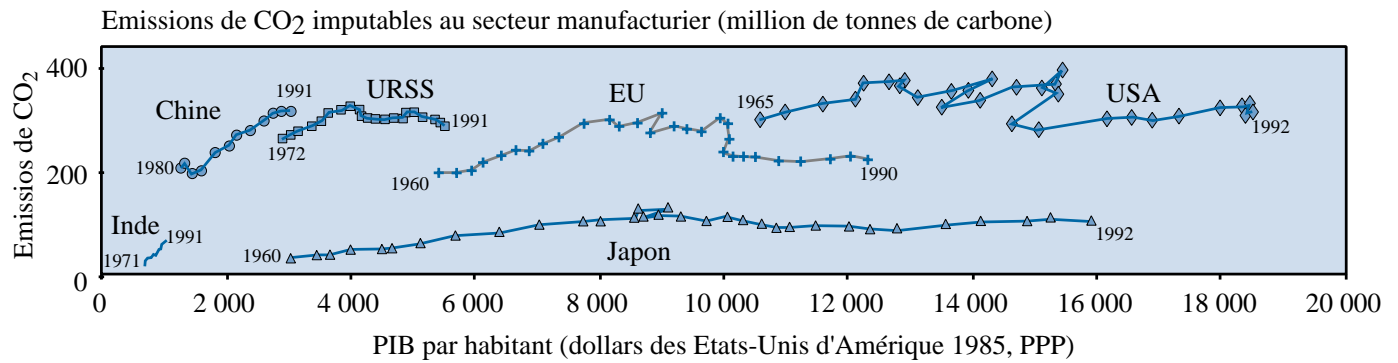


Figure 2: Tracé de l'évolution des émissions de CO₂ imputables à l'utilisation des combustibles fossiles dans le secteur manufacturier aux Etats-Unis d'Amérique, dans les 15 pays qui forment maintenant l'Union européenne (hormis l'ancienne RDA), au Japon, en Chine, en Inde et dans l'ancienne Union soviétique. La définition du secteur industriel est celle de l'OCDE et on inclus dans les émissions de CO₂ celles associées aux procédés de raffinage et à la fraction d'électricité que l'industrie utilise (SAR II, 20.2.3, Figure 20-1). Le secteur manufacturier est un sous-secteur qui s'inscrit dans l'ensemble de toutes les activités industrielles dont il est question dans le présent document.

l'Annexe I. Il existe encore néanmoins de nombreuses possibilités d'augmenter les réductions dans les pays de l'OCDE. A titre d'exemple, les procédés industriels les plus efficaces nécessitent encore trois à quatre fois la quantité minimale d'énergie thermodynamique requise par les procédés de l'industrie chimique et de l'industrie métallique primaire (SAR II, 20.3). Dans les pays de l'OCDE, les gains de rendement les plus importants sont intervenus dans les domaines des produits chimiques, de l'acier, de l'aluminium, du papier et du raffinage du pétrole, ce qui laisse penser qu'il devrait être relativement facile aux pays non cités à l'Annexe I et aux pays à économie de transition d'obtenir des gains encore plus importants.

4.2.2 Remplacement des combustibles

Il est possible de réduire les émissions de CO₂ selon un bon rapport coût-efficacité par un passage à des combustibles industriels à faible teneur en carbone tels que le gaz naturel; cette transition est déjà en marche dans de nombreuses régions. Il convient cependant de veiller à ce qu'une augmentation des émissions due aux fuites de gaz naturel ne vienne neutraliser les réductions obtenues. L'utilisation efficace de la biomasse dans les systèmes de cogénération à turbine à vapeur et à turbine à gaz peut aussi contribuer à la réduction des émissions, comme cela a été démontré dans les industries des pâtes et papiers, forestière et agricole (pour la canne à sucre notamment) (SAR II, 20.4).

4.2.3 Cogénération et utilisation de l'énergie thermique en cascade

Un recours accru à la cogénération et à l'utilisation en cascade de l'énergie thermique résiduelle présente un potentiel important de réduction des émissions de GES, tant pour les combustibles fossiles que pour les biocombustibles. Comme cela a été démontré dans plusieurs pays cités à l'Annexe I, la production combinée électricité-chaleur ou l'utilisation de l'énergie thermique en cascade est économique et efficace dans de nombreux cas. Il serait par exemple possible, dans les industries

grandes consommatrices de charbon, de réduire de moitié les émissions de CO₂ sans changer de combustible mais en utilisant la cogénération. Pour offrir les plus fortes réductions possibles, l'utilisation de l'énergie thermique en cascade, selon laquelle on récupère et réutilise successivement la chaleur de faible température à des fins appropriées, nécessite une démarche industrielle écologique associant plusieurs procédés industriels et besoins en matière de chauffage ou de réfrigération, tant pour les locaux que l'eau, mais probablement aussi des efforts de coopération entre les entreprises et des investissements conjoints (SAR II, 20.4).

4.2.4 Perfectionnement des procédés

D'après les estimations, les charges d'alimentation industrielles représentent 16 % de l'énergie consommée dans le secteur industriel, cette énergie finissant en grande partie sous forme de CO₂. Le fait de remplacer le gaz naturel en tant que source d'hydrogène pour l'industrie, par la biomasse ou l'électrolyse de l'eau grâce à des sources d'énergie ne libérant pas de carbone, permettrait de réduire les émissions de carbone imputables à la fabrication de l'ammoniac et d'autres produits chimiques. Et, si les coûts sont suffisamment bas, on pourrait aussi parvenir à remplacer ainsi le charbon à coke dans la fabrication du fer. Il y a lieu de coordonner les efforts visant à produire de l'hydrogène à moindre coût, comme charge d'alimentation, avec ceux visant à produire de l'hydrogène comme carburant pour les transports (SAR II, 20.4; SAR III, 9.4).

Les transformations apportées aux procédés industriels peuvent réduire considérablement les émissions de GES, voire même les éliminer. Des programmes lancés sans contrainte aux Etats-Unis d'Amérique et en Allemagne ont permis de réduire de 50 % les émissions d'hydrocarbures perfluorés dues à la fabrication de l'aluminium et de plus de 90 % celles d'oxydes nitreux provenant de la fabrication de nylon (SAR II, 20.3).

4.2.5 Remplacement des matériaux

Le fait de remplacer les matériaux responsables d'importantes émissions de GES par d'autres matériaux ayant les mêmes fonctions peut apporter des réductions considérables. A titre d'exemple, la fabrication d'une tonne de ciment produit 0,34 tonne de carbone (provenant à 60 % de l'énergie utilisée et à 40 % des déchets gazeux du procédé). Dans la fabrication du ciment, il serait possible de réduire les émissions de CO₂ en remplaçant le charbon par du gaz naturel ou du pétrole, mais aussi par d'autres techniques (ex. : remplacement du ciment par des cendres volantes ou utilisation de combustibles résiduels). Le passage à d'autres matériaux de construction pourrait entraîner des améliorations encore plus importantes. Dans un plancher en béton, il entre 21 fois l'énergie qu'il faut pour construire le même plancher mais en bois; la fabrication du ciment engendre de surcroît des émissions de CO₂ dues au procédé de calcination. En outre, plus les matériaux sont denses plus il faut émettre de GES pour les transporter. Par exemple, le fait d'utiliser des matériaux d'emballage relativement légers permet de réduire les émissions imputables au transport. L'utilisation de végétaux comme charges d'alimentation peut aussi réduire les émissions de CO₂. Beaucoup de grandes entreprises de transformation du bois ont d'ores et déjà associé à leur production première de bois d'œuvre ou de pâtes et papiers la fabrication de produits chimiques. L'Inde fournit un effort considérable pour se doter d'un produit phytochimique qui servirait de matière première énergétique. Il n'est cependant pas toujours simple de remplacer certains matériaux, il faut avant tout pouvoir trouver des matériaux de remplacement ayant les qualités requises par les cahiers des charges (SAR II, 20.3.4).

4.2.6 Recyclage des matériaux

Le recyclage et la réutilisation de biens composés de matériaux dont la fabrication consomme une quantité d'énergie considérable peuvent permettre d'économiser l'énergie et réduire en outre les émissions de GES dans l'atmosphère. Ainsi, en fabriquant de l'acier, du cuivre, du verre ou du papier à partir de matières de récupération (recyclées) au lieu de matières premières, on rejette quatre fois moins de CO₂ dans l'atmosphère. Dans le cas de la fabrication de l'aluminium, cette proportion est bien plus grande. On estime à 29 Mt la quantité de carbone que l'on pourrait éviter de rejeter dans l'environnement en augmentant de 10 % le recyclage de ces matières dans les pays de l'OCDE. Selon les cas, le matériau recyclé retrouve son état initial et il est réintroduit au même point du processus ou bien sa qualité se dégrade successivement et il sert alors à des applications nécessitant des matériaux de moins bonne qualité. Il est nécessaire d'encourager l'innovation technique pour que la qualité des matériaux recyclés s'améliore (SAR II, 20.2.4).

4.3 Mesures de réduction des émissions de GES dans le secteur industriel

Diverses mesures sectorielles, brièvement examinées ci-après et dans le tableau 8, pourraient permettre de stimuler l'amélioration du rendement énergétique et la réduction des émissions

liées aux procédés industriels (SAR II, 20.5 ; SAR III, 11). Par ailleurs, certains instruments s'appliquant à l'ensemble de l'économie (ex. : réduction progressive des subventions accordées au secteur de l'énergie et adoption de taxes sur le carbone) pourraient entraîner une réduction des émissions dans le secteur en encourageant l'emploi de procédés de moindre intensité énergétique ou utilisant moins de combustibles fossiles. Il est question de ces instruments dans le chapitre 9 du présent document.

4.3.1 Programmes axés sur le marché

4.3.1.1 Mesures d'incitation

Il serait possible de concevoir des aides fiscales qui encourageraient les entreprises des pays de l'OCDE cités à l'Annexe I à poursuivre leurs efforts d'innovation dans le domaine des procédés à bon rendement énergétique et à faible émission de GES. La plupart des procédés industriels ont une durée de vie relativement courte, de l'ordre d'une décennie au plus, tandis que les installations sont utilisées durant plusieurs décennies. Il est donc possible de saisir maintes occasions, dans le cadre de la rotation normale des biens de production, d'appliquer rapidement des techniques peu polluantes aux procédés de fabrication. A l'heure actuelle, étant donné que les émissions de GES font partie des effets externes non répercutés dans les prix, aucune raison, autre que la maximisation du profit, ne pousse les entreprises à opter, dans le cadre du processus de planification des nouveaux procédés ou produits, en faveur des stratégies entraînant le moins d'émissions de GES. Même lorsqu'il s'avère rentable d'appliquer des techniques à faible taux d'émission de GES, certaines barrières peuvent s'y opposer. Il faudrait par conséquent créer des mesures d'incitation supplémentaires pour encourager les entreprises des pays de l'OCDE cités à l'Annexe I à profiter du cycle naturel de renouvellement des biens de production pour mettre en place des techniques, des moyens et des installations de fabrication à faible taux d'émission de GES, ce qui permettrait de réaliser de nouvelles réductions. Il se pourrait que l'application d'un système de taxes accélérant la dépréciation favorise un tel processus.

Par ailleurs, il serait possible d'accélérer encore la réduction des émissions en encourageant, par des aides financières, l'industrie à adopter des installations de cogénération, à utiliser davantage les sources d'énergie renouvelables ou à utiliser davantage de matières de récupération. Et même en l'absence d'aides financières, il suffirait simplement de lever ce qui fait obstacle à l'utilisation de la cogénération dans le domaine industriel pour obtenir des résultats.

4.3.1.2 Marchés publics

Les gouvernements pourraient établir des critères qu'ils appliqueraient aux achats publics de biens de consommation, de façon à minimiser les émissions de GES découlant de la fabrication et de l'emploi de ces biens. En introduisant suffisamment de souplesse dans l'application de ces critères, il serait possible d'encourager les fournisseurs à mettre au point des

Tableau 8 : Exemples choisis de mesures visant à atténuer les émissions de GES dans le secteur industriel

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement ^a	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
Techniques et procédés nouveaux <ul style="list-style-type: none"> – Réduction par l'hydrogène des oxydes métalliques dans les minerais – Fabrication d'hydrogène et d'ammoniac sans émission de carbone – Electrodes non réactives adaptées à la fabrication de l'aluminium – Fabrication de l'aluminium sans fluor 	RDD <ul style="list-style-type: none"> – Mise au point de techniques de fabrication de l'hydrogène sans émission de carbone et à faible coût – Mise au point d'électrodes – Mise au point d'un procédé de fabrication 	Incidences favorables sur le climat <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des émissions de CO₂ atteignant 4 % par an en 2050 Autres effets <ul style="list-style-type: none"> – Réduction de la pollution de l'air due au coke 	Rapport coût-efficacité <ul style="list-style-type: none"> – Coûts élevés à court terme Aspects macroéconomiques <ul style="list-style-type: none"> – Transformation éventuelle des charges d'alimentation industrielles tirées du charbon 	Facteurs administratifs et institutionnels <ul style="list-style-type: none"> – Modérés dans la phase de recherche – Laboratoires gouvernementaux, universitaires et industriels Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Obtention de fonds de financement auprès des gouvernements
Amélioration du rendement énergétique <ul style="list-style-type: none"> – Amélioration de l'efficacité des ampoules, des moteurs et des pompes – Récupération améliorée de la chaleur – Utilisation de l'énergie thermique en cascade (à savoir, récupération de la chaleur résiduelle de faible température à des fins appropriées) 	Mécanismes axés sur le marché <ul style="list-style-type: none"> – Incitations fiscales en faveur du rendement énergétique, du passage à des combustibles moins polluants et de la réduction des émissions de GES – Élimination progressive des subventions en faveur des produits et combustibles libérant des GES – Taxes sur les émissions de GES – Marchés publics – Permis négociables, nationaux et internationaux Initiatives internationales <ul style="list-style-type: none"> – Actions entreprises conjointement parmi les pays cités à l'Annexe I – Incitations au financement multilatéral – Partage et transfert de technologie 	Incidences favorables sur le climat <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des émissions de CO₂ atteignant 25 % par an dans le secteur industriel des pays cités à l'Annexe I – Réduction plus importantes dans les pays en développement et les pays d'Europe orientale Autres effets <ul style="list-style-type: none"> – Réduction de la pollution de l'air 	Rapport coût-efficacité <ul style="list-style-type: none"> – Élevé Aspects macroéconomiques <ul style="list-style-type: none"> – Réforme fiscale abaissant les charges sur les revenus et le capital Équité <ul style="list-style-type: none"> – Moyens de transmettre la technologie aux pays en développement et à ceux de l'Europe orientale – Compte tenu de l'augmentation des prix à la consommation, besoin éventuel de compensations en faveur des consommateurs à faible revenu 	Facteurs administratifs et institutionnels <ul style="list-style-type: none"> – Efforts des pouvoirs publics pour changer le code des impôts – Principal effort fourni par le secteur – Coordination des systèmes de chauffage urbain par les pouvoirs publics Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Opposition possible de la part des entreprises du secteur de l'énergie Facteurs administratifs et institutionnels <ul style="list-style-type: none"> – Comptabilité complexe pour l'AIJ – Institutions actuelles adéquates Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Nécessité de garantir au pays-hôte l'autorité sur les milieux récepteurs
Remplacement des combustibles <ul style="list-style-type: none"> – Passage au gaz naturel – Passage à la biomasse (en particulier pour les produits forestiers, le papier et les produits agricoles) – Passage aux sources d'énergie renouvelables (séchage solaire) – Remplacement de l'électricité quand cela réduit les émissions de GES 	Dispositions réglementaires <ul style="list-style-type: none"> – Normes d'émission de GES – Compensations et abattements sur les émissions, entre fabrication et utilisation – Élimination des barrières réglementaires, commerciales et conventionnelles 	Incidences favorables sur le climat <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des émissions de CO₂ atteignant 20 % par an en 2020 dans le secteur industriel Autres effets <ul style="list-style-type: none"> – Réduction de la pollution de l'air 	Rapport coût-efficacité <ul style="list-style-type: none"> – Élevé Aspects macroéconomiques <ul style="list-style-type: none"> – Évolution accélérée par une internalisation des coûts de tous les combustibles Équité <ul style="list-style-type: none"> – Choix entre cultures vivrières et cultures énergétiques 	Facteurs administratifs et institutionnels <ul style="list-style-type: none"> – Modérés; principal effort fourni par le secteur Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Opposition de la part des producteurs des combustibles à remplacer

Tableau 8 (suite)

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement ^a	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
Cogénération –Chaleur et électricité combinées (nouvelles installations industrielles et modernisation des anciennes) –Turbines à gaz/cycle combiné –Piles à combustible	Dispositions réglementaires –Garantie d'un marché pour la chaleur et l'électricité produites par les industries	Incidences favorables sur le climat –Réduction des émissions de CO ₂ atteignant 15 % par an en 2020 dans le secteur industriel Autres effets –Réduction de la pollution de l'air	Rapport coût-efficacité –Coûts Rapport coût-efficacité –Elevé Aspects macroéconomiques –Restructuration partielle du secteur	Facteurs administratifs et institutionnels –Modérés; principal effort fourni par le secteur Facteurs politiques –Choix éventuellement difficile de l'emplacement des systèmes de chauffage urbain
Perfectionnement des procédés –Réduction de N ₂ O dans la fabrication du nylon –Réduction de CF ₄ dans la fabrication de l'aluminium –Elimination des HCFC	Accords volontaires –Initiatives communes gouvernement/secteur industriel Dispositions réglementaires –Conventions internationales et lois nationales	Incidences favorables sur le climat –Réduction des émissions atteignant 2 à 5 % en équivalent CO ₂ par an en 2010 Autres effets –Protection de la couche d'ozone par les réductions de N ₂ O et de HCFC	Rapport coût-efficacité –Elevé	Facteurs administratifs et institutionnels –Modérés; principal effort fourni par le secteur Facteurs politiques –Part de bienveillance dans les relations entre les pouvoirs publics, le secteur et le public
Remplacement des matériaux –Remplacement des métaux par les matières plastiques –Remplacement du ciment par le bois ou le plastique –Plus les matériaux sont légers, moins leur transport libère de CO ₂ –Utilisation de produits chimiques tirés de végétaux	Accords volontaires –Objectifs de réduction des émissions de GES –Amélioration des milieux récepteurs de GES –Objectifs de rendement énergétique Mécanismes axés sur le marché –Taxes et incitations –Marchés publics	Incidences favorables sur le climat –Indéterminées Autres effets –Réduction de la pollution de l'air	Rapport coût-efficacité –Indéterminé Aspects macroéconomiques –Désorganisation des industries existantes Equité –Bouleversement pour certaines emplois	Facteurs administratifs et institutionnels –Modérés; principal effort fourni par le secteur Facteurs politiques –Opposition du secteur à la réglementation
Recyclage et réutilisation des matériaux –Prise en compte du démontage à la conception –Prise en compte de la réutilisation à la conception –Récupération en cascade des matériaux recyclés de moindre qualité	Dispositions réglementaires –Indication du contenu Mécanismes axés sur le marché –Incitations fiscales –Retrait des barrières commerciales Dispositions réglementaires –Collectes publiques/privées de matériaux à recycler –Indication du contenu recyclé	Incidences favorables sur le climat –Pour une augmentation du recyclage de 10 %, réduction atteignant 29 MtC par an dans les pays de l'OCDE Autres effets –Réduction des déchets solides et utilisation moindre des ressources	Rapport coût-efficacité –Elevé Aspects macroéconomiques –Utilisation moindre des matières premières Equité –Création d'emplois à l'échelle régionale, près des emplacements où les produits sont utilisés	Facteurs administratifs et institutionnels –Modérés; principal effort fourni par le secteur Facteurs politiques –Engagement direct du public dans la résolution des problèmes –Opposition du secteur à la réglementation

^a Les réductions sont chiffrées compte tenu de la structure que l'industrie manufacturière connaissait en 1990. Les réductions découlant des différentes solutions techniques peuvent ne pas être cumulatives.

produits peu polluants qui répondent aux besoins publics, mais aussi à ceux plus vastes du marché.

4.3.2 Programmes de réglementation

4.3.2.1 Normes et compensations en matière d'émissions

Pour mieux s'assurer d'un résultat, il est possible d'établir des normes d'émission de GES pour chaque industrie et chaque produit, semblables aux normes de rendement énergétique s'appliquant aux appareils électroménagers ou aux véhicules. L'application de normes de rendement ou de performance peut permettre de lever divers types d'obstacles et ainsi de faire évoluer l'industrie vers des procédés de fabrication à moindre taux d'émission de GES. Parmi les obstacles en question, on peut citer le manque d'information sur les produits à haut rendement énergétique, les analyses financières ou les critères d'investissement qui exagèrent l'importance des frais d'investissement par rapport aux coûts de fonctionnement, ou encore la difficulté d'obtenir des produits de meilleur rendement énergétique auprès des fournisseurs. Il peut cependant se révéler difficile de s'entendre sur des normes qui s'appliqueraient à différents types d'équipements pour différentes applications, et onéreux de veiller à l'application de ces normes et à la contrôler, sans compter que cela pourrait faire monter les prix à la consommation. Par ailleurs, l'adoption de telles dispositions réglementaires pourraient aller à l'encontre de la tendance actuelle qui favorise la souplesse.

Les pouvoirs publics pourraient stimuler la fabrication de produits d'un meilleur rendement énergétique en offrant aux entreprises certains abattements quand elles fabriquent des produits moins polluants à l'usage, et ce à titre de compensation par rapport à la mise aux normes de la fabrication. Dans beaucoup de cas, l'usage des produits finis, notamment les ordinateurs, les automobiles et les ampoules électriques, consomme bien plus d'énergie et émet bien plus de GES que leur fabrication. Le rapport est de 10 à 1 pour les automobiles.

4.3.3 Accords volontaires

Les accords librement conclus aux Etats-Unis d'Amérique et en Europe ont véritablement permis aux industries de réduire leur consommation d'énergie et les émissions de GES en les encourageant à fabriquer ou à installer des appareils d'éclairage, des ordinateurs, du matériel de bureau et des enveloppes de bâtiment d'un meilleur rendement énergétique. On inclut dans ces accords les objectifs de réduction des émissions, négociés mais librement adoptés, le choix volontaire de produits ou de procédés à haut rendement énergétique, les efforts collectifs de recherche et développement et les accords quant à la surveillance et à la comptabilisation des réductions d'émissions découlant d'actions volontaires. Les accords librement consentis par les groupes industriels pour améliorer la qualité de l'ensemble de l'environnement pourraient englober aussi un objectif portant sur la réduction des émissions de GES (ex. : extension des dispositions contractuelles relatives à l'environnement entre les pouvoirs publics et le secteur privé aux

Pays-Bas), comme le permettrait le processus ISO 1400¹³. Il serait également possible d'établir des critères de faible teneur en GES s'appliquant aux fournisseurs, à l'échelle tant nationale qu'internationale. Cela donnerait lieu à des accords privés qui pourraient s'inspirer de l'élimination des CFC dans les cahiers des charges établis par de nombreuses entreprises d'électronique avant la période d'abandon progressif en 1995. L'Agence de protection de l'environnement des Etats-Unis d'Amérique a évalué avec un degré de certitude acceptable les réductions d'émission qu'il serait possible de réaliser dans le cas des HFC et celui des GES libérés par la fabrication de l'aluminium, ainsi que pour les programmes *Green Lights* et *Energy Star*. Les entreprises qui passent de tels accords en retirent de meilleures relations avec le public ainsi que d'autres avantages économiques (notamment la perspective de fabriquer et vendre de nouveaux produits), à savoir des éléments essentiels qui prônent les actions volontaires.

4.3.4 Recherche, développement et démonstration

Il est indispensable de lancer dans un avenir rapproché les programmes de RD&D qui nous permettront de créer et commercialiser de nouvelles techniques industrielles en vue d'atteindre les objectifs d'émission établis pour la période allant de 2020 à 2050. A titre d'exemple, pour que l'hydrogène puisse devenir une charge d'alimentation et un combustible à émission de carbone nulle, il faut dès à présent lancer les travaux qui aboutiront à des techniques de production et à des infrastructures de distribution abordables. Il faut également procéder à une évaluation systématique de l'efficacité des diverses actions gouvernementales déjà en vigueur ou dont l'application est proposée, dans les différents pays, pour déterminer celles qui entraîneront la réduction d'émissions de GES la plus importante au meilleur coût.

4.3.5 Initiatives internationales

4.3.5.1 Conditions spéciales favorables aux pays à économie de transition cités à l'Annexe I et aux pays non cités à l'Annexe I

Le processus de réindustrialisation offre aux pays à économie de transition de grandes possibilités d'introduire des procédés de fabrication efficaces et à faible émission de carbone pour remplacer les industries inefficaces, qui émettent de grandes quantités de carbone. Un tel changement nécessitera en grande partie une restructuration de l'économie, puisque une industrie manufacturière de substitution remplacera l'industrie lourde. En outre, comme il est probable que l'augmentation de la demande industrielle d'énergie provienne principalement des pays non cités à l'Annexe I au cours des décennies à venir, c'est en introduisant aussitôt que possible de nouvelles techniques et de nouveaux procédés de fabrication que ces

¹³ ISO 14000 est un système de gestion de l'environnement certifié par un organisme indépendant, établi par l'Organisation internationale de normalisation non gouvernementale.

économies industrielles naissantes parviendront à abaisser le plus le taux de croissance de leurs émissions futures de GES.

Les permis négociables et les actions entreprises conjointement¹⁴ pourraient se révéler des moyens utiles pour réduire les émissions de GES dans le secteur industriel, puisqu'ils encourageraient les investissements dans les techniques et les procédés de fabrication à haut rendement énergétique. Ces types de mesures sont examinés plus en détail au chapitre 9.

Les entreprises des pays de l'OCDE cités à l'Annexe I ont aussi la possibilité de lancer des opérations conjointes avec les entreprises et les gouvernements des pays à économie de transition cités à l'Annexe I et des pays non cités à l'Annexe I.

4.3.5.2 Barrières aux initiatives internationales

Les désaccords sur les droits de propriété intellectuelle et le manque de capitaux et de devises fortes font obstacle au transfert des technologies employées dans les industries modernes vers les pays non cités à l'Annexe I et les pays à économie de transition cités à l'Annexe I. L'insuffisance de capacité, l'absence de fondement légal dans le domaine de l'environnement, ou encore des facteurs institutionnels peuvent aussi constituer des barrières. Le droit et les conventions actuels peuvent également s'opposer aux actions que les entreprises pourraient mener en coopération pour réduire les émissions de GES. Beaucoup de pays disposent de lois antitrust visant à empêcher une collusion sur les prix et la formation de monopoles. Au sein de l'Organisation mondiale du commerce, certains craignent que la protection de l'environnement soit éventuellement un frein au libre-échange. Pour déterminer comment les entreprises peuvent mener des actions en faveur de l'environnement (en réduisant les émissions de GES par exemple) sans mettre en question les raisons à l'origine des règles qui s'y opposent, il convient d'examiner chacun de ces cas. Plus le rôle du

secteur privé prendra de l'ampleur dans la réduction des émissions de GES dues à l'industrie, plus il faudra de transparence dans les actions menées dans ce sens et, par conséquent, de mécanismes de vérification et de suivi relevant de tierces parties, telles que les ONG, les organismes gouvernementaux et les organisations internationales.

4.4 Réductions des émissions mondiales de carbone attribuables aux techniques et aux mesures

Dans le secteur industriel des pays cités à l'Annexe I, il est prévu, selon les scénarios IS92 du GIEC, que la consommation totale d'énergie et les émissions de CO₂ augmentent à peu près comme suit : 122 EJ et 2,1 GtC en 1990, 165 EJ (entre 141 et 181 EJ) et 2,7 GtC (entre 2,1 et 3,1 GtC) en 2010, 186 EJ (entre 154 et 211 EJ) et 2,9 GtC (entre 2,1 et 3,5 GtC) en 2020, et enfin 196 EJ (entre 140 et 242 EJ) et 2,6 GtC (entre 1,4 et 3,7 GtC) en 2050. Le même calcul appliqué cette fois à l'ensemble des pays de la planète donne une croissance annuelle moyenne plus forte de près de 1 %, ce qui montre l'importance de la croissance du secteur industriel dans les pays non cités à l'Annexe I.

On estime (en se fondant sur l'hypothèse de la stabilité structurelle du secteur industriel) que les pays cités à l'Annexe I ont la possibilité de réduire de 25 % les émissions de CO₂ d'origine industrielle, par rapport aux rejets de 1990, en se contentant de remplacer les installations et les procédés dont ils disposent aujourd'hui par les solutions techniques les plus efficaces actuellement exploitées. Il suffit que ce remplacement intervienne suivant le cycle normal de renouvellement des biens de production pour qu'il se révèle efficace par rapport au coût. Cette possibilité semble réalisable tant du point de vue technique que du point de vue économique (SAR II, SPM 4.1.1). Il est difficile d'évaluer les réductions d'émissions possibles par rapport au scénarios IS92 dans le cas des pays à économie de transition cités à l'Annexe I et dans celui des pays non cités à l'Annexe I. Il est probable cependant que ces réductions soient importantes, si l'on tient compte des installations actuelles à forte intensité énergétique et des possibilités, qu'offrira la croissance dans ces régions, de mettre en œuvre des procédés et des techniques à meilleur rendement énergétique.

¹⁴ Dans le chapitre 11 du document SAR III, l'expression "joint implementation" (application conjointe) englobe les actions entreprises conjointement dont il est question ici.

5. SECTEUR DE L'ÉNERGIE¹⁵

5.1 Introduction

Le secteur de l'énergie englobe toute une série de procédés complexes qui permettent l'extraction des ressources énergétiques, la conversion de ces ressources en énergie facilement utilisable et la distribution de l'énergie en fonction de la demande. Depuis presque deux siècles, on observe que la consommation mondiale d'énergie croît à un rythme annuel moyen d'environ 2 %, ce qui varie toutefois considérablement suivant les époques et les régions (SAR II, SPM.4.1). Si les tendances observées jusqu'à présent se poursuivent, les émissions de GES dues à la consommation d'énergie augmenteront plus lentement que la consommation d'énergie en général et que les besoins du secteur de l'énergie en particulier. Pour l'intervalle de valeurs que représente l'ensemble des scénarios IS92 établis par le GIEC, on a calculé que les émissions de CO₂ dues à la consommation d'énergie augmenteraient comme suit : de 6 GtC en 1990, elles atteindraient 7 à 12 GtC d'ici à 2020, puis 6 à 19 GtC d'ici à 2050 (Climate Change, 1994.6), ce qui comprend pour le secteur de l'énergie 2,3 à 4,1 GtC (1,4 à 2,9 GtC dans les pays cités à l'Annexe I) d'ici à 2020 et 1,6 à 6,4 GtC (1 à 3,1 GtC dans les pays cités à l'Annexe I) d'ici 2050.

Il est peu probable que l'on connaisse avant longtemps des problèmes d'approvisionnement en énergie compte tenu des réserves et ressources fossiles disponibles et du potentiel qu'offrent les sources d'énergie renouvelables (SAR II, B.3.3). Il en va de même pour l'évolution future de l'énergie nucléaire qui ne devrait pas connaître de problèmes d'approvisionnement en uranium et en thorium. De surcroît, les sources d'énergie renouvelables offrent des possibilités considérables à long terme, mais il plane beaucoup d'incertitudes sur les dépenses qu'il faudra engager pour en concrétiser une partie importante. De nombreux facteurs interviennent en effet dans la détermination de ces dépenses : depuis les travaux de recherche, développement et démonstration (RD&D), en passant par l'application rapide de certaines techniques dans des créneaux spécialisés, jusqu'au choix de l'emplacement géographique (SAR II, B.5.3.1). Le tableau 9 fournit un résumé des réserves et des ressources énergétiques mondiales en unité d'énergie, avec la teneur en carbone correspondante et indique les potentiels associés aux différentes sources d'énergie renouvelables (SAR II, B.3.3.1).

Les techniques et les infrastructures du secteur de l'énergie possédant par nature une longue durée de vie économique, les transitions profondes s'étalent sur de nombreuses décennies. La mise en place des mesures techniques et des actions gouvernementales demande par conséquent beaucoup de temps. On estime toutefois que, sur une période de 50 à 100 ans, l'ensemble de la filière d'approvisionnement en énergie sera remplacée au moins deux fois. Sur le plan technique, il est possible de réaliser une réduction importante des émissions dans le secteur de l'énergie en se conformant à l'échéancier normal des investissements consacrés au remplacement de l'infrastructure et des équipements usés ou obsolètes (SAR II, SPM.4.1.3).

Les réductions que peuvent apporter séparément les solutions citées dans la présente évaluation ne sont pas cumulatives, car certaines solutions en excluent d'autres ou leurs effets risquent d'être comptabilisés deux fois. Il convient donc d'évaluer de façon méthodique la possibilité d'appliquer des ensembles combinés de mesures et de politiques en faveur de l'atténuation des émissions, et leurs incidences éventuelles, au niveau des filières énergétiques, tout en tenant compte de l'équilibre entre l'offre et la demande auquel il faut veiller tant à l'échelle régionale qu'à celle de la planète. Afin d'évaluer les incidences techniques éventuelles à long terme de diverses combinaisons de mesures au niveau des filières énergétiques dans leur globalité, par opposition aux différentes technologies prises individuellement, on a élaboré un grand nombre de scénarios futurs. L'élaboration de scénarios a conduit à l'analyse, dans le deuxième rapport d'évaluation (SAR II, SPM.4.1.4), des diverses variantes d'un système d'approvisionnement en énergie à faible taux d'émission de CO₂, baptisé LESS. Les scénarios du système LESS sont des constructions intellectuelles permettant d'envisager de nombreuses combinaisons de moyens techniques qui pourraient permettre de réduire les émissions de CO₂ dans le monde de sorte qu'elles n'atteindraient plus que 4 GtC environ d'ici à 2050 et 2 GtC environ d'ici à 2100 (SAR, Syn.Rpt., 5.8). La littérature apporte un fort crédit à la possibilité d'atteindre les caractéristiques de rendement et de coût retenues pour les techniques de production d'énergie dans les scénarios du système LESS, et ce, malgré des incertitudes que l'on ne pourra lever avant que les travaux de RD&D aient abouti et que ces techniques aient été testées sur le marché (SAR II, SPM.4.1.4; SAR, Syn.Rpt., 5.9). En 1993, d'autres travaux d'élaboration de scénarios ont amené le Conseil mondial de l'énergie à présenter un scénario à orientation écologique qui aboutissait à des réductions d'émissions analogues (SAR II, 19.3.1.4). Ces travaux d'élaboration de scénarios reposent par nature sur des spéculations et des hypothèses sur les possibilités de réduction, sur les coûts à court et à long termes des techniques à mettre en place et sur toutes leurs conséquences socio-économiques et environnementales. Il convient de poursuivre la mise au point et l'analyse de tels scénarios, car on pourra vérifier ainsi avec le temps la cohérence interne de différentes hypothèses, y compris les interactions possibles entre, notamment, les hypothèses qui mettent en relation au sein de systèmes évolutifs la consommation d'énergie, la croissance économique, l'utilisation des sols et la croissance démographique (GIEC 1994, II, SPM).

¹⁵ Pour rédiger le présent chapitre, les auteurs se sont surtout inspirés du document SAR II, chapitre 19 intitulé *Energy Supply Mitigation Options* (auteurs principaux : H. Ishitani, T. Johansson, S. Al-Khouli, H. Audus, E. Bertel, E. Bravo, J. Edmonds, S. Frandsen, D. Hall, K. Heinloth, M. Jefferson, P. de Laquil III, J.R. Moreira, N. Nakicenovic, Y. Ogawa, R. Pachauri, A. Riedacker, H.-H. Rogner, K. Saviharju, B. Sørensen, G. Stevens, W.C. Turkenburg, R.H. Williams et F. Zhou) et chapitre B (auteurs principaux : N. Nakicenovic, A. Grubler, H. Ishitani, T. Johansson, G. Marland, J.R. Moreira et H.-H. Rogner) ainsi que du document SAR III et dans une moindre mesure des résumés à l'intention des décideurs de ces deux documents (SAR II, SPM et SAR III, SPM).

Tableau 9 : Réserves et ressources d'énergie dans le monde, leur teneur en carbone, les potentiels d'ici à 2020-2025 et les potentiels maximums techniquement réalisables^a

	Consommation (1860–1990)		Consommation (1990)		Reserves reconnues/ Potentiels d'ici à 2020–2025		Ressources de Base/ Potentiels maximums	
	EJ	Gt C	EJ	Gt C	EJ	Gt C	EJ	Gt C
Pétrole								
Classique	3 343	61	128	2,3	6 000	110	8 500	156
Non classique	–	–	–	–	7 100	130	16 100	296
Gaz								
Classique	1 703	26	71	1,1	4 800	72	9 200	138
Non classique	–	–	–	–	6 900	103	26 900	403
Charbon	5 203	131	91	2,3	25 200	638	125 500	3 173
TOTAL COMBUSTIBLES FOSSILES	10 249	218	290	5,7	50 000	1 053	>186 200	4 166
Energie nucléaire ^b	212	–	19	–	1 800	–	>14 200	–
					EJ/yr		EJ/yr	
Hydraulique	560	–	21	–	35–55	–	>130	–
Géothermique	–	–	<1	–	4	–	>20	–
Eolienne	–	–	–	–	7–10	–	>130	–
Energie des océans	–	–	–	–	2	–	>20	–
Solaire	–	–	–	–	16–22	–	>2 600	–
Biomasse	1 150	–	55	–	72–137	–	>1 300	–
TOTAL ENERGIE RENOUELVABLES	1 710	–	76	–	130–230	–	>4 200	–

^a Le tableau s'inspire des tableaux B-3 et B-4 (SAR II, B,3,3,1),
^b Les réserves et ressources d'uranium naturel sont de fait multipliées par 60 dans le cas de l'utilisation de réacteurs à neutrons rapides, – signifie sans objet ou négligeable,

5.2 Techniques de réduction des émissions de GES dans le secteur de l'énergie

Voici certaines techniques prometteuses, qui ne sont pas classées ici par ordre de priorité : conversion plus efficace des combustibles fossiles; passage à des combustibles fossiles à faible teneur en carbone ; décarburation des gaz de combustion et des combustibles et stockage du CO₂; passage à l'énergie nucléaire; et passage à des sources d'énergie renouvelables (SAR II, SPM.4.1.3). Chacune de ces solutions présente des caractéristiques particulières qui en déterminent le rapport coût-efficacité ainsi que l'acceptabilité auprès de la société et des pouvoirs publics. Il convient d'en évaluer les coûts et les incidences sur l'environnement par des analyses complètes des cycles de vie. Dans l'encadré 3, on examine, pour une sélection de techniques d'atténuation, le potentiel techniquement réalisable en matière de réduction des émissions de CO₂.

5.2.1 Augmentation du rendement de conversion des combustibles fossiles

De façon générale, les nouvelles techniques offriront vraisemblablement de meilleurs rendements de conversion. On estime par exemple qu'il serait possible de faire passer le rendement de la production d'électricité d'une moyenne mondiale d'environ 30 % actuellement à plus de 60 % à long terme. En outre, le re-

cours à la production combinée d'électricité et de chaleur, appliquée, quand cela est possible, à des procédés industriels ou encore au chauffage ou à la climatisation des locaux, permet une amélioration sensible du rendement des combustibles (SAR II, SPM.4.1.3.1). L'intégration de la conversion énergétique allant de températures très élevées à des températures très basses, que l'on appelle aussi utilisation ou récupération de l'énergie séquentielle ou en cascade, laisse espérer d'autres augmentations de rendement (SAR II, 20.4.2.3).

Certes les dépenses associées à ces augmentations de rendement dépendront de nombreux facteurs, y compris le taux de rotation des biens de production, le taux d'actualisation et les résultats des travaux de recherche et développement, mais certaines techniques modernes présentent d'ores et déjà un bon rapport coût-efficacité par comparaison avec certaines installations existantes, d'un moins bon rendement ou qui émettent davantage de GES. Il se pourrait que certaines solutions techniques pénètrent sur le marché actuel, notamment la production d'électricité à cycle combiné. Pour mettre en œuvre d'autres solutions, les pouvoirs publics devront mener des actions combinées, pouvant inclure notamment : accorder à titre permanent des subventions au secteur de l'énergie, internaliser les coûts externes, financer des travaux supplémentaires de RD&D sur les techniques à taux d'émission de GES faible ou nul, et lancer des mesures temporaires d'incitation à l'introduction rapide de ces techniques sur le

marché, dès qu'elles sont prêtes à être commercialisées (SAR II, chapitre 19, résumé à l'intention des décideurs). En conséquence, bien qu'il soit possible d'améliorer le rendement de la production d'électricité dans le monde, cette amélioration risque d'entraîner des dépenses supplémentaires et de ne pas se concrétiser si les pouvoirs publics ne prennent pas les actions qui s'imposent pour réduire les émissions de GES.

Le potentiel théorique des augmentations de rendement est très important, mais les filières énergétiques actuelles sont très loin d'atteindre les rendements maximums théoriques que suggère le deuxième principe de la thermodynamique. De nombreuses études montrent que, par rapport à ces rendements théoriques (exergie), la plupart des procédés de conversion actuels sont peu efficaces. Il faudra vaincre beaucoup de résistances passives avant de pouvoir concrétiser ne serait-ce qu'une fraction de ce potentiel et surmonter de nombreuses barrières, telles que le comportement social, les structures de générations, les coûts, les lacunes relatives à la dissémination de l'information et des connaissances et les insuffisances en matière d'incitations par les pouvoirs publics. En ce qui concerne les combustibles fossiles, indépendamment des coûts, on peut déceler, à partir des plus fortes augmentations de rendement que l'on puisse envisager, les domaines où l'on pourrait obtenir les réductions d'émissions les plus importantes (SAR II, B.2.2).

Ce sont en général le processus normal de déclassement des équipements dans les filières énergétiques et les prévisions de croissance de la demande qui déterminent l'application de techniques efficaces de nouvelles générations. A court terme, l'augmentation du rendement fondée sur la rotation normale des biens de production sera plus rapide dans les pays qui connaîtront la croissance économique la plus rapide (SAR II, 19.1). C'est donc dans les pays cités à l'Annexe I en cours de transition vers une économie de marché et dotés de systèmes de conversion d'énergie inefficaces, que l'on peut envisager les plus fortes augmentations de rendement.

Dans le monde, le rendement moyen des centrales à combustible fossile est de 30 % environ; il est de 35 % dans les pays de l'OCDE. Si l'on admet que, dans les pays cités à l'Annexe I, le rendement type d'une centrale au charbon récente (équipée de dispositifs de désulfuration et de dénitrification) est de 40 %, le fait d'augmenter le rendement de la production d'électricité de 1 % entraînerait une réduction des émissions de CO₂ de 2,5 % (SAR II, 19.2.1.1). A plus long terme, de nouvelles techniques permettant de produire de l'électricité à partir du charbon avec un meilleur rendement seront appliquées; il s'agira notamment des cycles à générateur de vapeur à pression supercritique, de la combustion en lit fluidisé sous pression et de la gazéification intégrée à cycle combiné. Certaines sont déjà sur le marché et d'autres doivent encore faire l'objet de travaux de RD&D.

Pour ce qui est des combustibles fossiles, les rendements de conversion les plus élevés sont obtenus par les centrales à cycle combiné alimentées au gaz naturel : 45 % actuellement, 55 % sous peu et plus encore à plus lointaine échéance. Les coûts d'investissement des centrales à cycle combiné sont inférieurs

de 30 % à ceux des centrales classiques alimentées au gaz naturel, mais le prix de l'électricité dépendra des coûts des combustibles, habituellement plus élevés pour le gaz naturel que pour le charbon. Par ailleurs, les centrales à cycle combiné sont plus chères que celles à cycle simple, d'un moins bon rendement mais aussi plus rapides à installer (SAR II, 19.2.1.1).

La réduction possible des émissions de GES est proportionnelle à l'augmentation de rendement réalisée. Si l'on opte pour des techniques de pointe utilisant toutes le même combustible fossile, l'augmentation de rendement se traduit par une diminution des prix du combustible, ce qui peut souvent compenser les coûts d'investissement plus élevés. Les progrès techniques peuvent en outre apporter des avantages secondaires importants, tels qu'une réduction des émissions d'autres polluants (ex. : SO₂, NO_x et particules). Bien souvent les suppléments de coûts sont négligeables car l'augmentation de rendement ne nécessite pas des modifications techniques radicales. Les augmentations de rendement énergétique présentent aussi l'avantage qu'elles peuvent être reproduites.

Dans le cas de la cogénération ou production combinée électrique et chaleur, le rendement énergétique fait un bon puisqu'il atteint jusqu'à 80 voire 90 %, soit bien plus que la production distincte d'électricité et de chaleur (SAR II, 19.2.1.4). Les facteurs économiques qui entrent alors en jeu sont la disponibilité ou la création de réseaux de chauffage et de climatisation urbains et une densité suffisante de la demande.

5.2.2 *Passage à des combustibles fossiles à faible teneur en carbone*

Le passage à des combustibles dont le rapport atomique hydrogène/carbone est plus faible, notamment le passage du charbon au pétrole ou au gaz naturel, peut conduire à une réduction des émissions. Parmi les combustibles fossiles, le gaz naturel est celui qui rejette le moins de CO₂ par unité d'énergie : 15 kg C/GJ environ, contre 20 kg C/GJ environ pour le pétrole et 25 kg C/GJ environ pour le charbon (valeurs correspondant toutes à un faible pouvoir calorifique). Les combustibles à faible teneur de carbone permettent en général d'obtenir un meilleur rendement de conversion que le charbon. Il existe de vastes ressources de gaz naturel dans de nombreuses régions (SAR II, SPM 4.1.3.1). La nouvelle technique du cycle combiné, peu coûteuse et très efficace peut permettre de réduire considérablement le coût de l'électricité dans certaines régions où le prix du gaz naturel est relativement bas par rapport à celui du charbon.

En remplaçant le charbon par le gaz naturel sans modifier le rendement de conversion combustible/électricité, on pourrait réduire les émissions de 40 %. Compte tenu du rendement de conversion du gaz naturel, généralement plus élevé que celui du charbon (SAR II, 19.2.1), il serait possible d'atteindre une réduction des émissions par unité d'énergie de l'ordre de 50 %.

Bien que le gaz naturel soit une ressource abondante, plusieurs pays ne le comptent pas parmi leurs richesses naturelles. Par conséquent, si le passage au gaz naturel prenait de l'ampleur, les

dépendances énergétiques seraient modifiées, ce qui soulèverait des problèmes que les gouvernements devraient résoudre. Les dépenses d'investissement et les frais administratifs à engager pour un tel passage risquent d'être considérables, puisqu'il faudrait créer de nouvelles infrastructures de transport, de distribution et d'utilisation finale. Il se pourrait donc que les réductions d'émissions véritablement envisageables diffèrent beaucoup d'une région à l'autre, compte tenu de conditions locales telles que les prix des différents combustibles ou la disponibilité du gaz naturel.

Si elle se développe, l'utilisation du gaz naturel risque d'entraîner davantage de fuites de méthane (CH_4), principal élément de ce gaz. Il existe des méthodes permettant de réduire les émissions de CH_4 dans une proportion qui pourrait atteindre 30 à 90 % pour ce qui est de l'extraction du charbon, plus de 50 % dans le cas de la mise à l'air libre et du torchage du gaz naturel et jusqu'à 80 % quant aux fuites des réseaux de distribution de gaz naturel (SAR II, 22.2.2). Certaines de ces méthodes pourraient se révéler économiquement viables dans de nombreuses régions du monde, puisqu'elles apporteraient tout un éventail d'avantages et permettraient notamment d'utiliser le CH_4 comme source d'énergie (SAR II, 19.2.2.1).

5.2.3 *Décarburation des gaz de combustion et des combustibles, et stockage et piégeage du CO_2*

Il est possible de piéger et de stocker le CO_2 contenu dans les effluents gazeux des centrales alimentées aux combustibles fossiles, mais cela diminue le rendement de conversion et accroît sensiblement le coût de production de l'électricité. Une autre technique de décarburation consiste à utiliser les combustibles fossiles comme charge d'alimentation pour fabriquer des combustibles riches en hydrogène, notamment l'hydrogène lui-même, le méthanol, l'éthanol ou le méthane obtenu par gazéification du charbon. Les deux techniques donnent naissance à un flux de CO_2 pouvant être stocké dans des gisements épuisés de gaz naturel ou les océans, par exemple (SAR II, SPM 4.1.3.1). Compte tenu de son coût et du fait que la technique n'est pas encore au point, cette dernière solution ne présente, à court et à moyen termes, que des possibilités d'application restreintes (ex. : comme source de CO_2 utilisé dans la récupération assistée du pétrole) (SAR II, 19.2.3.1). Les coûts, les incidences sur l'environnement et l'efficacité de certaines techniques de stockage du CO_2 à plus long terme (dans les océans par exemple) sont encore largement inconnus (SAR II, SPM 4.1.3.1).

Dans le cas d'une centrale classique au charbon ayant un rendement de 40%, l'extraction de 87 % du CO_2 contenu dans les gaz de combustion (la teneur passant de 230 à 30 g C/kWh) ramènerait le rendement à 30 % et augmenterait de 80 % environ les coûts de production d'électricité, ce qui équivaldrait à 150 \$/tC non émis (SAR II, 19.2.3.1).

Dans le cas d'une centrale à cycle combiné alimentée au gaz naturel ayant un rendement de 52 %, le fait de réduire d'environ 82 % les émissions de CO_2 (pour passer de 110 à 20 g C/kWh) ramènerait le rendement à 45 % et augmenterait de 50 %

environ les coûts de production d'électricité, ce qui équivaldrait à 210 \$/tC non émis (SAR II, 19.2.3.1). Bien que les coûts de la réduction des émissions par tonne de carbone soient plus élevés pour le gaz naturel que pour le charbon, le coût supplémentaire par kWh est en réalité plus faible puisque le gaz naturel contient moins de carbone.

La gazéification du charbon accompagnée du piégeage du CO_2 par production d'un gaz de synthèse constitue aussi une technique de décarburation des combustibles. Dans le cas d'une centrale au charbon à gazéification intégrée à cycle combiné d'origine ayant un rendement de 44 %, le fait de réduire d'environ 85 % les émissions de CO_2 (pour passer de 200 à 25 g C/kWh) ramènerait le rendement à 37 % environ et augmenterait de 30 à 40 % les coûts de production d'électricité, ce qui équivaldrait à moins de 80 \$/tC non émis (SAR II, 19.2.3.2).

Actuellement, on étudie notamment une solution qui permettrait de réduire les coûts à l'avenir : il s'agit d'utiliser, dans la combustion, de l'oxygène au lieu de l'air, de manière que les effluents gazeux soient essentiellement constitués de CO_2 et de vapeur d'eau.

Une autre solution connexe consisterait à produire des gaz riches en hydrogène qui serviraient à la production d'électricité ou à d'autres applications. Dans le cas de la récupération du CO_2 par reformage à la vapeur du gaz naturel, on chiffre les coûts de piégeage et de stockage dans un gisement de gaz naturel peu éloigné à moins de 30 \$/tC non émis (SAR II, 19.2.3.2). L'exploitation future de techniques de conversion telles que les piles à combustible, susceptibles d'utiliser l'hydrogène avec un bon rendement, rendrait plus attrayante cette dernière solution. La distribution d'énergie finale sous forme d'électricité et d'hydrogène aurait pour effet d'éliminer virtuellement les émissions au point d'utilisation finale et de permettre de piéger et de stocker le carbone dans le secteur même de l'énergie.

Le stockage du CO_2 récupéré, dans les puits de pétrole et de gaz naturel, constitue encore une autre solution (SAR II, 19.2.3.3). On estime qu'il est possible de stocker dans les gisements de pétrole et de gaz de l'ensemble de la planète entre 130 et 500 GtC, ce qui constitue un potentiel d'atténuation important. On chiffre les coûts du stockage dans les gisements de gaz naturel terrestres à moins de 11 \$/tC, et les coûts de transport à environ 8 \$/tC pour un gazoduc de 250 km et d'une capacité utile de 5,5 MtC par an (SAR II, 19.2.3.3). Une autre solution consiste à stocker le CO_2 dans les couches de sel, que l'on trouve à différentes profondeurs sur la planète.

Les profondeurs des océans pourraient constituer le plus vaste réservoir de CO_2 (SAR II, 19.2.3.3). On pourrait en effet envisager d'immerger le CO_2 directement dans les océans, idéalement à une profondeur de 3 000 m, voire peut-être plus. Le CO_2 ainsi stocké serait éloigné de l'atmosphère durant au moins plusieurs siècles. Les incidences éventuelles sur l'environnement, sources d'inquiétudes, mais aussi la mise au point des techniques d'évacuation et l'évaluation des coûts nécessiteront davantage de recherche.

5.2.4 Passage à l'énergie nucléaire

Dans de nombreuses régions du monde, l'énergie nucléaire pourrait remplacer les combustibles fossiles utilisés pour produire l'électricité de base, à condition qu'il soit possible de lever de façon généralement acceptable les inquiétudes relatives notamment à la sécurité des réacteurs, au transport et à l'évacuation des déchets radioactifs et à la prolifération nucléaire (SAR II, SPM 4.1.3.2). Une analyse de sondages d'opinion indique que les craintes et les doutes du public à ce sujet portent principalement sur les points suivants : réelle nécessité économique, catastrophes à grande échelle, stockage des déchets radioactifs et usage détourné des matières fissiles (SAR II, 19.2.4).

Le prix de revient de l'électricité produite par le nucléaire varie suivant les pays entre 2,5 et 6 ¢/kWh. Dans le cas des nouvelles centrales, le prix de revient incluant les coûts de l'évacuation des déchets et ceux du démantèlement varient entre 2,9 et 5,4 ¢/kWh, pour un taux d'actualisation de 5 %, et entre 4 et 7,7 ¢/kWh, pour un taux d'actualisation de 10 % (SAR II, 19.2.4). Compte tenu du prix de revient normalisé de la production électrique de base, prévu pour le tournant du siècle, l'énergie nucléaire demeurera une solution viable dans plusieurs pays possédant des centrales en exploitation et en construction. Les coûts du nucléaire étant comparables à ceux du charbon, le prix de la réduction des émissions dans ce cas varieraient entre 120 \$/tC non émis et des coûts supplémentaires négligeables (si l'on suppose que le prix de la production électrique classique à partir du charbon est de 5 ¢/kWh, que le prix de la production électrique par le nucléaire se situe entre 5 et 7,7 ¢/kWh et que la quantité des émissions évitées est de 230 g C/kWh) (SAR II, 19.2.1.1).

On met au point de nouveaux types de réacteurs, tels les réacteurs modulaires à haute température, à réfrigérant gazeux, dont la sécurité et les performances économiques sont améliorées, puisque les délais de mise en œuvre sont raccourcis et les coûts de fonctionnement et d'entretien réduits. De plus l'intérêt se tourne de nouveau vers les réacteurs à neutrons rapides à sodium, il se tourne aussi vers de nouvelles techniques, telles que les accélérateurs à grande énergie, puisqu'il serait possible de les utiliser dans le domaine de la gestion et de l'élimination des matières fissiles. On élabore aussi d'autres concepts dans le but d'améliorer l'énergie nucléaire pour des applications autres que la production d'électricité, notamment pour répondre aux besoins en chaleur des procédés industriels et des systèmes de chauffage urbain. Par ailleurs, on peut envisager à long terme d'utiliser l'énergie nucléaire pour produire de l'hydrogène (SAR II, 19.2.4).

5.2.5 Passage aux sources d'énergie renouvelables

Les progrès techniques offrent de nouvelles possibilités et réduisent les coûts de production de l'énergie provenant de ces sources. A long terme, les sources d'énergie renouvelables pourraient répondre à une grande partie de la demande énergétique mondiale. Les réseaux peuvent facilement absorber des fractions croissantes d'une production intermittente, à condition de les équiper de modules de secours et de stockage ultra-

rapides (SAR II, SPM.4.1.3.2). L'exploitation viable des sources d'énergie renouvelables implique des émissions de GES faibles voire nulles. Quelques émissions de CO₂ sont à prévoir dans le cas d'une exploitation non durable de la biomasse, qui tendrait par exemple à réduire la biomasse sur pied et ou qui entraînerait la décomposition de la biomasse dans les retenues d'eau (SAR II, 19.2.5). Si l'on parvient à la développer tout en apportant une solution aux problèmes écologiques (ex. : incidences sur la diversité biologique) et à la concurrence avec d'autres utilisations du sol, l'énergie verte pourrait tenir une place importante sur les marchés de la production électrique et des combustibles (SAR II, SPM.4.1.3.2). De façon générale, les sources d'énergie renouvelables pourraient réduire considérablement les émissions de GES à comparer aux combustibles fossiles (SAR II, 19.2.5), à condition que leur rentabilité continue de croître et que le choix des sites ne soulève pas de problèmes.

5.2.5.1 Hydroélectricité

On estime à 14 000 TWh/an le potentiel techniquement réalisable qui comprend un potentiel économiquement réalisable à long terme se situant entre 6 000 et 9 000 TWh/an, compte tenu des facteurs sociaux, économiques, géologiques et financiers (SAR II, 19.2.5.1). La réduction des émissions de GES réalisable est fonction du combustible fossile remplacé. S'il s'agit de charbon, la réduction économiquement réalisable à long terme se situe entre 0,9 et 1,7 GtC (en fonction de la technique et du rendement) et s'il s'agit de gaz naturel, entre 0,4 et 0,9 GtC.

Selon les investissements engagés dans 70 pays en développement dans des projets hydroélectriques, au cours des années 90, on estime à 7,8 ¢/kWh le prix de revient moyen de l'hydroélectricité récente distribuée à l'utilisateur final. Les coûts d'investissement peuvent être élevés à l'heure actuelle et il est probable que le financement devienne un obstacle en raison des périodes d'amortissement particulièrement longues (SAR II, 19.2.5.1). La réduction des émissions de CO₂ découlant du remplacement de centrales modernes au charbon, ce que décrit l'ouvrage SAR II (19.2.1.1), coûterait en moyenne 120 \$/tC non émis (en supposant que le prix de la production électrique classique à partir du charbon est de 5 ¢/kWh et que la quantité des émissions évitées est de 230 g C/kWh) (SAR II, 19.2.1.1).

Les petites centrales hydroélectriques peuvent tenir une place importante à l'échelle régionale, en particulier quand elles sont rentables. Par ailleurs, la phase de construction des grandes centrales peut avoir des conséquences sociales et des incidences directes ou indirectes sur l'environnement, telles que la dérivation des eaux, la modification des pentes, la préparation du réservoir, la création des infrastructures destinées à la main-d'œuvre importante ou le fait de porter atteinte aux écosystèmes aquatiques, ainsi que des effets néfastes sur la santé. Les conséquences sociales comprennent le déplacement de la population ainsi qu'un effet emballement-effondrement sur l'économie locale. Les infrastructures connexes stimulent le développement économique de la région et apportent aussi un avantage supplémentaire pour l'agriculture, à savoir un réservoir d'eau (SAR II, 19.2.5.1).

**Encadré 3 : Réductions des émissions de CO₂ techniquement envisageables d'ici à 2020
selon le scénario IS92 du GIEC**

L'hypothèse de départ est la suivante : dans les nouvelles centrales que les pays cités à l'Annexe I installent entre 1990 et 2020, les techniques d'atténuation décrites dans le présent document sont appliquées à 50 % de la capacité de conversion, quels que soient les coûts, qui varient suivant les techniques. On examine six techniques différentes d'atténuation : le remplacement du charbon par le gaz naturel, la décarburation des gaz de combustion du charbon et du gaz naturel, le piégeage du CO₂ contenu dans le charbon, le remplacement du charbon et du gaz naturel par le nucléaire ou par la biomasse. L'intention n'est pas d'exécuter une évaluation complète des solutions d'atténuation dans le secteur de l'énergie. Compte tenu des contraintes imposées par les scénarios IS92, on ne présente que six exemples. L'atténuation des émissions que permettrait chacune des solutions techniques retenues est obtenue par une analyse de sensibilité du scénario IS92a et de l'intervalle de valeurs entre les scénarios IS92e et IS92c. Certaines solutions pouvant s'exclure mutuellement, leurs effets ne sont pas cumulables.

Les calculs se décomposent en un certain nombre d'étapes. Premièrement, on obtient par inférence l'augmentation de la capacité de production entre 1990 et 2020 selon les trois scénarios. Deuxièmement, on obtient également par inférence la courbe des capacités nouvelles qui permettront en partie, dans les pays cités à l'Annexe I, d'introduire des solutions techniques permettant une atténuation, en admettant que 50 % de ces nouvelles capacités appliqueront de nouvelles techniques d'atténuation. Troisièmement, on détermine les réductions des émissions de CO₂ pour les trois scénarios IS92, compte tenu des caractéristiques techniques décrites au chapitre 19 du document SAR II et des coefficients d'émission indiqués au chapitre B du même document. Enfin, on évalue les réductions d'émissions en pourcentage pour chacun des trois scénarios.

La mesure dans laquelle il est possible d'atteindre le potentiel techniquement réalisable sera fonction de la diminution future des coûts, du rythme auquel les nouvelles techniques seront mises au point et appliquées, des capacités de financement, du transfert de technologie ainsi que des mesures qui permettront de surmonter les différents obstacles non techniques, tels que les effets néfastes sur l'environnement, les problèmes d'acceptabilité sociale et d'autres encore liés à des conditions régionales, sectorielles et nationales particulières.

Techniques d'atténuation	Réductions des émissions de CO ₂ techniquement envisageables selon le scénario IS92a (et l'intervalle de valeurs entre les scénarios IS92e et IS92c)		
	Gt C	% des pays de l'Annexe I	% du monde
Remplacement du charbon par le gaz naturel, appliqué à la production d'électricité dans les pays cités à l'Annexe I	0,25 (0,01–0,4)	4,0 (2,0–6,0)	2,5 (1,0–4,0)
Décarburation des gaz de combustion (y compris dénitrification et désulfuration) du charbon, appliquée à la production d'électricité dans les pays cités à l'Annexe I	0,35 (0,1–0,6)	6,0 (3,0–8,0)	3,5 (1,5–5,0)
Décarburation des gaz de combustion (y compris dénitrification et désulfuration) du gaz naturel, appliquée à la production d'électricité dans les pays cités à l'Annexe I	0,015 (0,0–0,05)	0,5 (0,0–0,5)	0,15 (0,0–0,45)
Piégeage du CO ₂ contenu dans le charbon, avant combustion, appliqué à la production d'électricité dans les pays cités à l'Annexe I	0,35 (0,1–0,6)	6,0 (3,0–8,0)	3,5 (1,5–5,0)
Remplacement du gaz naturel et du charbon par le nucléaire, appliqué à la production d'électricité dans les pays cités à l'Annexe I	0,4 (0,15–0,5)	7,0 (3,0–9,5)	4,0 (2,0–5,5)
Remplacement du charbon par l'énergie de la biomasse (appliqué à la production d'électricité, à la fabrication de combustibles de synthèse et à une utilisation finale directe) dans les pays cités à l'Annexe I ^a	0,55 (0,25–0,85)	9,5 (5,5–12,0)	5,5 (3,0–7,0)

^a Les besoins en biomasse atteindraient entre 9 et 34 EJ/an, ce qui est inférieur au potentiel de la biomasse chiffrés pour 2020-2025 : entre 72 et 187 EJ (SAR II, B.3.3.2). Les chiffres sont supérieurs à ceux obtenus dans le chapitre 23 sur l'agriculture (SAR II) et ne peuvent être atteints qu'à condition que des actions soient prises allant au-delà des mesures agricoles.

5.2.5.2 *Energie de la biomasse*

Dans le potentiel d'énergie que représente la biomasse, il faut inclure les résidus urbains solides (RUS), les résidus industriels et agricoles, les forêts sur pied et les cultures énergétiques (SAR II, 19.2.5.2.1).

Les quantités d'énergie verte que l'on peut produire et les coûts de cette production sont fonction des conditions locales, telles que les disponibilités en terres et en déchets, et des techniques de production. De façon générale, sur le plan énergétique, le rapport production/apport des cultures vivrières de grande qualité est faible à comparer à celui des cultures énergétiques, ce dernier dépassant souvent dix fois le précédent. Les estimations quant aux coûts de la production de biomasse varient énormément. Si l'on se base sur les programmes de commercialisation réalisés au Brésil, il serait possible selon les estimations de produire 13 EJ/an d'énergie verte à un coût moyen de 1,7 \$/GJ dans le cas de copeaux de bois livrés. Les coûts sont plus élevés dans les pays cités à l'Annexe I. En ce qui concerne la production d'électricité dans ces pays, les coûts futurs de la biomasse sont estimés à 2 \$/GJ (SAR II, 19.2.5.2.1).

Le coût de la réduction des émissions que permettrait l'utilisation de diverses formes d'énergie verte, telles que l'électricité, la chaleur, le biogaz, ou les biocarburants dans les transports, dépend non seulement du coût de production de la biomasse, mais aussi des caractéristiques économiques des différentes techniques de conversion des combustibles. Dans le cas d'une production à petite échelle, en supposant que le coût de la biomasse s'élève à 2 \$/GJ, il est possible de produire de l'électricité pour un prix de revient se situant entre 10 et 15 ¢/kWh. Avec une biomasse moins coûteuse (0,85 \$/GJ), ce prix est alors inférieur à 10 ¢/kWh (SAR II, 19.2.5.2.2). Dans le cas du remplacement du charbon par la biomasse, les coûts de la réduction des émissions se situeraient entre 200 et 400 \$/tC non émis. Une unité future, intégrée à cycle gazogène à biomasse/turbine à gaz, ayant un rendement énergétique atteignant 40 à 45 % permettrait de produire de l'électricité pour un prix comparable à celui obtenu avec du charbon, si l'on suppose que la biomasse coûte 2 \$/GJ et le charbon entre 1,4 et 1,7 \$/GJ (SAR II, 19.2.5.2.2). Dans ce cas le coût de la réduction des émissions obtenue pourrait bien devenir négligeable.

Avec des biocombustibles évolués obtenus à partir de matières ligneuses, on peut envisager une production énergétique moins coûteuse et moins polluante que celle basée sur la plupart des biocombustibles classiques. Par ailleurs, l'éthanol, le méthanol et l'hydrogène sont potentiellement des biocombustibles prometteurs.

L'énergie verte moderne offre aussi des perspectives de revenus dans le milieu rural. Ces revenus pourraient permettre aux agriculteurs des pays en développement de moderniser leurs pratiques culturales et ils permettraient aussi de réduire la nécessité d'élargir la production puisque davantage de terres peu productives seraient cultivées. Dans les pays industrialisés, les revenus de la production de biomasse sur les terres

agricoles jugées excédentaires pourraient permettre aux pouvoirs publics d'éliminer progressivement les subventions à l'agriculture (SAR II, 19.2.5.2).

A l'heure actuelle, les techniques modernes de conversion de la biomasse ainsi que les plantations produisant de la biomasse en sont à leur début et nécessitent davantage de travaux de RD&D pour évoluer sur le plan technique et devenir économiquement viables. Compte tenu des inquiétudes à propos des disponibilités alimentaires futures, on peut être amené à penser que les pays d'Afrique et d'autres pays non cités à l'Annexe I n'auront pas de terres à consacrer à la production de biomasse (SAR II, 19.2.5.2.1). Pour savoir s'il y aura concurrence entre les différentes utilisations des sols, il faut se demander si ces pays pourront moderniser leur agriculture pour parvenir à des rendements équivalents à ceux qu'obtiennent les pays cités à l'Annexe I et si l'intensification de la production agricole s'opérera suivant des schémas acceptables tant sur le plan de l'environnement que sur celui de l'économie.

5.2.5.3 *Energie éolienne*

On estime que, au sein d'un grand réseau, l'énergie éolienne de nature intermittente pourrait fournir entre 15 et 20 % de la production annuelle d'électricité, sans que des dispositions particulières soient prises quant au stockage, aux dispositifs de secours et à la gestion de la charge appelée (SAR II, 19.2.5.3.2, 19.2.6.1). Il est prévu qu'en 2020 l'énergie éolienne pourrait fournir entre 700 et 1 000 TWh (SAR II, B.3.3.2) si cette forme d'énergie était choisie pour remplacer les combustibles fossiles et que l'on ne prenne pas en compte les coûts. Cela entraînerait une réduction des émissions de CO₂ de 0,1 ou 0,2 GtC par an.

Actuellement, le prix de revient de l'électricité tirée de l'énergie éolienne est d'environ 10 ¢/kWh en moyenne, mais il est très variable. D'ici à 2005 ou 2010, il se peut que l'énergie éolienne soit compétitive face aux combustibles fossiles et à l'énergie nucléaire. On a estimé que l'application d'une nouvelle technique type nécessiterait un investissement de 1 200 \$/kW et produirait de l'électricité à 6 ¢/kWh. Dans le cas de grandes fermes éoliennes, ces valeurs pourraient sensiblement baisser. On a calculé qu'il serait possible d'abaisser les prix jusqu'à 3,2 ¢/kWh pour des emplacements favorables, compte tenu d'un taux d'actualisation de 6 % (SAR II, 19.2.5.3.3). Le coût de la réduction des émissions de CO₂ ainsi obtenue est alors négligeable, voire même nul, ou négatif si l'électricité produite à partir du charbon est plus chère. Certains pays exploitent de grandes éoliennes qui ont parfois suscité l'opposition du public en raison de facteurs tels que le bruit des éoliennes, la nuisance visuelle et l'impact sur la faune (SAR II, 19.2.5.3.5).

5.2.5.4 *Energie solaire*

Les techniques photovoltaïques et thermo-hélioélectriques permettent de convertir directement le rayonnement solaire en électricité et en chaleur. La conversion photovoltaïque est déjà compétitive en tant que source d'électricité autonome, isolée des réseaux de distribution d'électricité. Elle ne l'est cependant pas

Tableau 10 : Exemples choisis de mesures et de solutions techniques visant à atténuer les émissions de GES dues à la production d'électricité.

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
Amélioration du rendement <ul style="list-style-type: none"> – Amélioration éventuelle du rendement des centrales thermiques, celui-ci devant passer de 30 % en moyenne actuellement à 60 % à long terme – Transport de l'énergie électrique – Raffineries – Production de combustibles de synthèse – Transport du gaz 	Programmes axés sur le marché <ul style="list-style-type: none"> – Taxes sur les émissions de GES – Taxes sur l'énergie – Permis d'émission négociables Dispositions réglementaires <ul style="list-style-type: none"> – Normes réglementaires de rendement Accords volontaires <ul style="list-style-type: none"> – Accords librement consentis avec les consommateurs – Réduction de l'énergie utilisée 	Incidences sur le climat <ul style="list-style-type: none"> – Réduction de tous les GES et autres polluants ; si le rendement de la conversion thermique passe de 35 à 40 %, la réduction des émissions de CO₂ atteint 12,5 % – A long terme, réduction éventuelle de 50 % Effets sur l'environnement <ul style="list-style-type: none"> – Amélioration de la qualité de l'air à l'échelle locale et réduction de la pollution à l'échelle régionale 	Rapport coût-efficacité <ul style="list-style-type: none"> – Changements progressifs possibles pour un supplément de coût faible ou nul Aspects macroéconomiques <ul style="list-style-type: none"> – Réduction des importations d'énergie Équité <ul style="list-style-type: none"> – Tendance à une grande équité et reproductibilité 	Facteurs administratifs et institutionnels <ul style="list-style-type: none"> – Il est possible de réaliser une bonne partie de l'amélioration envisageable même en l'absence de mesures ou de politiques directement en faveur d'une atténuation des GES – Diffusion de l'information Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Création d'une base et d'incitations en faveur d'accords volontaires
Passage à des combustibles à faible teneur en carbone <ul style="list-style-type: none"> – Du charbon au gaz naturel – Du pétrole au gaz naturel 	Programmes axés sur le marché <ul style="list-style-type: none"> – Taxes sur les émissions de GES – Taxes sur l'énergie tirée de certains combustibles – Permis d'émission négociables Dispositions réglementaires <ul style="list-style-type: none"> – Obligation d'utiliser un combustible en particulier Accords volontaires <ul style="list-style-type: none"> – Passage librement consenti à un tel combustible 	Incidences sur le climat <ul style="list-style-type: none"> – Réduction du CO₂ et d'autres polluants, toutes choses égales par ailleurs, de 40 % pour le charbon et de 20 % pour le pétrole – Le gaz naturel offrant souvent un meilleur rendement de conversion, la réduction des émissions de GES serait plus importante – Inconvénient possible : augmentation des émissions de CH₄ Effets sur l'environnement <ul style="list-style-type: none"> – Amélioration de la qualité de l'air à l'échelle locale et réduction de la pollution à l'échelle régionale 	Rapport coût-efficacité <ul style="list-style-type: none"> – Bon quand le gaz est disponible sur place, mais coût élevé des infrastructures – Incertitudes concernant les prix du gaz naturel à long terme Aspects macroéconomiques <ul style="list-style-type: none"> – A court et moyen termes, baisse possible des prix de l'électricité – Pour les pays ne disposant pas de réserves de gaz, dépendance accrue par rapport aux importations Équité <ul style="list-style-type: none"> – Concurrence internationale portant sur le gaz naturel à faible coût 	Facteurs administratifs et institutionnels <ul style="list-style-type: none"> – Nécessité de conclure des ententes commerciales à long terme sur le gaz – Compatibilité avec la décentralisation et la déréglementation dans le secteur de l'énergie – Encouragement à la cogénération et aux entreprises productrices d'électricité Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Inquiétudes sur la sécurité de l'approvisionnement, facteurs géopolitiques
Décarburation des gaz de combustion <ul style="list-style-type: none"> – Réduction du CO₂ (lavage) – Gazéification du charbon et production de gaz de synthèse – Production de gaz riches en hydrogène 	Programmes axés sur le marché <ul style="list-style-type: none"> – Taxes sur le carbone – Permis d'émission négociables Dispositions réglementaires <ul style="list-style-type: none"> – Normes d'émission – Réglementation sur les sites de stockage souterrain – Conventions internationales sur le stockage dans les océans Accords volontaires <ul style="list-style-type: none"> – Récupération éventuelle du CO₂ en cascade 	Incidences sur le climat <ul style="list-style-type: none"> – Réduction spécifique du CO₂ allant jusqu'à 85 % par kWh – Élimination/stockage avec perspectives incertaines quant au stockage dans les océans Effets sur l'environnement <ul style="list-style-type: none"> – Pour être efficace la décarburation suppose une désulfuration et une dénitrification à grande échelle ; elle entraîne donc une amélioration locale et régionale de la qualité de l'air 	Rapport coût-efficacité <ul style="list-style-type: none"> – Implique le moins de changements dans le secteur de l'énergie – Coûts du lavage élevés, entre 80 et 150 \$/tC, voire plus – Coûts supplémentaires du stockage – Diminution du rendement dans la production d'électricité Aspects macroéconomiques <ul style="list-style-type: none"> – Aucune grande restructuration dans le secteur de l'énergie – Augmentation de l'extraction des combustibles fossiles à l'échelle nationale et/ou des importations de combustibles Équité <ul style="list-style-type: none"> – Accès aux sites d'élimination du CO₂ 	Facteurs administratifs et institutionnels <ul style="list-style-type: none"> – RD&D sur le rejet et le stockage dans les océans – Accès aux gisements épuisés de gaz et de pétrole Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Accords internationaux sur l'élimination à grande échelle dans les océans

Tableau 10 (suite)

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
Energie nucléaire – Utilisation accrue de l'énergie nucléaire	Programmes axés sur le marché – Taxes sur le carbone – Permis d'émission négociables Dispositions réglementaires – Normes et codes – Non-prolifération Accords volontaires – Accords entre l'industrie du nucléaire, les exploitants et le public concerné RD&D – RD&D sur l'évacuation des déchets et sur la sécurité	Incidences sur le climat – Réduction de tous les GES et d'autres polluants, tels que les SO _x , les NO _x et les particules Effets sur l'environnement – Amélioration locale de la qualité de l'air – Rejets radioactifs accidentels et évacuation des déchets radioactifs	Rapport coût-efficacité – Dans des conditions spéciales, solution d'atténuation d'un bon rapport coût-efficacité – Coûts de démarrage élevés ; large fourchette de coûts allant en augmentant – Solution limitée à la production de base Aspects macroéconomiques – Dépenses moins importantes pour les importateurs de combustibles ; incertitudes quant à la rentabilité – Solution mal acceptée par le public Equité – Accès restreint à la technologie en raison du risque de prolifération	Facteurs administratifs et institutionnels – Solution non appuyée par le public – Inquiétudes notamment quant à la prolifération, à l'évacuation des déchets et à la sécurité Facteurs politiques – Stabilité du climat politique et solidité des mécanismes de contrôle – Accords internationaux sur l'évacuation des déchets radioactifs à grande échelle
Energie de la biomasse – Plantations énergétiques et sylviculture – Conversion de la biomasse pour produire électricité et chaleur – Gazéification de la biomasse et production de combustibles liquides – Hydrogène tiré de la biomasse	Programmes axés sur le marché – Modification structurelle des subventions agricoles – Taxes sur le carbone – Permis d'émission négociables Dispositions réglementaires – Réglementation des émissions – Zonage agricole Accords volontaires – Utilisation des terres peu productives pour les plantations énergétiques – Appui aux initiatives locales de bioconversion ou production de biocarburant RD&D – Appui de la RD&D pour réduire les coûts des unités évoluées de conversion	Incidences sur le climat – Résultat éventuel : aucune émission de CO ₂ – Solution éventuelle de piégeage du carbone Effets sur l'environnement – Réduction des autres polluants – Inquiétudes sur la diversité biologique et les monocultures	Rapport coût-efficacité – Les techniques évoluées de conversion ne sont pas encore disponibles à l'échelle industrielle, mais une accélération de la RD&D pourrait changer la situation Aspects macroéconomiques – Restructuration dans l'agriculture et peut-être dans la sylviculture – Développement économique des zones rurales Equité – Accès aux terres	Facteurs administratifs et institutionnels – Conflits portant sur l'utilisation des sols – Coopératives pour les plantations énergétiques – Ententes entre les entreprises productrices d'électricité – Compatibilité avec la décentralisation et la déréglementation dans le secteur de l'énergie – Diffusion de l'information Facteurs politiques – Stabilité de la stratégie du développement agricole et de celui des zones rurales
Energie éolienne (exemple de source d'énergie renouvelable intermittente) – Utilisation d'éoliennes dans les sites favorables – Isolées, non couplées au réseau – Couplées au réseau	Programmes axés sur le marché – Taxes sur le carbone – Permis d'émission négociables Dispositions réglementaires – Réglementation des émissions – Zonage des sites appropriés Accords volontaires – Solutions adoptées rapidement par les compagnies d'électricité RD&D – Appui de la RD&D pour réduire les coûts	Incidences sur le climat – Réduction de tous les GES et d'autres polluants, tels que les SO _x , les NO _x et les particules Effets sur l'environnement – Incidences éventuelles sur le paysage et sur la faune, bruit éventuel	Rapport coût-efficacité – Solution rentable dans les sites favorables – Large fourchette de coûts et donc incertitude quant aux facteurs économiques Aspects macroéconomiques – Développement économique des zones rurales	Facteurs administratifs et institutionnels – Compatibilité avec la décentralisation et la déréglementation dans le secteur de l'énergie – Diffusion de l'information – Zonage pour les fermes éoliennes – Accès aux réseaux de distribution Facteurs politiques – Stabilité de la stratégie dans le domaine de l'énergie

pour des applications de masse couplées aux réseaux. Pour un module autonome, les coûts d'investissement ont énormément baissé ces dernières années, mais ceux d'une filière atteignent encore entre 7 000 et 10 000 \$/kW, le prix de l'électricité produite se situant donc entre 23 et 33 ¢/kWh, et ce même dans les régions fortement ensoleillées (2 400 kWh/m²/an). On prévoit toutefois que les travaux de RD&D ainsi que les économies d'échelle entraîneront une baisse sensible du coût des filières photovoltaïques. Compte tenu de la modularité de la technique photovoltaïque, il est fort probable que l'expérimentation et les innovations techniques dans le domaine permettront une diminution des coûts (SAR II, 19.2.5.4.1). Dans des conditions normales de fonctionnement, les dispositifs photovoltaïques ne polluent pas, mais certains systèmes nécessitent l'emploi de matières toxiques dont la fabrication, l'utilisation et l'élimination présentent des risques.

A l'horizon 2020 ou 2025, on estime que le potentiel annuel de l'énergie solaire sera de 16 à 22 EJ (SAR II, B.3.3.2). La concrétisation de ce potentiel sera fonction des progrès accomplis par les techniques hélioélectriques quant aux coûts et au rendement. Dans le cas d'une concrétisation complète, indépendamment des coûts, la réduction des émissions de CO₂ pourrait atteindre de 0,3 à 0,4 GtC. Une centrale de 50 MW, avec la technologie de 1995 et une puissance installée de 2 300 \$/kW, pourrait produire de l'électricité à un prix situé entre 8 et 9 ¢/kWh dans des régions recevant un bon ensoleillement (SAR II, 19.2.5.4.1). Le coût de l'atténuation des émissions, par rapport à une électricité produite à partir de charbon au prix de 5 ¢/kWh, se situerait donc entre 130 et 170 \$/tC non émis; par rapport à une électricité produite à partir de gaz naturel à un prix analogue, il se situerait entre 270 et 350 \$/tC non émis. Ce coût n'inclut ni les facteurs propres à la filière énergétique, tels que les besoins en stockage, ni les profits à tirer éventuellement de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque en remplacement d'une source plus coûteuse, en période de pointe s'il y a corrélation entre la production et la demande de pointe.

Les estimations optimistes des coûts futurs de l'énergie photovoltaïque proposent des valeurs relativement basses : de 700 à 800 \$/kW entre 2020 et 2030 et entre 2,2 et 4,4 ¢/kWh pour l'électricité distribuée, suivant le degré d'ensoleillement (SAR II 19.2.5.4.1; Table 19.6). A ces coûts et si l'on ne tient pas compte des facteurs propres à la filière énergétique, l'énergie photovoltaïque engendrerait une réduction tant des coûts de production que des émissions, à comparer aux techniques classiques au charbon aux prix actuels. D'autres études sur la production d'électricité à partir de l'énergie photovoltaïque proposent des estimations de coûts en 2030 supérieures à ces valeurs de 50 à 100 %, suivant qu'il y ait ou non une intensification des travaux de RD&D.

A long terme, les filières thermo-hélioélectriques pourraient répondre à une part importante de la demande mondiale en électricité et en énergie. Ce type de technique fournit de la chaleur de haute température, ce qui permet d'atteindre un rendement de conversion d'environ 30 % (SAR II 19.2.5.4.2). Le coût de la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques a beaucoup baissé, de sorte que les centrales actuelles fournissent de

l'énergie en mode hybride à un prix situé entre 9 et 13 ¢/kWh. Quant au prix de l'énergie délivrée par les centrales à tour, les prévisions chiffrées sont bien plus basses : entre 4 et 6 ¢/kWh (SAR II 19.2.5.4.2).

Outre l'électricité, les filières thermo-hélioélectriques peuvent produire de la chaleur industrielle de haute température, il est possible de surcroît d'utiliser les centrales à tour pour produire des combustibles évolués, tels que l'hydrogène ou d'autres produits chimiques (SAR II 19.2.5.4.2). A l'échelle locale, les systèmes héliothermiques peuvent aussi répondre aux besoins en chauffage et en eau chaude des habitations, des commerces et des industries (SAR II 19.2.5.5).

5.2.5.5 *Energie géothermique et énergie des océans*

Vingt et un pays utilisent l'énergie géothermique pour produire de l'électricité. Le prix de l'électricité ainsi obtenue est d'environ 4 ¢/kWh, et celui de la chaleur produite de 2 ¢/kWh_{th}. Une quarantaine de pays utilisent directement l'eau géothermale; quatorze disposent d'une puissance installée supérieure à 100 MW_{th} (SAR II 19.2.5.6.1).

On associe divers types d'émissions à l'énergie géothermique, notamment le CO₂, le sulfure d'hydrogène et le mercure. Les techniques de pointe fonctionnent en circuit presque fermé et ne libèrent que très peu de polluants (SAR II 19.2.5.6.1). On estime à 4 EJ le potentiel de l'énergie géothermique d'ici à 2020 ou 2025 (SAR II, B.3.3.2). Les roches chaudes et sèches et d'autres gisements non hydrothermiques constituent de nouvelles ressources. Malgré l'importance qu'elle peut revêtir sur le plan économique locale, cette énergie ne peut apporter qu'une faible réduction des émissions de carbone.

S'agissant des océans, certes le flux énergétique total des marées et des vagues ainsi que des gradients thermiques et de salinité, sont considérables à l'échelle du globe, mais il est probable qu'au cours des cent prochaines années on n'en exploitera qu'une petite partie (SAR II 19.2.5.6.2).

5.3 **Mesures de réduction des émissions de GES dans le secteur de l'énergie**

Se reporter au tableau 10 qui fournit des exemples de mesures et de solutions techniques visant à atténuer les émissions de GES dues à la production d'électricité.

5.3.1 *Programmes axés sur le marché*

Les programmes axés sur le marché modifient directement le prix relatif des activités dans le domaine de l'énergie. Suivant des conditions assurant parfaitement le jeu de la concurrence, l'application d'un régime de taxes sur les émissions ou de contingents d'émission négociables amènerait les responsables des émissions à réduire celles-ci jusqu'à ce que les coûts marginaux des mesures d'atténuation égalent le montant des taxes sur les émissions ou le prix d'équilibre des contingents d'émission. Les deux instruments favoriseraient une dynamique de

rendement (minimisation des coûts à long terme, si les facteurs de production varient et qu'il soit possible de stimuler l'évolution technique), puisqu'ils incitent l'un comme l'autre les entreprises à conduire des travaux de RD&D sur les techniques de réduction des émissions pour éviter de payer des taxes ou d'acheter des contingents (SAR III, 11.5). Dans un cas, le coût des taxes sur les émissions est connu, mais l'ampleur de la réduction des émissions reste incertaine. Dans l'autre, c'est l'inverse, l'incertitude porte sur le prix des permis négociables.

5.3.1.1 Réduction progressive des subventions accordées à titre permanent

Les subventions accordées systématiquement dans le secteur de l'énergie faussent les indicateurs du marché aussi bien pour les producteurs que pour les consommateurs, elles peuvent abaisser les prix de l'énergie au-dessous des coûts réels et l'on observe une distorsion dans l'affectation des ressources intrinsèquement sous-optimale. Le fait de subventionner certaines technologies crée des barrières artificielles à l'entrée de nouvelles technologies sur le marché. Afin d'améliorer les possibilités d'entrée sur le marché de technologies modernes moins polluantes, on a proposé d'adopter une tarification au coût marginal et la minimisation, voire la disparition à long terme, des subventions systématiques qui tendent à accroître les émissions de GES (SAR II, SPM.4.4). Ces subventions absorbent de grandes quantités de capitaux et réduisent d'autant les capacités d'investissement en faveur du rendement énergétique, des travaux de RD&D portant sur les techniques d'atténuation des émissions de CO₂ ou d'autres activités économiques. Les subventions attribuées directement aux technologies énergétiques classiques représentent dans le monde plus de 300 milliards de dollars des Etats-Unis d'Amérique par an (SAR II, 19.4).

Toutefois, un tel raisonnement ne doit pas s'opposer à la possibilité de recourir à des subventions temporaires pour favoriser l'entrée sur le marché de techniques d'atténuation des émissions de GES, telles que l'utilisation des sources d'énergie renouvelables, de l'énergie nucléaire ou de la combustion propre du charbon. A titre d'exemple, le fait de garantir les prix aux producteurs indépendants qui utiliseraient des techniques libérant peu de carbone permettrait de réduire les risques économiques associés à l'application de telles techniques jusqu'à ce qu'elles parviennent à maturité.

5.3.1.2 Tarification des services énergétiques en fonction des coûts complets

Le sujet fait l'objet de controverses dans la littérature. Il n'existe pas de consensus sur la façon de valoriser les coûts (sociaux réels) externes de la production et de l'utilisation de l'énergie (SAR III, SPM.6). Si l'on parvenait à un tel consensus, la méthode de fixation des prix en fonction des coûts complets permettrait d'appliquer les mêmes règles à toutes les technologies énergétiques. Les coûts externes incluent notamment les coûts que les prix du marché ne prennent d'ordinaire pas en compte en l'absence d'intervention des pouvoirs

publics. La littérature en fournit divers exemples : la morbidité, la mortalité, les dégâts causés à l'environnement ou les effets éventuellement nocifs des incidences sur l'évolution du climat, les perspectives d'emploi, la compétitivité et d'autres coûts d'opportunité.

Si l'on tenait compte des externalités propres au secteur de l'énergie, on améliorerait la compétitivité de l'utilisation des énergies peu polluantes (SAR II 19.4). Sachant que les coûts externes des techniques existantes et nouvelles demeurent inconnus et qu'il est vraisemblable qu'ils varieront fortement suivant les pays et les régions, un pays qui déciderait unilatéralement d'appliquer la méthode de fixation des prix en fonction des coûts complets risquerait de mettre à mal, à court terme, la compétitivité de ses entreprises à l'échelle internationale. Il faudrait probablement passer des accords internationaux pour résoudre ce type de problème.

5.3.1.3 Contingents et permis d'émission négociables

Il est possible aussi d'appliquer d'autres mesures, notamment l'établissement de contingents d'émission et la mise en circulation de permis d'émission négociables. A l'échelle internationale, le fait de devoir satisfaire des contingents d'émission peut favoriser les actions entreprises conjointement qui permettraient un transfert de technologie et de fonds vers les pays non cités à l'Annexe I et certains pays à économie de transition cités à l'Annexe I, tout en contribuant à la mise en œuvre internationale des stratégies à moindre coût.¹⁶

5.3.1.4 Aide au financement

La pénurie de capitaux, en particulier dans les pays en développement et dans certains pays à économie de transition cités à l'Annexe I, constitue une barrière essentielle à l'application de solutions d'atténuation des émissions de GES. Ainsi lorsque plusieurs projets sont sur la balance, celui dont les coûts du cycle de vie sont relativement bas et qui libérera relativement peu d'émissions, mais dont la mise en œuvre requiert le plus de capitaux, risque fort de ne pas attirer les fonds nécessaires à son application. Les technologies du secteur de l'énergie entrent de surcroît en concurrence avec d'autres besoins de développement, dans l'obtention d'une quantité limitée de fonds. Il se pourrait pourtant que beaucoup de solutions d'atténuation ou d'autres solutions énergétiques créent sur place la technologie requise, ainsi que les infrastructures et les emplois qui vont de pair. Cela est vrai en particulier dans les zones rurales, où la décentralisation technologique pourrait contribuer à l'atteinte des objectifs de développement (SAR II, 19. Executive Summary). Il en est de même dans les pays industrialisés, où les capitaux requis pour financer la réduction des émissions de GES dues aux filières énergétiques pourraient offrir un meilleur rendement s'ils étaient investis autrement. On pourrait adopter des

¹⁶ Dans le chapitre 11 du document SAR III, l'expression "joint implementation" (application conjointe) englobe les actions entreprises conjointement dont il est question ici.

mesures pour que les technologies d'approvisionnement et de conversion suscitent davantage d'intérêt sur le marché. Ces mesures permettraient de résoudre certains problèmes de financement en réduisant les risques, l'incertitude et le montant des capitaux requis à l'avance. D'autres mesures seraient également adaptées, notamment des abattements pour dépréciation accélérée, des subventions de mise en marche et des prêts à des conditions de faveur (SAR II, SPM.4.4).

5.3.2 Dispositions réglementaires

Les modes d'action employés par de nombreux pays dans le secteur de l'environnement consistent à adopter des normes uniformes (portant sur les techniques ou sur le rendement) ou à engager directement des dépenses pour l'exécution de projets en faveur de l'environnement. Tout comme les incitations axées sur le marché, la première de ces stratégies exige des pollueurs qu'ils mènent des activités de réduction de la pollution. Selon la seconde, les pouvoirs publics engagent eux-mêmes des ressources pour améliorer la qualité de l'environnement. Ces deux stratégies tiennent une place prépondérante parmi les mesures prises ou à prendre pour atténuer le changement climatique planétaire (SAR III, 11.4).

Les normes et les codes présentent comme avantage celui de permettre en général une évaluation préalable de leurs effets sur les émissions de GES. Toutefois, l'inconvénient est que les coûts qu'ils entraînent sont souvent inconnus et peuvent être supérieurs à ceux découlant d'autres instruments axés sur le marché. Le pouvoir d'incitation à l'adoption de techniques d'atténuation associé à l'application d'une norme de rendement est, suivant les circonstances, parfois plus fort, parfois plus faible que celui obtenu grâce à un système de permis négociables (SAR III, 11.4.1).

La loi PURPA (Public Utilities Regulatory Policy Act - loi de réglementation des services publics), entrée en vigueur en 1978

aux Etats-Unis d'Amérique, est un exemple de disposition réglementaire. Elle obligeait les services publics d'électricité à acheter l'électricité à des producteurs privés, à un prix comprenant les économies à long terme, ce qui conduisit à la création d'un marché concurrentiel décentralisé. Les petites et moyennes unités de cogénération alimentées au gaz naturel ou à la biomasse prirent de l'expansion. C'est en grande partie à cette loi que l'on doit l'introduction dans les réseaux de plus de 10 000 MW produits à partir de sources d'énergie renouvelables (SAR II, 19.4). Selon certaines évaluations, l'application de telles dispositions réglementaires pourrait entraîner un enchérissement de l'électricité.

5.3.3 Accords volontaires

Il s'agit en général de mesures prises dans le propre intérêt des parties, avec l'appui des pouvoirs publics, dans l'intention de réduire les émissions de GES. De nombreux pays cités à l'Annexe I estiment que l'intérêt de ces accords repose dans leur souplesse. Les accords en question peuvent prendre différentes formes, à l'échelle tant nationale qu'internationale, notamment des ententes sur certains objectifs ou sur des rendements, des travaux de RD&D, des échanges d'information générale et des actions entreprises conjointement

Certaines entreprises, faisant preuve de clairvoyance, peuvent d'elles-mêmes prendre des mesures pour lutter contre les émissions de GES dans la crainte de devoir appliquer, en l'absence de réductions librement consenties, des dispositions réglementaires plus coûteuses. Cela pourrait expliquer pourquoi certaines formes d'accords volontaires s'appliquant au domaine de l'énergie à usage domestique ont vu le jour. La grande majorité des réductions d'émissions de GES découlant des actions annoncées ou lancées dans le cadre du Climate Change Action Plan des Etats-Unis d'Amérique, par exemple, sont le fruit d'initiatives prises volontairement dans l'intention d'améliorer le rendement énergétique (SAR III, 11.4.3).

Tableau 11 : Budget total de recherche-développement des gouvernements des pays membres de l'AIE (colonnes 1 à 7 : milliards de dollars des Etats-Unis d'Amérique, prix et taux de change de 1994) et PIB total (colonne 8 : billions de dollars des Etats-Unis d'Amérique, prix de 1993).

Année	(1) Energie fossile	(2) Fusion nucléaire	(3) Fusion nucléaire	(4) Economies d'énergie	(5) Energie renouvelable	(6) Autres énergie	(7) Total	(8) PIB	(9) % du PIB
1983	1,70	6,38	1,43	0,79	1,05	1,08	12,40	10,68	0,12
1984	1,60	6,12	1,44	0,70	1,02	0,99	11,88	11,20	0,11
1985	1,51	6,26	1,42	0,70	0,85	1,04	11,77	11,58	0,10
1986	1,51	5,72	1,31	0,59	0,66	0,94	10,74	11,90	0,09
1987	1,37	4,36	1,23	0,65	0,62	1,04	9,27	12,29	0,08
1988	1,46	3,64	1,13	0,53	0,62	1,19	8,58	12,82	0,07
1989	1,30	4,42	1,07	0,45	0,57	1,33	9,13	13,23	0,07
1990	1,75	4,48	1,09	0,55	0,61	1,15	9,62	13,52	0,07
1991	1,52	4,45	0,99	0,59	0,64	1,39	9,57	13,58	0,07
1992	1,07	3,90	0,96	0,56	0,70	1,28	8,48	13,82	0,06
1993	1,07	3,81	1,05	0,65	0,71	1,38	8,66		
1994	0,98	3,74	1,05	0,94	0,70	1,30	8,72		

5.3.4 Recherche, développement et démonstration

Pour qu'il soit possible d'atteindre les objectifs les plus ambitieux de réduction des émissions de GES et d'abaisser sensiblement les coûts actuels de nombreuses solutions techniques, encore faut-il que les innovations fassent rapidement progresser le secteur de l'énergie. Mais, ces dernières années, la tendance est à la diminution des investissements de RD&D dans le domaine de l'énergie, tant de la part du secteur privé que du secteur public (voir le tableau 11; SAR II, 19.4). Au cours de la dernière décennie, l'appui du secteur public aux travaux de RD&D dans le domaine de l'énergie a diminué d'un tiers en valeur absolue et de moitié en pourcentage par rapport au PIB (SAR II, 19.4). Par le passé, plus de la moitié des travaux de RD&D subventionnés par les gouvernements des pays membres de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) portaient sur l'énergie nucléaire et moins de 10 % sur les sources d'énergie renouvelables. Si l'on tient compte des économies d'énergie, ce sont plus de 80 % des travaux de RD&D qui sont consacrés aux techniques libérant peu ou pas d'émissions de GES.

Bien que beaucoup de solutions d'atténuation s'appliquant au secteur de l'énergie nécessitent davantage de RD&D, il importe que, selon la stratégie qu'ils auront décidé d'appliquer, les pouvoirs publics ne favorisent pas une technologie en particulier au détriment des autres. Fort heureusement, il se trouve que bon nombre des techniques prometteuses, notamment celles qui exploitent les sources d'énergie renouvelables et d'autres qui libèrent peu ou pas d'émissions de GES, nécessitent des investissements relativement modestes en RD&D, ce fait découlant en grande partie du caractère modulable et de la petite échelle de ces techniques (SAR II, 19.4). Il serait donc possible d'apporter un appui à toute une série de solutions, et ce, même si les ressources à accorder à la RD&D sont restreintes. On a estimé que les activités de recherche et développement sur différentes techniques de conversion des énergies renouvelables nécessiteraient une somme de l'ordre de 15 à 20 milliards de dollars des Etats-Unis d'Amérique répartie sur une vingtaine d'années (SAR II, 19.4).

Pour introduire de nouvelles technologies sur le marché, il est indispensable mais pas suffisant, de mener à bien des programmes de RD&D. Il convient aussi de lancer des projets et programmes commerciaux expérimentaux dans des contextes économiques et organisationnels réels pour tenter les marchés par de nouvelles technologies. Pour toute une série de techniques modulaires de petite échelle, notamment la plupart de celles utilisant les sources d'énergie renouvelables et les piles à combustible, il faut s'attendre à ce que les coûts de production baissent celle-ci allant croissant, par suite de l'effet d'apprentissage par l'expérience.

5.3.5 Mesures infrastructurelles

5.3.5.1 Retrait des barrières institutionnelles

Dans certains cas, le retrait des barrières institutionnelles peut attirer le secteur privé vers les techniques modernes utilisant les

sources d'énergie renouvelables. Par la réforme de la réglementation et la déréglementation (l'éclatement des monopoles de production, des réseaux de transport et de distribution), de petites entreprises produisant de l'électricité ont pu accéder au réseau de distribution et améliorer leur compétitivité. On pourrait aussi favoriser l'adoption de nouvelles techniques par une normalisation de l'équipement qui faciliterait le couplage au réseau. S'il s'agit de techniques utilisant les sources d'énergie renouvelables, l'application de telles mesures entraînerait de surcroît une réduction des émissions de GES.

5.3.5.2 Organisation des filières énergétiques

Jusqu'à présent, les industries du secteur de l'énergie se sont concentrées sur la production et la vente de kWh, de litres d'essence ou de tonnes de charbon. Elles s'appliquaient à répondre à la demande croissante d'énergie et à développer avec efficacité les investissements pour répondre à cette demande, et non pas à rechercher la méthode la plus efficace pour répondre à la demande de plus en plus vaste de services énergétiques.

Certaines commissions de réglementation réclament des industries du secteur de l'énergie qu'elles élargissent leur optique commerciale pour y inclure des services énergétiques et cessent de se contenter de vendre une certaine quantité d'énergie. Il est essentiel que les techniques d'utilisation finale et la recherche d'efficacité dans le domaine soient intégrées dans le processus d'affectation des investissements dans l'industrie de l'énergie. Le travail d'organisation de l'énergie ira au-delà des limites traditionnelles du secteur et adopterait une perspective globale des filières énergétiques.

Au sein des pays cités à l'Annexe I, les services publics du domaine de l'énergie subissent actuellement un vent de privatisation et de déréglementation. C'est peut-être là une occasion à saisir pour atténuer les émissions de GES, notamment par le biais d'une production privée et celui de la cogénération. Un tel bouleversement signifie aussi que les pouvoirs publics devront probablement modifier les leviers qu'ils utilisent pour atteindre les objectifs environnementaux. Il leur faudrait réexaminer par exemple la régulation de la demande et la planification intégrée des ressources.

5.3.5.3 Mesures environnementales locales et régionales

L'approvisionnement et l'utilisation finale de l'énergie ont un certain nombre d'incidences locales et régionales sur l'environnement. Parmi les incidences locales, on peut classer la pollution dans les locaux et dans les villes; les incidences régionales quant à elles comprennent l'acidification et les conflits éventuels sur l'utilisation des sols. Il est possible que les mesures et les actions gouvernementales de lutte contre ces incidences aient des effets sur les stratégies d'atténuation du changement climatique. Une plus grande efficacité dans la conversion et l'utilisation finale de l'énergie apporte par exemple une multitude d'avantages, puisque cela permet de réduire les incidences sur l'environnement à toutes les

échelles. Par contre d'autres stratégies peuvent impliquer des compromis complexes. Certaines mesures visant à améliorer l'environnement sur le plan régional peuvent entraîner une augmentation des émissions de GES. A titre d'exemple, les laveurs de gaz de combustion utilisés pour l'atténuation des émissions de soufre dans les centrales électriques au charbon causent une diminution du rendement de conversion global et donc une augmentation des émissions de carbone. Par ailleurs, certains GES peuvent avoir des effets néfastes sur la qualité de l'air, à l'échelle locale ou régionale, (il se peut que de petites unités de cogénération, par exemple, ne disposent pas de l'équipement permettant une désulfuration et une dénitrification complètes). Le degré de certitude des effets néfastes à l'échelle régionale étant supérieur à celui des incidences du

changement climatique planétaire, il est probable que des actions seront lancées pour lutter contre ce type de pollution dans de nombreuses parties du monde à court ou moyen terme.

Il doit donc y avoir une prise en compte globale des mesures à prendre et des actions gouvernementales à mener pour réduire l'ensemble des incidences sur l'environnement à tous les échelons : national, régional et local. Il conviendrait en particulier d'évaluer les risques de conflit entre, d'une part, les mesures et les actions gouvernementales visant à atténuer les incidences locales et régionales sur l'environnement et, d'autre part, les objectifs et stratégies de réduction des émissions de GES.

6. SECTEUR DE L'AGRICULTURE¹⁷

6.1 Introduction

L'agriculture est à l'origine d'un cinquième environ de l'effet de serre anthropique prévu et produit respectivement 50 % et 70 % environ de l'ensemble des émissions de CH₄ et de N₂O d'origine humaine. De plus, les activités agricoles (reconversion forestière non comprise) sont responsables d'approximativement 5 % des émissions anthropiques de CO₂ (SAR II, 23.1, figure 23.1). A l'échelle du globe, la superficie totale des terres cultivées est évaluée à environ 1 700 Mha (SAR II, 23.2.2, tableau 23-3).

Le secteur agricole se caractérise par d'importantes différences régionales, aussi bien pour ce qui est des pratiques de gestion qu'en ce qui concerne le rythme auquel il est envisageable de mettre en œuvre des mesures d'atténuation. Il est nécessaire d'apprécier l'efficacité des diverses mesures d'atténuation au regard du niveau de base et de l'évolution des émissions dans différentes régions. Dans les pays ne figurant pas à l'Annexe I, où l'on observe un accroissement rapide de l'utilisation d'engrais et de la production végétale, la mise en application – même intégrale – des mesures d'atténuation ne parviendra pas à contrebalancer l'augmentation prévue des émissions de N₂O et de CH₄. Il importe d'effectuer des analyses détaillées des modes d'utilisation des sols, des systèmes de culture et des pratiques de gestion à l'échelle régionale et mondiale, de manière à pouvoir évaluer l'évolution des émissions et les besoins en matière d'atténuation.

6.2 Techniques de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de l'agriculture

Le tableau 12 présente diverses techniques d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre propres à l'agriculture ainsi que les perspectives de réduction des émissions de CO₂, de CH₄ et de N₂O. Il précise en outre l'ampleur de la réduction des émissions de CH₄ et de N₂O en équivalent carbone dans son rapport avec le potentiel de réchauffement de la planète (SAR I, tableau 2.9). Sur la réduction totale possible du forçage radiatif (exprimé sous la forme d'équivalent carbone), 32 % environ pourraient résulter de la réduction des émissions de CO₂, 42 %, de la compensation des émissions de carbone par la production de biocombustibles sur les terres agricoles existantes, 16 %, de la réduction des émissions de CH₄ et 10 %, de la réduction des émissions de N₂O.

Les pays figurant à l'Annexe I pourraient contribuer pour une large part à la réduction totale des émissions à l'échelle du globe. Ainsi, en ce qui concerne la réduction totale possible des émissions de CO₂, ces pays pourraient contribuer pour 40 % à la réduction des émissions et pour 32 % à la compensation des émissions de carbone par la production de biocombustibles sur les terres agricoles disponibles. Pour ce qui est de la réduction totale possible des émissions de CH₄, ils pourraient contribuer pour 5 % à la réduction imputable à l'amélioration des techniques de riziculture et pour 21 % à la réduction attribuable

à l'amélioration de la gestion des ruminants. Ces pays pourraient enfin contribuer pour 30 % environ à la réduction des émissions de N₂O due à une utilisation limitée et plus efficace des engrais azotés et pour 21 % aux réductions découlant d'un meilleur usage des fumiers.

Les estimations des réductions possibles couvrent un large intervalle, ce qui traduit une certaine incertitude quant à l'efficacité des techniques recommandées et à leur degré d'application ultérieure à l'échelle du globe. Pour répondre aux besoins mondiaux en matière d'alimentation et recueillir l'approbation des agriculteurs, les techniques et les pratiques doivent satisfaire aux principes directeurs suivants : 1) mise en œuvre ou intensification d'une production agricole durable; 2) accroissement des avantages qu'en retirent les agriculteurs; et 3) acceptation des produits agricoles par les consommateurs. Les agriculteurs n'ont aucune raison d'adopter des techniques d'atténuation des rejets de gaz à effet de serre si celles-ci n'améliorent pas la rentabilité de leurs exploitations. Certaines techniques telles que l'agriculture sans préparation du sol ou le choix stratégique du lieu et du moment les plus propices à l'épandage d'engrais sont déjà en voie d'adoption pour d'autres raisons que les préoccupations concernant le changement climatique. Les options possibles en matière de réduction des émissions, et notamment l'amélioration de la gestion des exploitations et un meilleur usage des engrais azotés, permettront de préserver ou d'accroître la production agricole tout en ayant des effets positifs sur l'environnement.

Du fait de ces multiples avantages, le rapport coût-avantages des techniques disponibles sera particulièrement élevé. On préfère les pratiques qui permettent d'amortir les coûts d'investissement et de dégager des bénéfices à court terme à celles où les coûts d'investissement ne peuvent être amortis qu'à long terme; de la même manière, on adopte plus volontiers des pratiques qui permettent presque à coup sûr de dégager les bénéfices escomptés que des pratiques beaucoup plus aléatoires à cet égard. Lorsque les ressources humaines ou les notions touchant la pratique envisagée sont trop insuffisantes, des programmes de sensibilisation du public peuvent améliorer les connaissances et les compétences de la main-d'œuvre et des dirigeants et faciliter

¹⁷ Le présent chapitre est fondé sur le chapitre 23 de la contribution du Groupe de travail II au Deuxième Rapport d'évaluation du GIEC, intitulé *Agricultural Options for Mitigation of Greenhouse Gas Emissions* (principaux auteurs : V. Cole, C. Cerri, K. Minami, A. Mosier, N. Rosenberg, D. Sauerbeck, J. Dumanski, J. Duxbury, J. Freney, R. Gupta, O. Heinemeyer, T. Kolchugina, J. Lee, K. Paustian, D. Powlson, N. Sampson, H. Tiessen, M. van Noordwick et Q. Zhao).

¹⁸ L'évaluation de la part prise par les pays figurant à l'Annexe I dans la réduction des émissions est fondée sur les données fournies par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) dans son Annuaire de la production 1994, volume 48, Séries statistiques de la FAO, Rome, Italie.

Tableau 12 : Techniques agricoles destinées à atténuer les rejets de gaz à effet de serre et réductions possibles des émissions annuelles de dioxyde de carbone, de méthane et d'oxyde nitreux (le présent tableau est fondé sur les tableaux 23-4, 23-5, 23-6, 23-10 et 23-11 de la partie 11 du Deuxième Rapport d'évaluation du GIEC).

Emissions nettes de dioxyde de carbone		Mt C/an	
Réduction des émissions de CO ₂			
– Limitation de l'utilisation d'énergie fossile à des fins agricoles dans les pays industrialisés (grâce au développement des pratiques fondées sur la suppression partielle ou totale de la préparation du sol. L'irrigation régulière, le séchage des récoltes au soleil et l'amélioration des techniques de fertilisation ^a)		10–50	
Accroissement des puits de carbone			
– Augmentation de la teneur du sol en carbone grâce à une meilleure gestion des terres agricoles existantes ^b		400–600	
– Augmentation de la teneur du sol en carbone grâce à une mise hors culture permanente des terres agricoles en surplus dans les régions tempérées ^c		21–42	
– Rétablissement de la teneur du sol en carbone dans le cas des terres dégradées ^d		24–240	
Production de biomasse en compensation des émissions de carbone			
– Production de biocombustibles à partir de cultures spécialement destinées à cet usage sur les terres cultivées existantes ^e			
• Régions tempérées		85–490	
• Régions tropicales		160–510	
• Plantations-abris en régions tempérées		10–60	
• Agroforesterie tropicale		46–200	
– Production des biocombustibles à partir de résidus de récolte ^f		100–200	
AMPLEUR TOTALE POSSIBLE DE L'ATTÉNUATION DES ÉMISSIONS DE CO ₂		855–2 390	
Réduction des émissions de méthane		Mt CH ₄ /an	Mt C-Equiv ^g
Amélioration de la gestion des troupeaux de ruminants			
– Amélioration de la qualité du régime et de l'équilibre nutritif		10–35	57–202
– Accroissement de la digestibilité des aliments pour bétail		1–3	6–18
– Amélioration de la génétique animale et de la reproduction		1–6	6–36
Amélioration de la gestion des fumiers			
– Lagunage en milieu fermé		2–6,8	12–39
– Emploi de digesteurs		0,6–1,9	3–12
Amélioration des pratiques de riziculture			
– Organisation de l'irrigation ^e		3,3–9,9	19–52
– Gestion des éléments nutritifs		2,5–15	14–87
– Emploi de nouveaux cultivars et autres pratiques		2,5–10	14–58
AMPLEUR TOTALE POSSIBLE DE LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE MÉTHANE		23–88	131–504
Réduction des émissions d'oxyde nitreux		Mt N ₂ O-N/an	Mt C-Equiv ^h
Meilleur usage des engrais azotés			
– Limitation de l'usage d'engrais azotés (grâce aux mesures consistant à appliquer des techniques perfectionnées en matière d'épandage d'engrais azotés, à adapter l'offre d'azote à la demande des cultures, à intégrer les systèmes de production afin de porter la réutilisation du fumier aux fins de production végétale à son maximum, à conserver l'azote provenant de résidus végétaux sur les lieux de production et à optimiser la préparation du sol, l'irrigation et le drainage)		0,3–0,9	85–245
– Limitation de la conversion en forêts		0,06–0,17	21–47
AMPLEUR TOTALE POSSIBLE DE LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS D'OXYDE NITREUX		0,4–1,1	106–292

^a Chiffres fondés sur l'utilisation actuelle de 3 à 4,5 % des émissions totales de carbone issu de combustibles fossiles (2,8 Gt C/an; OCDE, 1991) par les pays industrialisés et sur un intervalle de réduction arbitraire variant de 10 à 50 %.

^b En se fondant sur l'hypothèse d'un rétablissement de la teneur en carbone des sols actuellement cultivés (à l'exception des terres humides) représentant la moitié à deux tiers de la perte antérieure estimée (44 Gt), et cela sur une période de 50 ans.

^c Chiffres fondés sur la fixation estimée de 1,5 à 3 GTC sur une période de 100 ans par le biais de la mise hors culture de 15 % des sols cultivés (environ 640 millions d'hectares) dans les pays industrialisés présentant des excédents de production effectifs ou potentiels et sur la remise en état de 10 à 20 % des anciennes terres humides (8 millions d'hectares) actuellement en culture dans les régions tempérées.

^d En se fondant sur l'hypothèse de la fixation de 1 à 2 kg de carbone par m² sur une période de 50 ans pour ce qui est d'une fraction arbitraire de 10 à 50 % des terres modérément à fortement dégradées (1,2 x 10⁹ ha à l'échelle du globe).

^e En supposant que 10 à 15 % environ des terres cultivées de la planète peuvent servir à la production de biocombustibles.

^f En se fondant sur la récupération de 25 % des résidus de la récolte et sur les hypothèses concernant la transformation et la substitution des sources d'énergie.

^g Equivalent carbone des émissions de CH₄, fondé sur un PRB portant sur 100 ans (SAR I, Tableau 2.9).

^h Equivalent carbone des émissions de N₂O, fondé sur un PRB portant sur 100 ans (SAR I, Tableau 2.9).

ainsi l'adoption de cette pratique. Pour élaborer et diffuser largement ce savoir, il faudra avoir recours, à l'échelle nationale et internationale, à de vastes programmes de recherche, d'enseignement et de transfert de technologie. L'assurance des récoltes ou d'autres programmes permettant de partager les risques imputables aux catastrophes naturelles devraient également faciliter l'adoption des pratiques améliorées.

6.2.1 Réduction des émissions de dioxyde de carbone (SAR II, 23.2)

Au nombre des mesures destinées à restreindre les émissions de CO₂ d'origine agricole figurent la réduction des émissions provenant des sources actuelles ainsi que la création et le renforcement des puits de carbone. Parmi les mesures visant à accroître le rôle des terres agricoles comme puits de CO₂, on peut mentionner le stockage du carbone dans des sols aménagés ou la fixation du carbone après retour des terres agricoles en surplus à l'état d'écosystèmes naturels. Toutefois, les sols où se fixe le carbone ont une capacité finie sur une période de 50 à 100 ans, puisqu'un nouvel équilibre s'établit eu égard aux concentrations de matière organique. Les efforts déployés en vue d'accroître la teneur en carbone du sol ont en outre l'avantage d'améliorer la productivité et la durabilité des systèmes de production agricole. Les sols cultivés mis hors production de façon permanente et de nouveau envahis par la végétation naturelle peuvent finalement présenter une teneur en carbone comparable à celle qui les caractérisait avant toute culture. Compte tenu des 640 millions d'hectares de terres cultivées produisant des surplus réels ou potentiels (aux Etats-Unis d'Amérique, au Canada, dans l'ex-Union soviétique, en Europe, en Australie et en Argentine), et dans l'hypothèse d'un rétablissement dans le sol du carbone initialement utilisé à des fins agricoles, une mise hors culture permanente de 15 % des terres agricoles permettrait de fixer 1,5 à 3 GtC (sur une période de 50 à 100 ans).

Le retour des terres agricoles à leur état naturel ou leur reboisement ne peuvent avoir lieu sur une grande échelle qu'à la condition que les superficies qui restent permettent d'assurer un approvisionnement adéquat en bois, en fibres et en énergie. C'est actuellement possible dans l'Union européenne et aux Etats-Unis d'Amérique, grâce aux systèmes d'exploitation intensive. Toutefois, des modifications de l'intensité des cultures dues à des préoccupations écologiques ou à une réorientation des politiques peuvent obliger à renoncer à cette option.

Actuellement, la moitié seulement des forêts tropicales converties à des usages agricoles contribuent à un accroissement des terres cultivées productives. L'unique moyen d'échapper à ce cycle réside en une utilisation plus durable, en une amélioration de la productivité des terres agricoles existantes et en une meilleure protection des écosystèmes naturels. Ces mesures peuvent contribuer à limiter l'extension des terres agricoles (et par conséquent la déforestation) dans les zones humides, en particulier en Amérique latine et en Afrique.

Au nombre des pratiques de gestion visant à accroître les stocks de carbone dans le sol figurent la réduction de la préparation du

sol, l'augmentation de la production et la restitution des résidus de récolte, les cultures vivaces (et notamment l'agroforesterie) et le ralentissement du rythme des mises en jachère à nu. Toutefois, dans la plupart des régions tropicales, il existe des obstacles économiques, éducatifs et sociologiques à l'amélioration de la gestion des sols. Bon nombre d'agriculteurs de ces régions n'ont pas les moyens ou la possibilité de se procurer des intrants tels que des engrais ou des herbicides. Les résidus de récolte sont souvent utilisés comme aliments du bétail, comme combustibles ou pour d'autres usages ménagers, ce qui réduit d'autant les apports de carbone dans le sol. Enfin, les avantages liés à la réduction des émissions de CO₂ seront d'autant moins importants que l'amélioration de la gestion est fondée sur un accroissement notable de la consommation de combustibles fossiles.

La consommation d'énergie à des fins agricoles par unité de production a régressé depuis les années soixante-dix. Dans les pays industrialisés figurant à l'Annexe I, il est possible de réduire la consommation de combustibles fossiles à des fins agricoles – qui représente 3 à 4 % de la consommation globale – en procédant à une préparation minimale du sol, en définissant des programmes d'irrigation, en faisant sécher les récoltes au soleil et en améliorant la gestion des engrais.

Aussi bien les cultures vivrières et les cultures de plantes textiles classiques que les cultures spécialement destinées à la production de biocombustibles (par exemple les cultures de plantes ligneuses à rotation brève et les cultures énergétiques de plantes herbacées vivaces) permettent de produire une biomasse qui constitue un produit de départ fort utile à des fins d'approvisionnement en énergie. Les cultures spécialement destinées à la production de biocombustibles s'accommodent des mêmes sols et des mêmes modes de gestion que les cultures classiques et viendront donc disputer à la production vivrière des ressources limitées (SAR II, 23.2.4). La mesure dans laquelle leur production prendra de l'ampleur est subordonnée à l'élaboration de nouvelles techniques, à leur compétitivité économique en regard des cultures vivrières et des cultures de plantes textiles classiques ainsi qu'aux pressions sociales et politiques. Des plantes spécialement destinées à la production d'énergie, et notamment des plantes ligneuses à courte rotation, des plantes énergétiques herbacées pérennes et des plantes annuelles telles que les céréales plante entière ou le kénaf, pourraient être durablement cultivées sur 8 à 11 % des terres agricoles de rendement bon à faible dans les régions tempérées. Ainsi, aux Etats-Unis d'Amérique, on a estimé que 15 à 20 millions d'hectares de bonnes terres agricoles seront en excédent pour ce qui est de la production vivrière d'ici à 2010, ce qui représente 20 à 30 % de la superficie cultivée actuelle.

Dans les régions tropicales, vu la progression de la demande agricole, un plus faible pourcentage des terres (5 à 7 % constituent une estimation raisonnable) devraient pouvoir servir à la culture de plantes énergétiques. Il apparaît toutefois qu'au total, une superficie considérable, notamment parmi les terres de faible rendement ou nécessitant une régénération, pourrait servir à la production de biocombustibles. Un programme à grande échelle de production agricole de biocombustibles peut avoir une incidence

considérable en matière de réduction des émissions de CO₂. Dans l'hypothèse où 10 à 15 % de la superficie mondiale de terres cultivées peut servir à la production de biocombustibles, on a estimé que le remplacement des combustibles fossiles s'inscrirait dans un intervalle variant de 300 à 1 300 millions de tonnes de carbone. Ce chiffre ne tient pas compte des effets indirects de cette production, et notamment de l'accroissement du stockage du carbone dans la biomasse ligneuse existante ou de la fixation du carbone dans le sol. La récupération et la transformation de 25 % de l'ensemble des résidus de récolte (les 75 % restants retournant au sol) pourraient permettre de remplacer 100 à 200 millions de tonnes supplémentaires de carbone issu de combustibles fossiles par an. Il faut toutefois prendre en compte les phénomènes de compensation possibles, et en particulier la progression des émissions de N₂O. En général, les cultures utilisées uniquement pour l'huile, l'amidon ou le sucre qu'elles contiennent présentent un intérêt limité en matière de réduction des émissions de CO₂ par suite des faibles quantités d'énergie nette produites et des apports relativement importants de combustibles fossiles qui s'avèrent en l'occurrence nécessaires. La combustion de la totalité de la biomasse végétale en remplacement des combustibles fossiles constitue la meilleure solution en matière d'atténuation des émissions de CO₂.

6.2.2 Atténuation des émissions de méthane (SAR II, 23.3.1.1)

Les ruminants domestiques et la riziculture sont les principales sources agricoles de CH₄. La riziculture continuera de se développer au même rythme qu'actuellement afin de satisfaire les besoins alimentaires. Les rizières inondées produisent des émissions de CH₄ qui peuvent être réduites par des mesures de gestion appropriées. L'amplitude de l'écart entre les réductions possibles évoquées est l'indice d'une certaine incertitude concernant l'efficacité des mesures d'atténuation et le degré d'additivité des effets, notamment dans le cas de la riziculture. Pour que la mise en œuvre des techniques d'atténuation disponibles soit un succès, il convient de démontrer i) que le rendement céréalier ne diminuera pas et pourra même augmenter, ii) que l'on fera des économies de main-d'œuvre, d'eau et d'autres facteurs de production et iii) que les consommateurs locaux s'accommoderont des cultivars de riz qui rejettent moins de CH₄.

Il est possible de réduire les émissions de CH₄ imputables aux ruminants domestiques en recourant à des systèmes pastoraux améliorés, fondés sur la consommation de fourrages de grande qualité; en effet, les animaux qui paissent sur des parcours de médiocre qualité produisent davantage de CH₄ par unité d'aliment consommé. L'alimentation des animaux en bâtiment clos à l'aide de rations équilibrées facilitant la digestion d'aliments hautement énergétiques peut aussi contribuer à réduire les émissions directes, mais peut par contre augmenter les émissions indirectes liées à la production et au transport de ces aliments. Le méthane dégagé par les systèmes d'élimination des déchets d'élevage peut en outre constituer une source d'énergie directement exploitable sur place, ce qui permet d'éviter le rejet dans l'atmosphère du gaz ainsi utilisé. A l'échelle du

globe, il semble qu'il soit possible de réduire d'environ 35 % (15-56 %) les émissions de CH₄ d'origine agricole.

6.2.3 Atténuation des émissions d'oxyde nitreux (SAR II, 23.3.1.2)

L'azote est un élément nutritif essentiel des espèces végétales. Il entre aussi dans la formule de certains des composés les plus mobiles du système sol-plantes-atmosphère. L'azote étant le principal constituant des engrais minéraux, les rejets de composés azotés dans l'environnement associés aux activités agricoles nécessitant d'importants moyens de production suscitent des préoccupations grandissantes. La réalisation du bilan de l'azote ou l'approche fondée sur une analyse d'intrants-extrants ont facilité l'élaboration de politiques destinées à améliorer la gestion de l'azote dans les systèmes de production végétale et animale et à atténuer l'incidence de cet élément sur l'environnement. Grâce à certains systèmes de gestion, on peut réduire la quantité d'azote rejeté dans le milieu, soit sous la forme d'émissions de gaz ammoniac ou de N₂O, soit par lessivage des nitrates dans le sous-sol. Pour parvenir à améliorer l'efficacité, on utilise, dans certains cas, moins d'engrais et, dans d'autres, on augmente les rendements sans modifier la concentration d'azote.

S'agissant de l'agriculture, les principales sources de NO₂ sont les engrais minéraux, les cultures de légumineuses et les déchets d'élevage. Ces pertes sont souvent accentuées par le mauvais état physique des sols. Une partie du N₂O rejeté provient de la combustion de la biomasse. L'emploi de techniques agricoles perfectionnées (utilisation d'engrais à libération contrôlée et d'inhibiteurs de nitrification, étalement des épandages d'engrais azotés, gestion des ressources en eau, etc.) devrait permettre de faire un usage plus efficace de l'azote et, en conséquence, de limiter la formation de N₂O. La réduction des émissions d'oxyde nitreux repose sur le principe selon lequel une meilleure utilisation de l'azote contenu dans les engrais (y compris le fumier) contribue à limiter la production de N₂O et, par conséquent, à restreindre les quantités d'azote qui s'échappent du système. Une harmonisation de l'offre d'azote et de la demande des cultures ainsi qu'une intégration plus étroite de la gestion des déchets d'élevage et des résidus de récolte à la production végétale pourraient permettre de réduire les émissions de N₂O d'environ 0,36 million de tonnes de N₂O-N, soit quelque 17 % (9-26 %), par rapport au taux actuel d'émission propre à l'agriculture.

6.3 Mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agricole

Au nombre des initiatives susceptibles d'atténuer de façon marquée les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de l'agriculture figurent les mesures suivantes (un certain nombre de solutions techniques envisageables sont en outre indiquées au tableau 13) :

- programmes axés sur le marché (réduction et réforme des politiques d'appui à l'agriculture, taxes sur l'utilisation d'engrais azotés, octroi de subventions pour la production et l'utilisation d'énergie issue de la biomasse, etc.);

Tableau 13: Exemples choisis de solutions techniques visant à atténuer les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agricole

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
Réduction de la consommation d'énergie fossile – Moins de préparation du sol – Réduction des quantités d'engrais utilisées – Etablissement d'un programme d'irrigation – Séchage des récoltes au soleil	Programmes axés sur le marché – Taxes sur les combustibles à usage agricole Accords volontaires – Transfert de technologie	Incidences favorables sur le climat – Émissions de CO ₂ réduites de 10 à 50 MtC par an	Aspects macroéconomiques – Réduction des coûts associés aux combustibles et aux engrais	Facteurs administratifs et institutionnels – Nécessité d'une coopération des organismes gouvernementaux et d'une intégration des programmes agricoles Facteurs politiques – Détermination des taxes
Augmentation de la fixation du carbone dans les terres agricoles – Réduction de la préparation du sol – Meilleure gestion des résidus – Rétablissement de la productivité des sols dégradés – Accentuation de la mise hors culture permanente dans les régions tempérées	Accords volontaires – Modification des programmes en matière de produits, de façon à obtenir davantage de souplesse et à encourager de meilleures pratiques de gestion – Transfert de technologie	Incidences favorables sur le climat – Fixation de 440 à 880 MtC supplémentaires par an Autres effets – Atténuation de l'érosion des sols – Augmentation de la production vivrière influant sur le choix des solutions	Rapport coût-efficacité – Augmentation des coûts associés aux herbicides, compensée par la réduction des besoins de main-d'œuvre Aspects macroéconomiques – Réduction des coûts de combustible	Facteurs administratifs et institutionnels – Nécessité d'une coopération des organismes gouvernementaux et d'une intégration des programmes agricoles – Restriction possible des crédits disponibles
Intensification de la production de biocombustibles aux fins de compensation des émissions de carbone – Cultures de plantes ligneuses à courte rotation et de plantes herbacées spécialement destinées à la production de biocombustibles sur les terres actuellement cultivées – Production de biocombustibles à partir des résidus de récolte	Programmes axés sur le marché – Fixation des prix de l'énergie – Suppression des barrières commerciales	Incidences favorables sur le climat – Compensation des émissions de carbone fossile à raison de 400 à 1460 MtC par an – Accroissement du stockage du carbone dans le sol	Aspects macroéconomiques – Augmentation des coûts d'électricité – Concurrence de l'exploitation de terres cultivées d'une superficie limitée, ayant pour effet d'augmenter les terres et, éventuellement, le prix des aliments	Facteurs politiques – Opposition habituelle des milieux agricoles traditionnels – L'effet négatif possible sur la production vivrière est un sujet politiquement sensible
Amélioration de la gestion des troupeaux de ruminants – Augmentation de la digestibilité des aliments – Amélioration des caractéristiques génétiques et de la fécondité des animaux	Dispositions réglementaires – Réglementation de la densité du bétail	Incidences favorables sur le climat – Émissions de CH ₄ réduites de 12 à 44 Mt par an Autres effets – Diminution de la pollution par les nutriments	Aspects macroéconomiques – Nécessité d'une formation des exploitants et d'un transfert de technologie	Facteurs politiques – Préoccupations particulières dans les zones à forte densité animale (les pays figurant à l'Annexe I, par exemple)
Adoption de pratique de gestion des fumiers pour récupération du CH₄ – Lagunage en milieu clos et emploi de digesteurs de biogaz	Accords volontaires – Transfert de technologie	Incidences favorables sur le climat – Émissions de CH ₄ réduites de 3 à 9 MT par an	Rapport coût-efficacité – Coûts compensés par la production locale d'énergie	Facteur administratif et institutionnel – Nécessité de transfert international de technologie

Tableau 13 (suite)

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
Amélioration des pratiques rizicoles –Gestion des ressources en eau –Gestion des éléments nutritifs –Utilisation de nouveaux cultivars émettant peu de CH ₄	Accords volontaires –Transfert de technologie	Incidences favorables sur le climat –Emissions de CH ₄ réduites de 8 à 35 MT par an	Équité –Difficultés saisonnières de répartition des ressources en eau	Facteurs administratifs et institutionnels –Nécessité d'une coordination régionale des programmes d'irrigation
Utilisation plus efficace des engrais azotés –Amélioration des méthodes d'épandage des engrais azotés –Harmonisation de l'offre d'azote et des besoins des cultures –Optimisation de l'utilisation des fumiers –Optimisation de la préparation du sol, de l'irrigation et du drainage	Programmes axés sur le marché –Taxes sur l'utilisation d'engrais azotés Dispositions réglementaires –Limitations de l'utilisation d'engrais azotés	Incidences favorables sur le climat –Emissions de N ₂ O réduites de 0,4 à 1,1 MT de N ₂ O – N par an Autres effets –Amélioration de la qualité de l'eau	Rapport coût-efficacité –Coûts compensés par une diminution des besoins d'azote	Facteurs politiques –L'effet négatif possible sur la production vivrière est un sujet politiquement sensible

- dispositions réglementaires (limitation de l'utilisation des engrais azotés, adaptation réciproque du soutien apporté à l'agriculture et des objectifs environnementaux, etc.);
- accords volontaires (pratiques d'aménagement des sols visant à améliorer la fixation du carbone dans les terres agricoles, etc.);
- programmes internationaux (appui accordé au transfert de technologie dans le domaine de l'agriculture, etc.).

En général, la plupart de ces mesures visent des objectifs qui n'ont pas uniquement trait aux questions touchant l'évolution du climat, mais qui concernent aussi la lutte contre la pollution de l'environnement et l'atténuation de la dégradation des ressources naturelles. Les pouvoirs publics pourraient promouvoir un usage plus efficace des engrais en modifiant les programmes relatifs aux produits de façon à leur donner davantage de souplesse et à inciter les exploitants agricoles à produire des cul-

tures et à adopter des pratiques qui soient moins tributaires des engrais commerciaux. Les initiatives visant à appuyer et à encourager les techniques de gestion les mieux à même de freiner la dégradation des sols et de lutter contre la pollution de l'environnement sont tout à fait compatibles avec les mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Les mesures visant à encourager de meilleurs modes d'utilisation des terres peuvent avoir un effet favorable sur le stockage du carbone. C'est ainsi le cas des mesures de mise hors culture permanente des terres de faible rendement ou dégradées. On peut aussi avoir recours à des mesures incitant les exploitants à gérer les terres actuellement en culture d'une manière durable et écologiquement rationnelle. Des programmes gouvernementaux peuvent faciliter la mise en place de pratiques qui préservent ou accroissent les rendements des cultures tout en réduisant les émissions par unité de rendement cultural.

7. SECTEUR DES FORÊTS¹⁹

7.1 Introduction

Les forêts constituent à la fois un puits et une source de CO₂ atmosphérique. Elles absorbent le carbone par le biais de la photosynthèse et rejettent du carbone par la voie de la décomposition et lorsque les arbres brûlent à l'initiative des hommes ou pour des raisons naturelles. Gérer les forêts afin de retenir et d'accroître le carbone qu'elles contiennent et de stabiliser les concentrations de cet élément dans l'atmosphère contribuera à réduire le taux d'émission du CO₂ dans l'atmosphère. Même si certaines terres dégradées sont impropres à l'exploitation forestière, il existe d'excellentes perspectives d'atténuation par le biais de l'amélioration des méthodes de gestion des terres forestières aux fins de conservation, de stockage et de remplacement du carbone, sans perdre de vue d'autres objectifs. Le présent chapitre décrit diverses pratiques et mesures forestières applicables à l'échelle nationale ainsi que différents projets et programmes internationaux susceptibles d'être mis en œuvre avec succès pour atteindre cet objectif.²⁰

Actuellement, à l'échelle du globe, les forêts couvrent environ 3,4 milliards d'hectares, dont 52 % se trouvent sous les basses latitudes (approximativement de 0 à 25° de latitude Nord et Sud), 30 %, sous les hautes latitudes (approximativement de 50 à 75° de latitude Nord et Sud) et 18 %, sous les latitudes moyennes (approximativement de 25 à 50° de latitude Nord et Sud) (SAR II, 24.2.1). Les forêts du monde entier stockent de grandes quantités de carbone : environ 330 GtC dans la végétation vivante et morte au-dessus et au-dessous du sol et 660 GtC dans le sol (sol minéral et horizon organique) (SAR II, 24.2.2). Une quantité inconnue de carbone est également stockée dans des produits tels que les produits du bois, les bâtiments, le mobilier et le papier.

D'après les estimations, les forêts des hautes et moyennes latitudes constituent actuellement un puits net d'environ 0,7 ± 0,2 GtC par an. Quant aux forêts des basses latitudes, on considère qu'elles constituent une source nette de 1,6 ± 0,4 GtC par an, principalement en raison de leur défrichement et de leur dégradation (SAR II, 24.2.2). On peut comparer ces chiffres avec les émissions de carbone résultant de la combustion des combustibles fossiles, qui sont estimées à 5,5 ± 0,2 GtC par an.

7.2 Techniques de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des forêts

Les pratiques d'aménagement forestier susceptibles de restreindre l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère peuvent être groupées en trois catégories : 1) aménagement en vue de la conservation du carbone; 2) aménagement en vue de la fixation et du stockage du carbone; 3) aménagement en vue de la substitution du carbone. Au nombre des pratiques de conservation figurent des options telles que la maîtrise de la déforestation, la protection des forêts situées dans des réserves, la modification des régimes d'exploitation et la maîtrise d'autres perturbations anthropiques (incendies, invasion de

parasites, etc.). Au nombre des pratiques de fixation et de stockage figurent le renforcement des écosystèmes forestiers par accroissement de la superficie et/ou de la biomasse et de la teneur du sol en carbone dans les forêts naturelles et les plantations ainsi que l'augmentation du stockage dans des produits du bois durables. Quant aux pratiques de substitution, elles visent à accroître le transfert du carbone de la biomasse forestière dans divers produits et à freiner de ce fait la consommation d'énergie et de produits à base de combustibles fossiles, de produits à base de ciment et autres matériaux de construction non ligneux.

La superficie éventuellement disponible pour la mise en œuvre de mesures d'aménagement forestier à des fins de conservation et de fixation du carbone est fonction de la mesure dans laquelle les sols se prêtent techniquement à la sylviculture et de leur disponibilité effective, compte tenu des circonstances socio-économiques. D'après la documentation consultée en vue de la rédaction du Deuxième Rapport d'évaluation (SAR II, 24.4.2.2), il semble qu'à l'échelle du globe, 700 millions d'hectares de terres peuvent être utilisés à des fins de conservation et de fixation du carbone (345 Mha pour les plantations et la foresterie, 138 Mha pour le ralentissement de la déforestation tropicale et 217 Mha pour la régénération naturelle et assistée). Le tableau 14 fournit une estimation des perspectives mondiales de conservation et de fixation du carbone, fondée sur les études mentionnées ci-dessus. Ce sont les régions tropicales qui offrent les meilleures possibilités en la matière (80 % du potentiel total), suivies par les régions tempérées (17 %) et les régions boréales (3 %) (tableau 14). La régénération naturelle et assistée et le ralentissement de la déforestation représentent plus de la moitié du potentiel relatif aux régions tropicales. La création de forêts et l'agroforesterie contribuent à la préservation du puits tropical et, sans ces efforts, la régénération et le ralentissement de la déforestation seraient sans doute voués à l'échec.

Les scénarios indiquent que le rythme annuel de la conservation et de la fixation du carbone résultant de l'ensemble des pratiques mentionnées progresse avec le temps (SAR II, 24.4.2.2). Si les économies de carbone découlant du ralentissement de la déforestation et de la régénération l'emportent initialement, il semble qu'à partir de 2020 les plantations fixeront des quantités de carbone pratiquement identiques, puisqu'elles atteignent une valeur maximale en matière d'accrétion de cet élément (figure 3). A l'échelle du globe, les forêts, après avoir été une source de carbone, deviendront un puits à peu près à partir de

¹⁹ Le présent chapitre est fondé sur le chapitre 24 de la contribution du Groupe de travail II au Deuxième Rapport d'évaluation du GIEC, intitulé *Management of Forests for Mitigation of Greenhouse Gas Emissions* (principaux auteurs : S. Brown, J. Sathaye, M. Cannell et P. Kauppi).

²⁰ Les techniques, les politiques et les mesures d'atténuation visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant des prairies, des déserts et de la toundra en sont seulement à leurs débuts et n'ont pas encore été évaluées en détail. Elles n'ont donc pas été prises en considération dans le présent rapport.

Tableau 14 : Perspectives mondiales en matière de fixation et de conservation du carbone et coûts associés (1995–2050).

(1) Zone de latitude	(2) Mesure envisagée	(3) Carbone fixé ou conservé (GtC) ^a	(4) Coût (\$US/t C) ^b	(5) Coût total (10 ⁹ \$US) ^c
Hautes	Création de forêts	2,4	8 (3–27)	17
Moyennes	Création de forêts	11,8	6 (1–29)	60
	Agroforesterie	0,7	5	3
Basses	Création de forêts	16,4	7 (3–26)	97
	Agroforesterie	6,3	5 (2–12)	27
	Régénération	11,5–28,7	2 (1–2)	
	Ralentissement de la déforestation	10,8–20,8	2 (0,5–15)	44-97 ^d
TOTAL		60–87	3,7–4,6 (1–29)	250–300

Source : SAR II, Tableaux 24-5, 24-8 et 24-9.

^a Il s'agit du carbone se trouvant dans la végétation au-dessus et au-dessous du sol, dans le sol et dans la litière.

^b Coût de mise en place ou coût primaire (non actualisé). Moyenne des estimations mentionnées dans la documentation. La plupart des estimations ne tiennent pas compte des coûts d'acquisition des terrains et des frais entraînés par l'installation de l'infrastructure et de clôtures de protection et par les activités d'éducation et de formation. Les chiffres entre parenthèses indiquent l'intervalle des coûts estimés.

^c A la colonne 4 est indiqué le coût par tonne de C présent dans la végétation. Le coût total indiqué à la colonne 5 est par conséquent inférieur au chiffre obtenu en multipliant le nombre de tonnes de carbone mentionné à la colonne 3 par le coût en dollars par tonne de carbone porté à la colonne 4.

^d Chiffres concernant à la fois le ralentissement de la déforestation et l'intensification de la régénération.

2010, alors que la déforestation intervenant dans les régions tropicales sera compensée par la conservation et la fixation du carbone dans toutes les régions.

Compte tenu du coût moyen de mise en œuvre ou du coût primaire des diverses options en fonction de la latitude, le coût cumulé (non actualisé) de la conservation et de la fixation des quantités de carbone indiquées au tableau 14 varie approximativement de 250 à 300 milliards (109) de dollars des États-Unis; quant au coût unitaire moyen, il varie de 3,7 à 4,6 dollars par tonne de carbone (SAR II, 24.5.4). Ce coût unitaire moyen diminue lorsqu'aux fins de conservation du carbone, on a surtout recours au ralentissement de la déforestation et à l'aide à la régénération, car ce sont là les solutions les moins coûteuses. Dans l'hypothèse d'un taux d'actualisation annuel de 3 %, le coût actualisé ne dépasse pas 77 à 99 milliards de dollars, et le coût unitaire moyen tombe à 1,2–1,4 dollar par tonne de carbone. Les coûts d'acquisition des terres et les frais entraînés par la mise en place de l'infrastructure et de clôtures de protection ainsi que par les activités de sensibilisation et de formation ne sont pas inclus dans ces estimations.

Bien que les estimations ci-dessus soient vraisemblablement sujettes à une forte incertitude, les relations unissant les diverses options en fonction de la latitude semblent fondées. Les facteurs d'incertitude consistent dans l'estimation des superficies disponibles pour les projets de création de forêts et les programmes de régénération, le rythme auquel on peut effectivement ralentir la déforestation dans les régions tropicales et l'évaluation des quantités de carbone qui peuvent être conservées et

fixées dans les forêts tropicales. En résumé, ce sont les politiques visant à promouvoir les mesures d'atténuation dans la zone tropicale qui devraient s'avérer les plus efficaces, compte tenu de la capacité des forêts de ces régions en matière de conservation et de fixation du carbone. Les politiques de création de forêts dans la zone tempérée joueront également un rôle important.

7.3 Mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des forêts

Les pratiques d'aménagement forestier qui offrent les meilleures perspectives en matière de conservation et de fixation du carbone vont (par ordre décroissant d'importance) du ralentissement de la déforestation et de l'aide à la régénération sous les tropiques aux programmes de création de forêts et à l'agroforesterie dans les zones tropicales et tempérées (tableau 14). Les avantages que présentent les programmes de création de forêts seront en outre multipliés par le fait qu'il permettent de produire du bois susceptible de remplacer des formes d'énergie et des matériaux à base de combustibles fossiles. Les auteurs examinent ci-dessous les diverses mesures adaptées à la mise en œuvre de chacune de ces pratiques.

7.3.1 Ralentissement de la déforestation et aide à la régénération

Au nombre des causes de la déforestation figurent le défrichement des espaces forestiers à des fins d'agriculture, d'extraction des minéraux et d'aménagement de réservoirs hydroélectriques ainsi que la dégradation des forêts pour la production

de bois de feu. Les sols défrichés à des fins agricoles perdent à la longue leur fertilité et ne se prêtent ensuite qu'à l'aménagement de parcours. Les contraintes socio-économiques et politiques, souvent liées aux besoins des populations de plus en plus nombreuses qui subsistent tout juste dans des zones non intégrées, sont les principaux facteurs responsables de la déforestation dans la plupart des régions tropicales (SAR II, 24.3.1.1). Par ailleurs, au Brésil, les investisseurs les plus prospères sont aussi les principaux agents de la déforestation, car ils défrichent les espaces boisés pour en faire des ranchs dont le caractère financièrement attrayant est souvent en partie fondé sur la spéculation foncière.

Au tableau 15 sont indiquées les mesures dont la mise en application devrait ralentir la déforestation et faciliter la régénération de la biomasse. Chacune de ces mesures contribuera à protéger

la biomasse, qui aura probablement une forte densité en carbone, et à préserver – voire à améliorer – les avantages actuels liés à la diversité biologique, aux sols et aux bassins versants. Ces mesures nécessitent de faibles dépenses d'investissement, sauf dans le cas du bois recyclé où les dépenses en question sont alors fonction du produit faisant l'objet d'un recyclage. Les deux premières mesures, parce qu'elles contribuent à réduire la déforestation, devraient avoir un effet négatif sur l'emploi dans le secteur de l'agriculture. Toutefois, pour peu que les subventions soient judicieusement investies, elles devraient permettre de créer des emplois dans d'autres secteurs de l'économie et, par conséquent, de compenser cette perte. Un aménagement forestier durable peut contribuer à développer à long terme l'activité économique et l'emploi. La mise en œuvre d'une législation visant à protéger les forêts exige de puissants appuis politiques et peut constituer une lourde tâche au plan administratif.

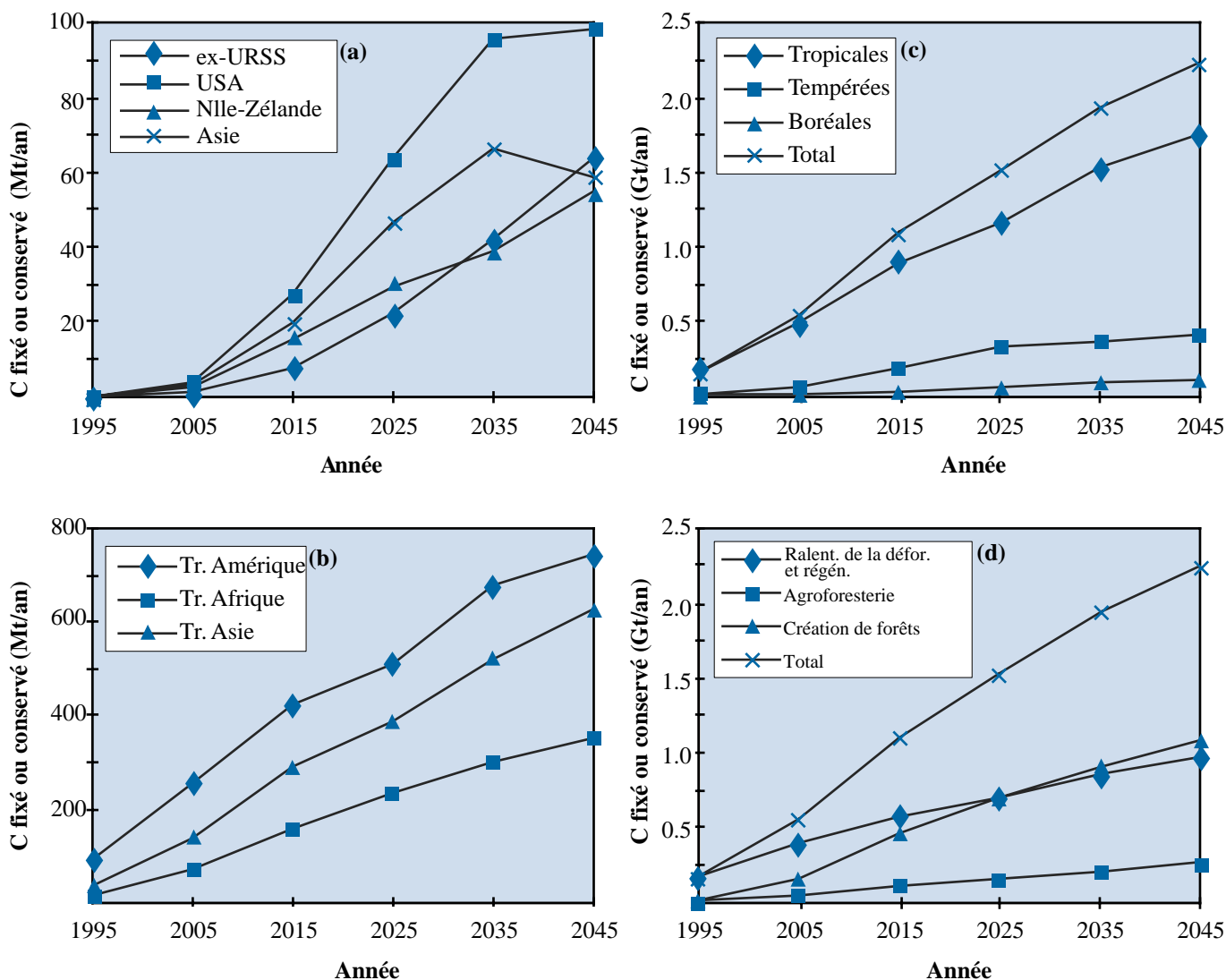


Figure 3. Taux annuels moyens de conservation et de fixation du carbone par décennie après mise en œuvre des options d'aménagement forestier indiquées au tableau 14 : a) pour quatre pays ou régions des latitudes hautes et moyennes, en choisissant les taux de fixation totaux les plus élevés; b) pour les trois régions tropicales (tr.); c) pour les différentes zones de latitude; d) pour les diverses pratiques d'aménagement forestier. On notera que "défor." signifie déforestation et "régén.", régénération naturelle et assistée (SAR II, 24.4.2.2, figures 24-1 et 24-2).

Tableau 15 : Exemples choisis de mesures destinées à atténuer les émissions de gaz à effet de serre par le biais du ralentissement de la déforestation et de l'aide à la régénération

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
Pratiques ou objectifs forestiers <ul style="list-style-type: none"> – Limitation de l'agriculture sur brûlis et du ranching – Intensification de la surveillance sur le terrain et par satellite – Limitation des incendies de forêts – Amélioration des mesures concernant les limites – Amélioration des techniques d'exploitation forestière 	Programmes axés sur le marché <ul style="list-style-type: none"> – Exécution conjointe de projets bénéficiant d'un financement bilatéral et multilatéral (et notamment de projets de gestion des opérations de création de forêts et de substitution) – Promotion d'un aménagement durable des forêts Dispositions réglementaires <ul style="list-style-type: none"> – Promulgation d'une législation sur la protection des forêts (et notamment de mesures d'interdiction de l'exploitation forestière) – Suppression des subventions pour des activités incitant à la déforestation (élevage de bovin en ranchs, industries extractives, agriculture, etc.) 	Incidences favorables sur le climat <ul style="list-style-type: none"> – Maintien de la densité de carbone à un niveau pouvant atteindre 300 tonnes de C par hectare Autres effets <ul style="list-style-type: none"> – Préservation des avantages liés à la diversité biologique, à la conservation des sols et aux bassins versants 	Rapport coût-efficacité <ul style="list-style-type: none"> – Les avantages monétaires découlant des ventes de produits peuvent compenser les coûts Aspects macroéconomiques <ul style="list-style-type: none"> – Faibles dépenses d'investissement, coût d'opportunité élevé – Réduction des dépenses publiques – Progression des investissements de capitaux étrangers – Progression du transfert de technologie – Augmentation des coûts d'exploitation au-delà des frais de gestion forestière habituels Équité <ul style="list-style-type: none"> – Préoccupations suscitées par la remise en cause des droits de propriété sur les terres – Pertes d'emplois sectoriels, compensées par la création d'emplois durables – L'équité en matière d'avantages est fonction de la mise en œuvre adoptée 	Facteurs administratifs et institutionnels <ul style="list-style-type: none"> – Lourde tâche en matière d'exécution – Augmentation des coûts de transaction – Difficultés d'accès à un financement approprié – Incertitudes concernant la surveillance et la vérification – Besoin d'engagement et de participation au plan local; meilleure définition du régime foncier; prise en compte explicite des questions ayant trait aux droits des femmes et à l'équité; et élaboration de rouages institutionnels permettant d'évaluer la pénurie – Des initiatives mondiales telles que l'OIBT peuvent donner davantage de poids à la démarche visant à un aménagement forestier durable Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Nécessité d'un puissant appui politique – Forte opposition des milieux jouissant de droits acquis
Conservation et remplacement du bois de feu <ul style="list-style-type: none"> – Utilisation de foyers améliorés – Utilisation de fours à charbon 	Programmes axés sur le marché <ul style="list-style-type: none"> – Incitations à l'investissement Dispositions réglementaires <ul style="list-style-type: none"> – Attribution de concessions et réglementation des normes RD&D <ul style="list-style-type: none"> – Initiatives gouvernementales en faveur de la recherche, du développement, de la démonstration et de la diffusion 	Incidences favorables sur le climat <ul style="list-style-type: none"> – Maintien de la densité de carbone à un niveau pouvant atteindre 300 tonnes de C par hectare – Possibilités de réduire la part des 1,27 milliard de m³ de bois de feu extraite sans souci de durabilité 	Aspects macroéconomiques <ul style="list-style-type: none"> – Coût relativement élevé des foyers efficaces Équité <ul style="list-style-type: none"> – Création d'emplois durables en milieu rural – Réduction des corvées auxquelles sont astreintes les femmes et amélioration de la situation sanitaire – Economies de temps et d'argent résultant du regroupement du bois de feu 	Facteurs administratifs et institutionnels <ul style="list-style-type: none"> – Commercialement réalisable – Fort potentiel de reproduction – Nécessiter de surmonter les obstacles culturels (création éventuelle de marchés spécifiques pour les foyers) Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Politiquement acceptable

Tableau 15 (suite)

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
Utilisation de produits du bois recyclés et plus efficaces	Programmes axés sur le marché <ul style="list-style-type: none"> – Incitations fiscales en faveur de l'industrie Dispositions réglementaires <ul style="list-style-type: none"> – Etiquetage des produits RD&D <ul style="list-style-type: none"> – Campagnes d'information des consommateurs 	Incidences favorables sur le climat <ul style="list-style-type: none"> – Maintien de la densité de carbone à un niveau pouvant atteindre 300 tonnes de C par hectare Autres effets <ul style="list-style-type: none"> – Préservation des avantages liés à la diversité biologique, à la conservation des sols et aux bassins versants – Le recyclage peut nécessiter l'élimination d'éventuels contaminants résultant du traitement des produits du bois. 	Rapport coût-efficacité <ul style="list-style-type: none"> – Les dépenses qu'impliquent le recyclage et une utilisation plus efficace sont fonction du produit Aspects macroéconomiques <ul style="list-style-type: none"> – Avantages monétaires découlant d'un usage plus productif du bois 	Facteurs administratifs et institutionnels <ul style="list-style-type: none"> – Forte reproductibilité – Quelques frais administratifs supplémentaires Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Politiquement attrayant

Encadré 6.1. Exemple de l'Inde

Depuis 1980, le Gouvernement indien a mis en œuvre une série de politiques et de programmes qui ont permis de stabiliser la superficie de son espace forestier à 64 millions d'hectares environ. En conséquence, on a estimé qu'en 1990, les forêts avaient fixé 5 millions de tonnes de carbone. Avant 1980, le gouvernement cherchait avant tout à accroître la production vivrière en augmentant la superficie destinée à la culture de céréales alimentaires et à distribuer des terres à ceux qui n'en possédaient pas. Cette politique a eu pour effet d'accroître de façon très nette la déforestation pendant la période 1950-1975, alors qu'environ 4,3 Mha ont été en grande partie reconvertis en terres agricoles. Les politiques et les programmes mis en œuvre par le Gouvernement indien en vue de ralentir la déforestation et de faciliter la régénération sont les suivants :

Politiques

- 1) Loi de 1980 sur la protection des forêts : depuis que cette loi rigoureuse est entrée en vigueur, il est devenu très difficile de reconvertir des terres forestières à d'autres usages.
- 2) Interdiction d'exploiter les forêts primaires domaniales dans plusieurs Etats depuis le milieu des années 80.
- 3) Réduction notable des concessions attribuées à l'industrie du bois et promotion d'une réorientation vers les terres agricoles pour ce qui est du bois en tant que matière première.

Programmes

- 1) Reconversion de 15 Mha de forêts en zones protégées (parcs nationaux et aires protégées pour la flore et la faune sauvages).
- 2) Programme commun d'aménagement forestier, où la restauration du couvert végétal dans les espaces forestiers dégradés est assurée conjointement par les collectivités locales et les services forestiers.
- 3) De 1980 à 1995, reboisement de 18 à 20 Mha, ce qui a permis de produire 58 Mt de bois industriel et de bois de feu.

Ces politiques sont restées en vigueur pendant près de 15 ans, malgré la croissance démographique et la progression de la demande de bois et de biomasse. Il apparaît que le Gouvernement indien a su faire fond avec succès sur une législation adaptée, des programmes de reboisement et une sensibilisation efficace du public pour assurer la protection des forêts.

Source : SAR II, chapitres 15 (encadré 15.3) et 24 (Section 24.3.1.1).

La suppression de certaines subventions peut se heurter à une forte opposition des milieux jouissant d'avantages acquis. Des projets mis à exécution simultanément ont été freinés ou enterrés du fait de l'ampleur des coûts de transaction anticipés et des difficultés à financer des initiatives dont le principal intérêt réside dans la fixation du carbone. Bien que l'aménagement durable des forêts soit politiquement attrayant, son exécution nécessite une participation locale, l'instauration de régimes et de droits fonciers, la prise en compte des questions relatives aux

droits des femmes et à l'équité ainsi que l'élaboration d'instruments institutionnels permettant d'évaluer la pénurie; tous ces facteurs combinés peuvent occasionner d'importantes dépenses au plan administratif.

Bien qu'il puisse sembler difficile de freiner la déforestation dans les régions tropicales, il existe d'excellentes possibilités en la matière, et les gouvernements de plusieurs pays (Brésil, Inde, Thaïlande, etc.) ont adopté des mesures et des politiques

Tableau 16 : Exemples choisis de mesures visant à atténuer les émissions de gaz à effet de serre par le biais de la création de forêts et de l'agroforesterie

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
Foresterie et agroforesterie de production	Programmes axés sur le marché <ul style="list-style-type: none"> – Promotion de programmes concernant des terres appartenant à l'Etat – Prestation de services de vulgarisation au profit de la foresterie communautaire ou privée – Octroi d'incitations financières ou autres aux plantations privées 	Incidences favorables sur le climat <ul style="list-style-type: none"> – Jusqu'à 75 tonnes de carbone par hectare dans le cas de la végétation sur pied (le fait de ne procéder à aucune récolte dans les forêts primaires contribue à conserver davantage de carbone) – L'agroforesterie peut donner lieu à une densité de carbone plus faible Autres effets <ul style="list-style-type: none"> – Nécessité d'un choix judicieux des sites et des essences pour bénéficier des avantages liés à la conservation des sols et aux bassins versants 	Aspects macroéconomiques <ul style="list-style-type: none"> – Dépenses d'investissement atteignant \$5 à 8 par tonne de C – Les autres coûts varient selon le type de terrain, la qualité du sol et le niveau d'intervention gouvernementale, notamment pour ce qui concerne l'infrastructure – Avantages tirés de la vente de produits forestiers ligneux et non ligneux – Création d'emplois – Réduction des importations de bois d'œuvre et des sorties de devises fortes 	Facteurs administratifs et institutionnels <ul style="list-style-type: none"> – Nécessité de disposer de marchés sûrs pour les produits et d'institutions proposant des services de vulgarisation Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Nécessité de disposer de régimes fonciers non équivoques
Forêts de conservation^a	Dispositions réglementaires <ul style="list-style-type: none"> – Action directe des pouvoirs publics en faveur des forêts aménagées en vue : <ul style="list-style-type: none"> • de la protection des bassins versants • de la conservation des sols • de la fixation du carbone 	Incidences favorables sur le climat <ul style="list-style-type: none"> – Fort potentiel (jusqu'à 300 tonnes de carbone par hectare), mais la fixation de C cesse à maturité Autres effets <ul style="list-style-type: none"> – Avantages pour ce qui est de la conservation des sols, des bassins versants, etc. – Nécessité d'un choix judicieux des sites et des essences pour bénéficier des avantages liés à la conservation des sols et aux bassins versants 	Aspects macroéconomiques <ul style="list-style-type: none"> – Dépenses d'investissement atteignant \$5 à 8 par tonne de C – Coût d'opportunité élevé des terres – Création éventuelle d'emplois en milieu rural – Obtention de produits forestiers non ligneux 	Facteurs politiques <ul style="list-style-type: none"> – Difficiles à justifier politiquement et à maintenir à long terme

^a Si les programmes et les politiques ayant trait aux forêts de conservation concernent en premier lieu les terrains publics, ils prévoiront néanmoins la prestation de services de vulgarisation visant à faciliter le peuplement des terrains privés

Tableau 17 : Exemples choisis de mesures visant à atténuer les émissions de gaz à effet de serre par le biais d'un aménagement axé sur la substitution

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
Production de bioélectricité sur les terres incultes et dégradées	<p>Programmes axés sur le marché</p> <ul style="list-style-type: none"> – Prix de l'énergie fixé en fonction du coût de l'énergie qui aurait été obtenue au moyen de combustibles fossiles <p>RD&D</p> <ul style="list-style-type: none"> – Promotion et commercialisation de la bioélectricité et des biocombustibles, y compris le biogaz 	<p>Incidences favorables sur le climat</p> <ul style="list-style-type: none"> – Permet de réduire les émissions de carbone d'une quantité équivalente à quatre fois celle du carbone fixé dans une plantation – Les biocombustibles et la bioélectricité donnent généralement lieu à moins d'émissions de polluants autres que les gaz à effet de serre <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Avantages éventuels en matière de conservation des sols et d'aménagement des bassins versants 	<p>Rapport coût-efficacité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Les avantages peuvent l'emporter sur les coûts <p>Aspects macroéconomiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Les dépenses d'investissement que nécessitent les plantations varient de \$5 à 8 par tonne de carbone – Dépenses d'investissement supplémentaires entraînées par l'acquisition du matériel nécessaire à la production de bioénergie – Faible coût d'opportunité des terres – Production de produits forestiers ligneux ou non ligneux <p>Équité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Création d'emplois durables en milieu rural et perspectives concernant la biomasse 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Excellentes perspectives en matière de reproductibilité – Recherche et développement et transport de technologie parfois nécessaire <p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Nécessité de surmonter les obstacles liés à la fixation du prix de l'énergie et à sa mise en marché
Remplacement du bois récolté de façon non durable et des produits non ligneux (ciment, acier, etc.) par du bois obtenu dans des conditions écologiquement viables	<p>Programmes axés sur le marché</p> <ul style="list-style-type: none"> – Octroi d'incitations fiscales – Mise en œuvre de politiques en faveur de l'industrie du bois, de sorte que ses produits puissent convenablement concurrencer au plan technique et économique les produits de remplacement (acier, ciment, charbon, etc.) – Mise en œuvre de politiques en faveur de l'industrie du bois, de sorte que ses produits puissent convenablement concurrencer au plan technique et économique les produits de remplacement (acier, ciment, charbon, etc.) – Politique de fixation des prix sur coupe favorisant le bois exploité de façon durable par rapport à ses substituts <p>RD&D</p> <ul style="list-style-type: none"> – Accent mis sur la sensibilisation 	<p>Incidences favorables sur le climat</p> <ul style="list-style-type: none"> – Proportionnées aux émissions évitées lors de la fabrication des matériaux de remplacement ou de la récolte du bois – Les biocombustibles et la bioélectricité donnent généralement lieu à moins d'émissions de polluants autres que les gaz à effet de serre <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Avantages éventuels en matière de conservation des sols et d'aménagement des bassins versants 	<p>Rapport coût-efficacité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Les avantages peuvent l'emporter sur les coûts <p>Aspects macroéconomiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Diminution éventuelle des importations de combustibles – Coûts de rééquipement et de recyclage du personnel – Perte des emplois concernés – Production de produits forestiers ligneux ou non ligneux <p>Équité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Création d'emplois durables en milieu rural et perspectives concernant la biomasse 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Marchés non garantis à long terme pour les produits

explicitement destinées à mettre un terme à ce phénomène (SAR II, 24.3.1.1). C'est ainsi qu'en juin 1991, le Gouvernement brésilien a édicté un décret (N°151) suspendant l'octroi d'incitations fiscales aux nouveaux projets d'élevage en ranch dans les espaces forestiers de l'Amazonie, de façon à ralentir le rythme annuel de déforestation (qui, par suite de la récession économique, est passé de 2 Mha par an pendant la période 1978-1988 à 1,1 Mha en 1990-1991). L'incidence à long terme de ce décret n'est pas encore connue, mais des mesures supplémentaires pourront être appliquées s'il y a lieu.

Outre les mesures prises au plan national, des projets de protection appuyés par des gouvernements étrangers, des organisations non gouvernementales (ONG) et des entreprises privées sont mis en train dans le but de mettre un terme à la déforestation et de conserver et/ou de fixer le carbone. Ainsi, le projet d'aménagement forestier et de préservation du Rio Bravo mis en train au Belize, qui a été approuvé au titre de l'Initiative des Etats-Unis d'Amérique concernant la mise en œuvre conjointe (US IJI), prévoit l'achat d'une étendue de 6 000 hectares de terres forestières en péril afin d'empêcher que deux parcelles adjacentes soient reconverties en terres agricoles et, d'après les estimations, devrait permettre la fixation de 3 millions de tonnes de carbone. Parmi les participants au projet figurent la Wisconsin Electric Power Company, The Nature Conservancy, le Programme for Belize, la Detroit Edison Company, Citienergy et PacifiCorp. Par ailleurs, le projet ECOLAND, auquel participent des institutions américaines, costariciennes et autrichiennes, contribuera à préserver les forêts tropicales grâce à l'achat de 2 000 à 3 000 hectares dans le parc national des Esquinas, sur lequel pèse la menace de déforestation dont est l'objet le sud-ouest du Costa Rica.

Le soutien des programmes, projets et mesures mis en œuvre en vue de ralentir la déforestation soulève de nombreux problèmes. En Inde, le recul des taux de croissance de la population rurale a aidé les décideurs à imposer un ralentissement de la déforestation. Ailleurs, toutefois, le défi fondamental consistera à proposer sans relâche d'autres moyens d'existence aux habitants des zones forestières ou aux responsables du déboisement. Il peut ainsi s'avérer nécessaire d'intégrer ces habitants dans le tissu social urbain d'un pays. Ce sont parfois d'autres raisons que l'intention de cultiver des terres qui poussent certains à déboiser, et les décideurs doivent avoir largement recours à des politiques non forestières dans de telles circonstances. Eu égard à la protection des forêts et des parcs nationaux, un autre défi consiste à augmenter les budgets gouvernementaux alloués à cette fin, budgets qui sont souvent trop faibles pour qu'il soit possible d'engager des gardes forestiers et de mettre en place des clôtures et autres infrastructures susceptibles de mettre un terme à l'empiètement des terres.

7.3.2 Création de forêts

En créant des forêts, on augmente la quantité de carbone stocké dans la végétation (au-dessus et au-dessous du sol), les matières organiques mortes et les produits du bois à moyen et à long terme. Ce procédé recouvre le reboisement, qui consiste

à replanter d'arbres une zone qui a été récemment déboisée (depuis moins de 50 ans), et le boisement, qui consiste à planter d'arbres des zones qui ont été longtemps dépourvues de couvert forestier (depuis plus de 50 ans). Dans les régions tempérées, les cadences de reboisement sont souvent élevées : au Canada, on a reboisé au rythme de 720 000 hectares par an pendant les années quatre-vingt (SAR II, 24.4.1), alors qu'aux Etats-Unis d'Amérique, le rythme du reboisement s'est établi à 1 million d'hectares par an en moyenne pendant la période 1990-1995. Des efforts considérables ont été déployés en matière de boisement, aussi bien dans les pays tropicaux que dans les pays tempérés : la Chine s'est vantée d'avoir à elle seule planté d'arbres 30,7 millions d'hectares entre 1949 et 1990, alors que l'Inde en avait planté 17,1 millions d'hectares en 1989 (SAR II, 24.4; voir encadré 4); les Etats-Unis d'Amérique comptait 5 millions d'hectares de plantations forestières en 1985, alors que, depuis le début du siècle dernier, la France a plus que doublé la superficie de ses forêts, qui est ainsi passée de 7 à 15 millions d'hectares; enfin, en 1994, la Nouvelle-Zélande gérait 1,4 million d'hectares de plantations forestières selon des principes de rendement durable.

Au nombre des mesures favorisant la création de forêts et l'agroforesterie figurent i) les programmes d'investissement public visant à développer ces pratiques sur les terres appartenant à l'Etat, ii) les programmes communautaires de sylviculture qui peuvent compter sur l'appui des services de vulgarisation mis en place par le gouvernement et iii) les plantations privées bénéficiant d'une aide financière ou d'incitations gouvernementales (tableau 16). Ces mesures peuvent être ciblées vers les forêts de production, l'agroforesterie ou les forêts de conservation. Parmi ces dernières figurent les forêts gérées dans le cadre de la lutte contre l'érosion des sols et de l'aménagement des bassins versants. Les forêts aménagées avant tout aux fins de fixation du carbone devraient se trouver sur des terres dont le coût d'opportunité est peu élevé, de sorte qu'on ne cherche pas à empiéter sur elles pour d'autres usages. Les subventions publiques peuvent prendre la forme de dispositions fiscales qui ne pénalisent pas la foresterie, de dégrèvements fiscaux pour les projets poursuivant des objectifs précis ou d'un accès facilité au financement bancaire à des taux d'intérêt inférieurs à ceux du marché.

Les subventions publiques ont joué un rôle important dans la création et la préservation des plantations privées. En France, 3,15 millions d'hectares ont été plantés d'arbres depuis la Deuxième Guerre mondiale, et le programme national d'atténuation des effets du changement climatique mis en œuvre dans ce pays en 1995 prévoit le boisement de 30 000 hectares par an à partir de 1998, ce qui permettra de fixer 79 à 89 millions de tonnes de carbone en 50 ans au coût de 70 dollars par tonne de carbone. En Inde, des entrepreneurs privés ont procédé ces dernières années à la plantation de tecks (*Tectona grandis*) à l'aide de capitaux collectés sur les marchés financiers privés (SAR II, 15.3.3). Ce programme plein d'intérêt, qui ne concerne pour l'instant que quelques milliers d'hectares, pourrait s'étendre sur 4 à 6 millions d'hectares parmi les

66 millions d'hectares de terres dégradées que compte ce pays. Le teck peut être utilisé dans la construction et l'ameublement.

Dans certains pays, en plus des programmes nationaux, d'autres programmes ont été mis en train et financés par des gouvernements étrangers, des ONG et des entreprises privées. C'est par exemple le cas de RUSAFOR, un projet de boisement agréé par l'US IJI mis en train dans la région de Saratov, en Russie (SAR II, encadré 24-2), dont l'objectif consiste à planter de jeunes arbres 500 hectares de terres agricoles de faible rendement ou des peuplements forestiers dévastés par les incendies. Le taux initial de survie des jeunes plants s'établit à 65 %. Ce projet servira d'exemple d'aménagement en Russie d'une plantation forestière destinée à constituer un puits de carbone. A titre d'exemple, on peut aussi mentionner le projet d'exploitation forestière à impact réduit financé en partie par la New England Power Company (SAR II, encadré 24-2). Ce projet vise à réduire de moitié les dégâts causés aux arbres résiduels et aux sols lors de la récolte de bois d'œuvre et de restreindre ainsi la production de débris ligneux, la décomposition et l'émission de carbone.

Pour que l'action des pouvoirs publics en faveur de la création de forêts et de l'agroforesterie aboutisse, il faudra impérativement formuler une stratégie coordonnée pour ce qui est des modes d'utilisation des sols, fondée sur un régime foncier dépourvu d'ambiguïté et ne donnant lieu à aucune contestation juridique, et disposer en outre de marchés suffisamment développés pour garantir une demande continue de produits du bois.

7.3.3 Aménagement axé sur la substitution

L'aménagement axé sur la substitution est la solution qui offre les meilleures perspectives à long terme en matière d'atténuation. Les forêts sont en ce cas considérées comme des ressources renouvelables, et l'on s'attache à transformer le carbone de la biomasse en produits qui remplacent les combustibles fossiles (ou en réduisent l'usage) plutôt qu'à accroître le bassin de carbone lui-même. Bien qu'on se soit essayé avec un succès mitigé à la pratique de la sylviculture explicitement destinée à des fins énergétiques dans un certain nombre de pays (Brésil, Philippines, Ethiopie, Suède, etc.), il existe de vastes possibilités en matière de bioénergie (on trouvera des estimations concernant les possibilités d'approvisionnement en cette forme d'énergie à la section 4.2.5 du présent rapport; voir aussi encadré 5).

Avec le temps, le remplacement des combustibles fossiles par des produits du bois à faible intensité énergétique devrait contribuer plus efficacement à réduire les émissions de carbone qu'à fixer cet élément dans des plantations établies sur des terres déboisées ou dégradées dans les pays en développement et sur des terres agricoles en surplus dans les pays de l'OCDE figurant à l'Annexe I. Par exemple, le remplacement du charbon par du bois de plantation dans les centrales thermiques peut réduire les émissions de carbone d'une quantité équivalente à quatre fois le carbone fixé dans la plantation (tableau 17) (SAR II, 24.3.3). La production de biocombustibles et de bioélectricité est beaucoup plus complexe, car la commerciali-

sation de ces produits soulève des difficultés, et des obstacles doivent être encore surmontés dans le domaine de la fixation des prix et de la mise en marché de l'énergie. Les systèmes de production d'énergie à partir de la biomasse mis en place à l'échelon des villes et des villages contribuent à créer des emplois, à régénérer des terres dégradées et à procurer des avantages connexes aux habitants des zones rurales. Sous des climats froids, il est possible de convertir les installations de chauffage central en systèmes alimentés par des dérivés de la biomasse afin d'en obtenir chaleur et électricité.

Dans les pays ne figurant pas à l'Annexe I, on utilise peu d'électricité en milieu rural. Dans bon nombre de pays, et notamment en Afrique subsaharienne, moins de 5 % des villages sont électrifiés; dans des pays comme l'Inde, où plus de 80 % des établissements ruraux sont électrifiés, moins du tiers des ménages ruraux ont l'électricité. Il est indispensable que les pouvoirs publics mettent en œuvre des politiques qui permettent i) aux petits producteurs indépendants de produire et de distribuer de la bioélectricité, ii) d'opérer un transfert de technologie au sein du pays ou depuis l'étranger, iii) de fixer un prix rémunérateur pour l'électricité et iv) de supprimer les restrictions touchant la culture, la récolte, le transport et la transformation du bois (à l'exception d'éventuelles restrictions concernant la reconversion de bonnes terres agricoles en plantations forestières énergétiques) (SAR II, 24.3.3).

Encadré 5. Perspectives d'utilisation de la bioénergie aux fins d'électrification en milieu rural

Dans les pays ne figurant pas à l'Annexe I, la majorité des zones rurales (où vit plus de 70 % de la population) ne sont pas électrifiées. Toutefois, la demande d'électricité devrait y progresser. Les charges, faibles et dispersées, varient de 10 à 200 kW. Des démonstrations réalisées sur le terrain dans le sud de l'Inde ont prouvé qu'il était possible, au plan technique et opérationnel, de satisfaire les besoins des zones rurales en matière d'électricité à l'aide de systèmes de production décentralisés fondés sur l'utilisation de la biomasse ligneuse et comportant des générateurs gazogènes ainsi que des installations de biogaz alimentées par des déjections animales. Les systèmes bioénergétiques peuvent en outre contribuer à la remise en état des terres dégradées, à la promotion de la diversité biologique par le biais de pratiques forestières appropriées et à la création d'emplois en milieu rural. En conséquence, compte tenu des faibles charges en jeu, de la nature dispersée de la demande d'électricité et des avantages offerts au plan local, les systèmes bioénergétiques peuvent être considérés comme des solutions "sans regrets" permettant de répondre aux besoins grandissants des zones rurales en matière d'énergie électrique.

8.1 Introduction

La décomposition anaérobie des matières organiques que contiennent les déchets solides et les eaux usées donne lieu à des émissions de méthane. Toutefois, le manque d'informations à propos des modes de gestion des déchets adoptés dans les différents pays, de la proportion des déchets organiques dont la décomposition s'effectue en anaérobie et de l'ampleur exacte de cette décomposition explique le caractère fort incertain des estimations de ces émissions.

Quelque 20 à 40 millions de tonnes de méthane (110 à 230 millions de tonnes de carbone) – soit environ 10 % des émissions mondiales de méthane d'origine humaine – se dégagent chaque année des décharges brutes ou contrôlées. Dix pays cités à l'Annexe I sont responsables des deux tiers environ des émissions globales de méthane résultant de l'élimination des déchets solides, les Etats-Unis d'Amérique contribuant à eux seuls pour quelque 33 %, soit 10 millions de tonnes environ (SAR II, 22.4.4.1).

8. ÉVACUATION DES DÉCHETS SOLIDES ET DES EAUX USÉES²¹

8.1 Introduction

D'après les estimations, les émissions de méthane résultant de l'évacuation des eaux usées d'origine ménagère et industrielle atteindraient 30 à 40 millions de tonnes (170 à 230 millions de tonnes de carbone) par an, ce qui représente là encore 10 % de l'ensemble des émissions globales d'origine humaine. Les émissions proviennent en grande partie des eaux usées industrielles, et principalement celles produites par les industries alimentaires et l'industrie des pâtes et papiers, alors que les eaux usées d'origine ménagère et commerciale ne rejettent pour leur part que 2 millions de tonnes de méthane par an. A la différence des émissions des déchets solides, la plus grande partie des émissions en provenance d'eaux usées ont leur origine dans des pays non cités à l'Annexe I, où les flux d'eaux usées ménagères et de déchets industriels ne font souvent l'objet d'aucune gestion ou sont maintenus dans des conditions anaérobies en l'absence de toute mesure de réduction des émissions de méthane (SAR II, 22.4.4.1).

8.2 Solutions techniques permettant de lutter contre les émissions de méthane

Il est possible d'atténuer les émissions de méthane en procédant à une réduction à la source, ou encore à la récupération et/ou à la réduction des émissions de méthane en provenance de déchets solides et d'eaux usées.

8.2.1 Réduction à la source

En matière de réduction à la source, la principale solution technique consiste à limiter l'utilisation de matériaux susceptibles de grossir le flux de déchets. Le présent chapitre est toutefois axé sur les déchets solides après qu'ils ont été produits (en accord avec SAR II, 22.4.4.2). Il est possible de réduire la quantité de déchets solides organiques en procédant au recyclage des produits du papier, au compostage et à l'incinération. Les produits du papier constituent une part importante des déchets solides dans les pays figurant à l'Annexe I (40 % aux Etats-Unis, par exemple) et dans les centres urbains des pays les plus prospères parmi ceux qui n'apparaissent pas dans cette annexe (généralement de 5 à 20 %). Un ensemble de procédés de recyclage plus ou moins complexes au plan technique permettent souvent de transformer ces déchets en une matière que l'on ne peut distinguer du produit d'origine. Le compostage, procédé aérobie permettant de traiter des déchets organiques humides émettant peu ou pas de méthane, concerne avant tout les pays non cités à l'Annexe I, où les déchets de ce type représentent une fraction importante du total des déchets produits; il est cependant possible d'employer la méthode dans les pays figurant à l'Annexe I (SAR II, 22.4.4.2). En outre, le résidu peut être utilisé comme engrais. Le fait que l'on dispose de moins en moins de terres et les perspectives qui s'offrent en matière de récupération de l'énergie expliquent que l'incinération des déchets soit de plus en plus pratiquée dans de nombreux pays; c'est ainsi qu'au Japon, 70 % des déchets solides sont incinérés. Les émissions de polluants atmosphériques dus à la combustion et

l'élimination des cendres posent toutefois encore problème, et des caractéristiques telles que la teneur en eau et la composition peuvent compliquer l'incinération et augmenter son coût dans les pays non cités à l'Annexe I.

La complexité technique de ces diverses possibilités de réduction à la source peut varier considérablement, bien que cela n'ait guère d'influence sur leur efficacité. Dans les pays ne figurant pas à l'Annexe I, où la main-d'œuvre est bon marché en comparaison des dépenses d'équipement, le recyclage et le compostage à forte intensité de main-d'œuvre sont des pratiques courantes. Quant aux pays figurant à l'Annexe I, ils ont généralement recours à des machines complexes économes en main-d'œuvre, qui nécessitent un personnel plus qualifié.

Les coûts seront fonction du système adopté, de la taille des installations et de divers facteurs locaux. Pour ce qui est des installations de compostage de déchets solides, les dépenses d'investissement peuvent varier de 1,5 million de dollars pour une usine traitant 300 tonnes par jour à 45 millions de dollars dans le cas d'une usine plus complexe traitant 550 tonnes par jour et assurant en outre le compostage des boues d'épuration; quant aux frais d'exploitation connexes, ils peuvent varier de 10 à 90 dollars par tonne, mais se situent généralement dans une fourchette de 20 à 40 dollars. Les installations de traitement des déchets de jardin sont habituellement plus petites et moins complexes; dans leur cas, les dépenses d'investissement relevées aux Etats-Unis d'Amérique varient de 75 000 dollars à 2 millions de dollars pour des usines traitant de 2 000 à 60 000 tonnes de déchets par an, et les frais d'exploitation atteignent approximativement 20 dollars par tonne. S'agissant de l'incinération, les dépenses d'investissement peuvent être assez élevées; elles varient généralement de 60 à 300 millions de dollars pour des installations de 10 à 80 mégawatts, ce qui correspond à quelque 125 000 dollars par unité de capacité (tonne par jour) (SAR II, 22.4.4.2).

8.2.2 Récupération du méthane émis lors de l'évacuation des déchets solides

La réduction à la source est applicable à la production ultérieure de déchets solides. Il est possible de récupérer le méthane provenant des décharges contrôlées actuelles, mais aussi celui qui sera rejeté par les décharges futures, car les

²¹ Le présent chapitre est fondé sur deux chapitres de la contribution du Groupe de travail II au Deuxième Rapport d'évaluation du GIEC, à savoir le chapitre 22 intitulé *Mitigation Options for Human Settlements* (auteurs principaux : M. Levine, H. Akbari, J. Busch, G. Dutt, K. Hogan, P. Komor, S. Meyers, H. Tsuchiya, G. Henderson, L. Price, K. Smith et Lang Siwei) et le chapitre 23 intitulé *Agricultural Options for Mitigation of Greenhouse Gas Emissions* (auteurs principaux : V. Cole, C. Cerri, K. Minami, A. Mosier, N. Rosenberg, D. Sauerbeck, J. Dumanski, J. Duxbury, J. Freney, R. Gupta, O. Heinemeyer, T. Kolchugina, J. Lee, K. Paustian, D. Powlson, N. Sampson, H. Tiessen, M. van Noordwijk et Q. Zhao).

matières organiques présentes dans les décharges brutes ou contrôlées continuent à émettre du méthane (souvent appelé gaz d'enfouissement) pendant 10 à 30 ans, voire plus. On parvient souvent à récupérer plus de la moitié du méthane émis et à s'en servir pour produire de la chaleur ou de l'électricité; il s'agit d'ailleurs là d'une pratique déjà courante dans de nombreux pays (SAR II, 22.4.4.2). Il est aussi possible de purifier et d'injecter le gaz d'enfouissement dans un gazoduc ou un réseau de distribution; il existe plusieurs projets de ce type aux Etats-Unis d'Amérique. A Minas Gerais (Brésil), on a utilisé du gaz d'enfouissement purifié pour alimenter en énergie une flotte de camions à ordures et de taxis.

Les coûts engendrés par la récupération du méthane émis dans les installations d'élimination des déchets solides sont pour une bonne part fonction des caractéristiques techniques et des particularités du site. S'agissant d'une décharge contrôlée d'une capacité de 1 million de tonnes de déchets (ce qui correspond à une population de 50 000 à 100 000 habitants environ), les dépenses d'investissement en matière de collecte et de combustion atteignent approximativement 630 000 dollars; ce montant passe à 3,6 millions de dollars dans le cas d'une décharge contrôlée d'une capacité de 10 millions de tonnes. Quant aux coûts annuels d'exploitation, ils peuvent varier de moins de 100 000 à plus de 200 000 dollars. Les dépenses d'exploitation engagées aux fins de récupération de l'énergie (y compris le traitement du gaz) peuvent varier de 1 000 à 1 300 dollars par kilowatt net. L'utilisation directe est la formule la moins coûteuse, la construction de gazoducs engendrant les plus grandes dépenses. En général, dans le cas d'un système complet (collecte du gaz et récupération de l'énergie), les coûts de production d'électricité varient de 0,04 à 0,07 dollar par kWh. Ces montants sont fondés sur les coûts d'équipement et de main-d'œuvre en vigueur aux Etats-Unis d'Amérique et peuvent varier considérablement selon le pays considéré. Par ailleurs, dans de nombreux pays, on recueille le méthane émis par certaines décharges contrôlées et autres sites d'élimination des déchets solides et on l'évacue ou on le fait brûler (souvent pour des raisons de sécurité). En ce cas, le coût de production d'électricité sera inférieur au montant indiqué ci-dessus (SAR II, 22.4.4.2; SAR III, 9.4.1).

8.2.3 Récupération du méthane et/ou réduction des émissions de méthane en provenance des eaux usées

Il est possible d'éliminer pratiquement toute émission de méthane en stockant et en traitant les eaux usées et les boues résiduelles en milieu aérobie. Au nombre des solutions visant à empêcher la production de méthane pendant l'épuration des eaux usées et l'évacuation des boues figurent le traitement primaire et secondaire en milieu aérobie et l'épandage. Il est également possible d'épurer les eaux usées en milieu anaérobie et de recueillir le méthane en vue de l'utiliser comme source d'énergie pour chauffer le digesteur d'eaux usées ou de boues résiduelles. Quant au méthane en surplus, on peut l'utiliser comme combustible ou s'en servir pour produire de l'électricité. En dernier ressort, on peut faire brûler le méthane, ce qui le transforme en CO₂, un gaz doté d'un potentiel de réchauffement de la planète (PRP) bien inférieur.

Les coûts d'épuration des eaux usées sont étroitement subordonnés aux procédés techniques employés et aux particularités du site. Les dépenses d'investissement liées à la construction d'installations de traitement primaire en milieu aérobie peuvent varier de 150 000 à 3 millions de dollars, pour un débit des eaux usées atteignant 2 000 à 40 000 m³ par jour; quant aux coûts annuels d'exploitation et de maintenance correspondant à ces volumes, on estime qu'ils varient de 20 000 à 500 000 dollars. Les coûts associés au traitement secondaire en milieu aérobie peuvent être assez élevés, compte tenu de l'énergie et du matériel que cette méthode nécessite, et sont, dans une large mesure, fonction du volume journalier d'eaux usées à traiter; ils peuvent néanmoins atteindre 10 millions de dollars en fonction de la technique choisie et du volume à traiter, qui peut en l'occurrence s'élever à environ 400 000 m³ par jour. Enfin, les coûts relatifs aux digesteurs d'eaux usées en milieu anaérobie et à la combustion ou à l'utilisation des émissions de méthane peuvent varier de 100 000 à 3 millions de dollars pour ce qui est de la construction et de 10 000 à 100 000 dollars en ce qui concerne l'exploitation et la maintenance, dans l'hypothèse d'un débit d'eaux usées variant de 400 à 400 000 m³ par jour (SAR II, 22.4.4.2).

Les procédés intensifs de traitement en milieu anaérobie des effluents liquides à forte teneur en matières organiques (eaux d'égout, déchets alimentaires, etc.) peuvent contribuer à réduire les émissions brutes de méthane et sont particulièrement appropriés aux climats chauds de la plupart de pays en développement. C'est ainsi que le Brésil et l'Inde ont mis en place une infrastructure importante et efficace à l'appui de ces techniques, qui sont caractérisées par un temps de rétention hydraulique plus long que celui requis par les procédés de traitement en milieu aérobie et qui s'accommodent par conséquent d'installations beaucoup moins vastes et nettement moins chères au plan de la construction. De surcroît, à la différence des procédés aérobies, ces techniques ne nécessitent aucune aération et consomment donc peu d'électricité.

Pour ce qui est des réacteurs anaérobies à lit de boues à flux ascendant (UASB) d'une capacité de 4 000 à 10 000 m³ (susceptibles de répondre à une demande chimique d'oxygène de 20 à 30 kg par m³ et par jour), on a estimé que les dépenses d'investissement variaient de 1 à 3,5 millions de dollars, les coûts d'exploitation annuels variant quant à eux de 1 à 2,7 millions de dollars. Vu ces coûts, le coût total de production de méthane chutera pour s'établir entre 0,45 et 1,05 dollar par GJ, les valeurs les plus élevées étant enregistrées en Europe et les plus faibles, au Brésil. D'après ces estimations, on peut espérer recouvrer la totalité des coûts, car le méthane sera produit presque partout à un prix inférieur à celui du gaz naturel (SAR II, 22.4.4.2).

8.3 Mesures de réduction et de récupération des émissions de méthane

Dans bon nombre de pays, c'est en premier lieu pour des raisons environnementales et sanitaires que l'on devrait prendre des initiatives visant à limiter les émissions de méthane en provenance des sites d'élimination des déchets solides et des

Tableau 18 : Exemples choisis de mesures visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant des installations d'élimination des déchets solides et des stations d'épuration des eaux usées

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
<p>Réduction à la source</p> <ul style="list-style-type: none"> – Recyclage – Compostage – Incinération <p>Récupération du méthane</p> <ul style="list-style-type: none"> – Installation d'élimination des déchets solides – Stations d'épuration des eaux usées 	<p>Renforcement du cadre institutionnel et assistance technique</p> <ul style="list-style-type: none"> – Accent mis sur le renforcement des institutions au plan local et national à des fins de gestion de l'élimination des déchets et de l'épuration des eaux usées 	<p>Incidences favorables sur le climat</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réduction notable du CH₄ (jusqu'à 70 % ou plus), selon la solution technique choisie et l'ampleur des mesures – Dans le cas des projets de récupération du CH₄ et de l'incinération, réduction des émissions de CO₂ par le biais du remplacement des combustibles fossiles <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Améliorations locales de la qualité de l'air, notamment grâce à la réduction des COV – Atténuation des odeurs – Effets positifs sur la santé, notamment par le biais de la limitation des cas de maladies – Sécurité améliorée 	<p>Rapport coût-efficacité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Coûtent souvent moins cher que les autres mesures <p>Aspects macroéconomiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Large éventail d'avantages <p>Équité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Amélioration notable des conditions d'existence des générations actuelles et futures 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Résultats difficiles à apprécier – Peuvent modifier l'équilibre des pouvoirs – Forte reproductibilité <p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Opposition de certaines institutions – Bénéficie d'un meilleur appui que les dispositions réglementaires
	<p>Programmes volontaires</p> <ul style="list-style-type: none"> – Mise en œuvre de programmes de coopération avec l'industrie, les pouvoirs publics et les exploitants des installations en vue d'encourager l'application des solutions techniques 	<p>Incidences favorables sur le climat</p> <ul style="list-style-type: none"> – Ont souvent des effets favorables moindres que les mesures réglementaires ou financières, car seules les réductions rentables sont effectuées volontairement <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Bénéfices pour la qualité de l'air local et la santé, comme ci-dessus 	<p>Rapport coût-efficacité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Moins onéreux que les dispositions réglementaires – Assurent la promotion de projets rentables <p>Aspects macroéconomiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Lèvent les obstacles aux projets économiquement viables <p>Équité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Comme ci-dessus 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réductions plus incertaines – Nécessitent un soutien institutionnel – Forte reproductibilité en présence d'un cadre institutionnel adéquat <p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Bénéficie d'un meilleur appui que les dispositions réglementaires
	<p>Dispositions réglementaires</p> <ul style="list-style-type: none"> – Établissement de normes ou de règlements relatifs à l'élimination des déchets, à la gestion des eaux usées et/ou à la récupération du méthane 	<p>Incidences favorables sur le climat</p> <ul style="list-style-type: none"> – Ces mesures, parce qu'elles sont impératives, peuvent procurer des avantages importants et bien définis (en fonction du niveau d'intervention) <p>Autres effets</p> <ul style="list-style-type: none"> – Bénéfices pour la qualité de l'air local et la santé, comme ci-dessus 	<p>Rapport coût-efficacité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Coût élevé, subordonné à la rigueur de la réglementation <p>Aspects macroéconomiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Coût social élevé <p>Équité</p> <ul style="list-style-type: none"> – Comme ci-dessus, mais coût social plus élevé pour des réductions plus importantes des émissions 	<p>Facteurs administratifs et institutionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> – Réductions certaines – Nécessitent une infrastructure institutionnelle – Bonne reproductibilité pour peu qu'il existe une infrastructure coercitive convenable et que les programmes bénéficient d'un soutien politique adéquat <p>Facteurs politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Opposition des entreprises industrielles

Tableau 18 (suite)

Solutions techniques	Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
	Programmes axés sur le marché – IOctroi d'incitations financières en vue d'encourager les pratiques de gestion des déchets souhaitées ou, directement, les activités de récupération du méthane.	Incidences favorables sur le climat – IPeuvent offrir de grands avantages, selon le degré d'assistance. Autres effets – IEffets positifs sur la qualité de l'air à l'échelon local et la santé, comme ci-dessus.	Rapport coût-efficacité – ICoût élevé, subordonné au degré d'incitation Aspects macroéconomiques – IPeuvent refléter l'importance de la réduction des émissions au plan social. Équité – IComme ci-dessus	Facteurs administratifs et institutionnels – IRéductions plus incertaines – INécessitent un appui institutionnel – IDoivent être adaptés aux particularités économiques locales. Facteurs politiques – IOpposition possible en raison des coûts

stations d'épuration des eaux usées; la réduction des émissions de méthane en tant que telle sera considérée comme un aspect positif secondaire de ces initiatives. Malgré les avantages que procurent les mesures de récupération et de réduction à la source du méthane décrites ci-dessus, un certain nombre d'obstacles empêchent de tirer pleinement parti des possibilités offertes, en particulier dans les pays non cités à l'Annexe I. Ces obstacles sont les suivants (SAR II, 22.5.3) :

- Beaucoup méconnaissent les coûts et les avantages relatifs des diverses solutions techniques.
- Si les procédés anaérobies mis au point récemment sont certes moins coûteux que les méthodes classiques d'épuration des eaux usées en milieu aérobie, on manque cependant de données d'expérience à leur sujet.
- Il n'est guère économique de récupérer le méthane émis par des décharges de dimension relativement restreinte.
- Bon nombre de pays et de régions où l'on utilise peu le gaz naturel et où l'on ne dispose pas toujours de l'équipement nécessaire (il en va ainsi pour Mexico, New Delhi, Port-au-Prince, la capitale d'Haïti, et la plus grande partie de l'Afrique subsaharienne) ont une infrastructure trop rudimentaire et une expérience trop succincte pour tirer convenablement parti des émissions de méthane.
- Les actuels "systèmes" d'élimination des déchets solides peuvent consister en décharges brutes ou en rejets d'effluents ne donnant lieu à aucun traitement et, par conséquent, à aucune dépense d'investissement ou d'exploitation. Les obstacles mentionnés précédemment, associés au manque d'hygiène des sites proposés, peuvent décourager ceux qui auraient été tentés d'investir dans la récupération et l'utilisation du méthane.
- La production d'énergie, la fourniture d'engrais et la gestion des déchets relèvent généralement de la compétence de groupes différents, et la récupération et l'utilisation du méthane peuvent introduire de nouveaux acteurs dans le processus d'évacuation des déchets, ce qui peut perturber

l'équilibre des pouvoirs économiques et politiques au sein de la communauté (c'est ainsi qu'à Lahore, au Pakistan, la mise en train d'un projet expérimental de récupération du gaz d'enfouissement financé par le Fonds pour l'environnement mondial a été retardé faute d'accord entre les diverses parties concernées). Ce problème concerne aussi bien les pays figurant à l'Annexe I que ceux qui n'y figurent pas.

Pour que les projets de réduction des émissions de méthane puissent être menés à bien, il importe de lever ces obstacles à l'aide de mesures appropriées. En général, ces mesures ne sont pas propres à des solutions techniques données (voir tableau 18). Les mesures qui suivent sont mentionnées dans l'ordre où il convient de les mettre en œuvre dans un pays dépourvu ou presque d'infrastructure en matière de gestion des déchets (les pays et régions plus avancés débiteront à une étape ultérieure) :

- Politiques de renforcement du cadre institutionnel et d'assistance technique
- Accords volontaires
- Dispositions réglementaires
- Programmes axés sur la marché

8.3.1 Politiques de renforcement du cadre institutionnel et d'assistance technique

L'existence d'une infrastructure adéquate en matière de gestion des déchets, et notamment d'un cadre juridique, est une condition préalable de toute mesure de réduction des émissions de méthane. Lorsque cette infrastructure n'existe pas ou s'avère insuffisante, il est indispensable de la renforcer soit au sein d'un même pays – en procédant à des transferts des zones développées aux zones qui le sont moins –, soit au plan international par le biais d'une aide multilatérale ou bilatérale. Par exemple, la Banque interaméricaine de développement donne la priorité au renforcement de l'infrastructure de gestion des déchets dans ses programmes d'aide au développement.

L'appui accordé au renforcement du cadre institutionnel peut comprendre une aide financière et technique. Il en va ainsi pour le Programme américain d'études par pays, les initiatives de mise en œuvre conjointe²² et le Fonds pour l'environnement mondial (FEM).

8.3.2 Accords volontaires

Il est possible de recourir à des accords volontaires pour surmonter les obstacles qui freinent la mise en œuvre des projets de gestion des déchets. Aux Etats-Unis d'Amérique, un programme de mobilisation de l'opinion au sujet des décharges incite les organismes publics (qui autorisent les projets) et les services de distribution (qui souvent achètent l'énergie produite au moyen des gaz d'enfouissement) à promouvoir délibérément les projets ayant trait aux décharges et à y participer. Ce type de programme, souvent peu coûteux et relativement souple, permet de définir les principaux obstacles et d'obtenir les informations et l'aide nécessaires pour les surmonter. Le programme américain, par exemple, fournit un grand nombre d'outils – et notamment une description détaillée des sites propices à la mise en œuvre des projets – ainsi que divers logiciels permettant d'évaluer le potentiel économique et technique.

8.3.3 Dispositions réglementaires

Une disposition réglementaire visant à réduire la quantité de déchets solides par le biais du recyclage consiste à imposer le tri à la source, par exemple en séparant les papiers, le verre, les métaux, les matières plastiques, etc. La réglementation peut aussi consister à établir des normes pour l'utilisation du papier recyclé ou pour la composition des matériaux recyclés. Aux Etats-Unis d'Amérique, par exemple, bon nombre d'Etats se fixent des objectifs en matière de recyclage, souvent précisés dans des programmes impératifs. S'agissant des décharges brutes et contrôlées déjà en exploitation, les mesures réglementaires vont de l'obligation de récupérer et de faire brûler le méthane à des actions visant à clarifier les règlements en vigueur et à s'assurer qu'ils vont bien dans le sens d'une récupération du méthane. Les Etats-Unis d'Amérique ont récemment adopté une réglementation impérative imposant la récupération et la combustion du méthane dans les grandes décharges contrôlées, ce qui permettra de réduire les émissions de méthane de près de 60 % par an (soit environ 6 millions de tonnes de méthane en l'an 2000) (SAR II, 22.4.4.2).

8.3.4 Programmes axés sur le marché

Une fois que l'on dispose d'une infrastructure adéquate et que les aspects techniques ont été pris en compte, des programmes fondés sur les lois du marché peuvent contribuer à atténuer la crainte de risques éventuels ou à limiter les dépenses d'investissement payables d'avance. Les mesures prises au plan national peuvent consister à consentir des crédits d'impôt ou à accorder un financement à bas prix. Aux Etats-Unis d'Amérique, par exemple, les projets de récupération de l'énergie produite par les gaz d'enfouissement bénéficient d'un crédit d'impôt pour "gaz inhabituel" équivalant approximativement à 1 cent

par kilowattheure produit. Un soutien financier international peut aussi être obtenu par le biais de mécanismes tels que le FEM ou d'autres fonds analogues. Le FEM finance actuellement au Pakistan un projet de production d'énergie à partir de gaz d'enfouissement qui devrait permettre de faire la preuve des possibilités qu'offre cette technique aux fins de réduction des émissions de méthane dans la région.

8.4 Comparaison des différentes mesures et politiques

La plupart des solutions techniques permettant de réduire les émissions de méthane sont indépendantes les unes des autres, sans toutefois s'exclure l'une l'autre. C'est ainsi que l'on peut procéder simultanément au recyclage de certains déchets solides et au compostage de certains autres. Les déchets restants peuvent être incinérés ou placés dans des décharges contrôlées où l'élimination par épandage est bon marché. Le méthane émis par les décharges peut servir à produire de l'énergie si les circonstances le permettent; on peut aussi le brûler si les frais de récupération sont trop élevés pour que ce gaz puisse concurrencer les autres sources d'énergie. Globalement, il est économiquement possible de réduire de 30 à 50 % les émissions de méthane (SAR II, 22.4.4.2; SAR III, 9.4.1). Si l'on se fonde sur les estimations des émissions indiquées dans les scénarios IS92, cela correspondrait à des réductions pouvant atteindre quelque 55 à 140 millions de tonnes d'équivalent carbone en 2010, 85 à 170 millions de tonnes en 2020 et 110 à 230 millions de tonnes en 2050.

Pour éliminer le méthane rejeté par les eaux usées, il faut choisir entre le traitement classique en milieu aérobie et les procédés anaérobies récemment améliorés. Ces derniers sont apparemment plus avantageux eu égard aux coûts (dépenses d'investissement et coûts d'exploitation).

Les effets connexes des diverses techniques de réduction des émissions de méthane sur l'environnement sont généralement positives. En fait, la réduction des émissions de méthane peut être une conséquence secondaire de procédés visant à lutter contre la pollution atmosphérique et la pollution des eaux et à améliorer l'hygiène. Compte tenu des problèmes que pose la quantification de ces avantages économiques primaires, il peut s'avérer difficile d'estimer le rapport coût-efficacité de la réduction des émissions de méthane. Pour ce qui est des déchets solides, le recyclage devrait occasionner des frais peu importants, le compostage, des frais de moyenne ampleur (par suite des coûts d'épandage) et l'incinération, des frais relativement élevés (en raison de l'importance des dépenses d'investissement et des frais d'exploitation). La récupération du méthane provenant des décharges contrôlées devrait entraîner des dépenses faibles à modérées. Quant aux eaux usées, leur traitement en milieu aérobie devrait se traduire par des coûts moyens à élevés et leur traitement en milieu anaérobie, par des coûts faibles à moyens.

²² Au chapitre 11 de la contribution du Groupe de travail III au Deuxième Rapport d'évaluation du GIEC, l'expression "mise en œuvre conjointe" recouvre "les activités mises en œuvre conjointement" et est ici encore employée dans ce sens.

En général, les conséquences macroéconomiques sont également favorables. Les flux de déchets constituent une source de matières premières pour la production de produits recyclés, de compost et d'énergie, ce qui contribue à stimuler l'activité économique et à créer des emplois tout en offrant des avantages en matière de santé et de lutte contre la pollution atmosphérique; ces facteurs peuvent d'ailleurs se révéler déterminants pour le développement des pays à faible revenu. L'acquisition des connaissances que nécessitent certaines techniques peut occasionner des coûts en devises pour les pays ne figurant pas à l'Annexe I. En conséquence, l'assistance technique est une mesure importante pour ce qui a trait au développement et à la protection de l'environnement dans les pays à faible revenu non cités à l'Annexe I.

En matière d'équité, les perspectives sont, en général, également favorables, tant au sein des pays et entre eux qu'entre les générations. Les plus pauvres pâtissent plus des conséquences d'une gestion inadéquate des déchets et tirent aussi davantage profit des emplois créés. Les générations futures tireront également parti de la situation dans la mesure où l'actuel flux de

déchets est considéré comme une ressource susceptible de réduire la consommation de matières premières.

Au même titre que les solutions techniques, les différentes mesures possibles ne s'excluent pas mutuellement. Les choix impliqués sont fonction des circonstances au sein d'une région ou d'un pays donné. Le renforcement du cadre institutionnel et l'assistance technique peuvent constituer des points de départ pour les pays ne figurant pas à l'Annexe I, alors que des initiatives de nature volontaire et réglementaire peuvent s'avérer plus appropriées dans les pays qui y figurent. Dans les pays disposant d'infrastructures bien développées en matière de gestion des déchets, on pourrait s'attendre que des mesures réglementaires se heurtent à l'opposition des secteurs industriels concernés; toutefois, l'expérience acquise aux Etats-Unis d'Amérique indique que l'on peut venir à bout de cette opposition. Alors que les mesures réglementaires sont probablement les plus difficiles à mettre en œuvre dans la plupart des pays, le succès des programmes fondés sur les lois du marché dépendra à la fois de la priorité accordée à la gestion des déchets à l'échelon national et des sources de financement disponibles au plan international.

9. INSTRUMENTS ÉCONOMIQUES²³

9.1 Introduction

Dans le présent chapitre sont décrites les mesures permettant de maîtriser les émissions de gaz à effet de serre dues à plus d'un secteur. Au nombre de ces mesures figurent l'octroi de subventions, l'application de taxes ainsi que de contingents et de permis d'émission négociables et la mise en œuvre conjointe²⁴.

Les politiques relatives aux changements climatiques doivent être considérées dans les contextes économiques actuels. Dans la réalité, l'évolution du climat n'est qu'un facteur externe parmi d'autres; la concurrence est souvent faussée, les informations et les marchés sont incomplets et les effets de distorsion associés aux taxes et aux transferts sont monnaie courante. Ces remarques ont leur importance, car beaucoup d'analyses des politiques relatives aux changements climatiques partent du principe que ces derniers sont le seul facteur externe susceptible d'engendrer des distorsions et avancent donc des conclusions souvent trompeuses ou erronées (SAR III, 11.3).

Le présent chapitre traite en premier lieu des instruments économiques qui peuvent être mis en place au plan national et qui sont appropriés lorsqu'un pays prend des mesures unilatérales en vue de réduire ses émissions de gaz à effet de serre ou bien conclut à cet effet un accord international avec d'autres pays. Parmi ces instruments figurent les subventions, les taxes et les permis d'émission négociables. Sont ensuite abordés les instruments économiques de portée internationale : conventions fiscales internationales, contingents d'émission négociables et mise en œuvre conjointe.²⁵

9.2 Instruments économiques applicables au plan national

9.2.1 Subventions et suppression de subventions

Il existe de nombreux moyens d'accorder un appui financier à une activité. Un gouvernement peut allouer des crédits à une entreprise, consentir un régime fiscal préférentiel, fournir des produits de base à des prix inférieurs à ceux du marché ou limiter la concurrence afin d'apporter son concours à une activité particulière. Bon nombre de pays accordent actuellement une aide financière à des activités donnant lieu à des émissions de gaz à effet de serre, notamment par le biais de subventions qui réduisent le prix des combustibles fossiles. La suppression des subventions permanentes qui incitent à utiliser ces combustibles restreindrait les émissions de gaz à effet de serre et, à longue échéance, augmenterait les revenus réels.

Par ailleurs, on peut subventionner à titre temporaire des activités particulières visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre. Ces subventions peuvent servir à encourager l'adoption de techniques de réduction des émissions, à créer des puits supplémentaires ou à favoriser la mise au point de techniques améliorées d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre.

La suppression de subventions modifie les revenus des groupes concernés. Il peut s'avérer nécessaire d'envisager une indemnisation des groupes dont les revenus risquent de pâtir de cette situation. Dans le cas de crédits subventionnés, l'effet net dépend de la façon dont les revenus sont redistribués. Toutefois, le financement de ces subventions au moyen d'une hausse de taxes génératrices de distorsions a pour effet d'accroître le coût de cette option (SAR III, 11.3.1.1).

9.2.2 Taxes intérieures²⁶ (SAR III, 11.5.1)

Dans un système de taxes sur les émissions, les sources qui rejettent des gaz à effet de serre doivent acquitter une taxe par unité d'émission.²⁷ Pour réduire au minimum le coût d'atténuation d'un type d'émissions donné, toutes les émissions doivent être taxées au même taux par unité de contribution au changement climatique. On adoptera une démarche empirique échelonnée sur plusieurs années pour déterminer le taux d'imposition permettant d'atteindre un objectif particulier en matière d'émission.

On propose en général de remplacer toute taxe éventuelle sur les émissions de CO₂ liées à l'utilisation de combustibles fossiles par une taxe sur la teneur en carbone de ces combustibles – une taxe sur le carbone – qui a un effet analogue et est beaucoup plus simple à gérer. En effet, une taxe sur les émissions de CO₂ suppose que chaque utilisateur de combustibles fossiles surveille ses émissions et acquitte les taxes correspondantes. Une taxe sur le carbone porte sur les mêmes émissions, mais ne concerne que les producteurs ou les distributeurs de combustibles, dont la plupart sont déjà mis à contribution pour le recouvrement d'autres taxes sur les produits énergétiques. En pratique, les taxes sur les produits énergétiques actuellement appliquées compliquent la mise en place d'une taxe sur le carbone qui modifie les prix en proportion des émissions de CO₂.

²³ Le présent chapitre est fondé sur le chapitre 11 de la contribution du Groupe de travail III au Deuxième Rapport d'évaluation du GIEC, intitulé *An Economic Assessment of Policy Instruments for Combating Climate Change* (principaux auteurs : B.S. Fisher, S. Barrett, P. Bohm, M. Kuroda, J.K.E. Mubazi, A. Shah et R.N. Stavins).

²⁴ L'expression "contingents négociables" sert à décrire les autorisations d'émission négociées à l'échelon international, alors que les "permis négociables" se rapportent aux autorisations négociées au plan national. Au chapitre 11 de la contribution du Groupe de travail III au Deuxième Rapport d'évaluation du GIEC, l'expression "mise en œuvre conjointe" recouvre les "activités mises en œuvre conjointement" et est ici encore employée dans ce sens.

²⁵ Le transfert de technologie, qui fait l'objet d'un rapport spécial, n'est pas abordé ici.

²⁶ Dans la plupart des systèmes économiques, les taxes sont répercutées, au moins en partie, sur les consommateurs ou les fournisseurs de capitaux, de main-d'œuvre et d'autres moyens de production d'une façon imprévisible.

²⁷ DA proprement parler, l'expression "redevance d'émission" ou "droit d'émission" serait plus adéquate, puisqu'il s'agit d'acquitter un droit d'émettre; on a cependant conservé l'expression "taxe d'émission", plus largement employée.

Une taxe sur le carbone est un moyen de réduction des émissions de CO₂ d'origine énergétique plus efficace que les taxes prélevées sur d'autres bases telles que l'énergie interne des combustibles ou la valeur des produits énergétiques (taxe sur l'énergie *ad valorem*). D'après les simulations effectuées aux États-Unis d'Amérique, pour une réduction équivalente des émissions, une taxe sur les produits énergétiques coûterait 20 à 40 % de plus qu'une taxe sur le carbone, et une taxe *ad valorem* serait 2 à 3 fois plus coûteuse. Cela s'explique par le fait qu'une taxe sur les produits énergétiques entraîne une augmentation du prix de toutes les formes d'énergie, qu'elles donnent ou non lieu à des émissions de CO₂, alors qu'une taxe sur le carbone modifie les coûts relatifs et incite par conséquent à changer de combustible.

D'après les analystes, les mesures visant à faire face au changement climatique devraient prendre en compte l'ensemble des gaz à effet de serre (et notamment leur capacité de rétention de la chaleur et leur durée de vie dans l'atmosphère) ainsi que les puits de carbone. Une taxe sur la teneur en carbone des combustibles fossiles (ou une taxe sur les émissions de CO₂ liées à l'utilisation de ces combustibles) pourrait, par conséquent, être complétée par des taxes sur les émissions provenant de sources non énergétiques de CO₂, des taxes sur les émissions d'autres GES et des dégrèvements fiscaux ou des subventions pour le carbone fixé. Les problèmes administratifs et les difficultés que suscite la surveillance des émissions (de la fixation) associées à ces diverses sources peuvent faire obstacle à l'application de taxes (de dégrèvements fiscaux ou de subventions) dans une partie ou dans la totalité des cas.

9.2.3 Permis d'émission négociables²⁸ (SAR III, 11.5.2)

Tout pays résolu à limiter ses émissions de GES peut y parvenir en ayant recours à des permis négociables concernant les émissions de CO₂ d'origine énergétique, les sources non énergétiques de CO₂, les émissions d'autres GES et la fixation du carbone. Les émissions de CO₂ d'origine énergétique peuvent être maîtrisées au moyen d'un système de permis négociables concernant la teneur en carbone des combustibles fossiles consommés. En ce cas, les sources d'émission réglementées reçoivent (ou doivent acheter) des permis concernant la teneur en carbone de ces combustibles. Les permis négociables peuvent aussi porter sur les émissions effectives de CO₂ d'origine énergétique.²⁹ Les participants sont libres de vendre les permis en surplus ou d'acheter des permis pour se mettre en règle au plan réglementaire. En aval du système de permis, l'incidence est comparable à celle d'une taxe sur le carbone.

En principe, les systèmes de permis négociables peuvent aussi s'appliquer aux émissions de CO₂ d'origine non énergétique, aux émissions d'autres GES et à la fixation du carbone. Les permis acquis pour la fixation du carbone peuvent être vendus à des sources qui ont besoin de permis pour leurs émissions. Les difficultés que suscite la surveillance des émissions (de la fixation) peuvent faire obstacle à l'application de permis négociables dans une partie ou dans la totalité des cas. Des considérations telles que le nombre de participants, la fraction des émissions totales couvertes, la structure industrielle et le mode de coerci-

tion employé influenceront sur le choix du système d'échange de droits d'émission le plus approprié.

Quel que soit le système retenu, un certain nombre de facteurs peuvent avoir un effet préjudiciable sur l'efficacité des systèmes d'échange de droits d'émission, et notamment le fait qu'un petit nombre de participants soient en mesure d'influer sur le marché des permis ou qu'un petit nombre d'entreprises puissent influencer sur le marché des produits, les frais de transaction, la tendance à privilégier les moyens d'action sans but lucratif, la réglementation déjà en vigueur ainsi que l'ampleur des mesures de contrôle et de coercition nécessaires. Certains de ces facteurs peuvent aussi rendre moins efficaces d'autres politiques et mesures.

Pour distribuer des permis aux sources d'émission participantes, les pouvoirs publics ont essentiellement deux moyens à leur disposition. Ils peuvent attribuer à ces sources des permis gratuitement en se fondant sur des règles d'attribution reconnues (par exemple l'ampleur des émissions pendant une période antérieure donnée), ou encore vendre ces permis aux enchères (on notera que cette dernière méthode n'a encore jamais été employée). Il est aussi possible de combiner les deux méthodes.

Ces méthodes diffèrent essentiellement par deux aspects. Premièrement, l'attribution gratuite de permis profite aux sources réglementées, alors que la vente de permis aux enchères profite aux pouvoirs publics. Deuxièmement, l'attribution gratuite de permis peut accroître la prospérité des sources existantes, freiner de ce fait la mise en exploitation de nouvelles entreprises et ralentir les progrès techniques, bien qu'il existe certains mécanismes susceptibles de limiter ces effets éventuels.

L'attribution de permis susceptibles d'être mis en réserve en vue d'un usage ultérieur contribue à renforcer l'efficacité et l'acceptabilité politique des systèmes de permis négociables. Sans mise en réserve possible, les sources astreintes à acquérir des permis devraient faire face à davantage d'incertitude quant au prix de ces permis à l'échéance. La mise en réserve facilite également la correction à la baisse des maximums d'émission. Aussi bien les taxes que les permis négociables ont tendance à égaliser le coût marginal des mesures de réduction des émissions pour l'ensemble des sources concernées. Toutefois, les taxes sont établies par les pouvoirs publics et le niveau des émissions est déterminé par les réactions des sources imposées, alors que dans le cas des systèmes de permis négociables, c'est

²⁸ Au plan conceptuel, un permis peut être défini soit comme un droit de procéder à des émissions répétées (par exemple l'émission de 1 tonne de carbone par an pendant un temps indéfini), soit comme un droit d'émettre une seule fois une quantité donnée (par exemple l'émission de 1 tonne de carbone).

²⁹ Comme dans le cas d'une taxe sur le carbone, il n'est pas possible, au plan pratique, de prendre en considération les sources mobiles et autres petites sources d'émission dans un système d'échange de droits d'émission fondé sur les émissions réelles. Un système d'échange (ou à une taxe) fondé sur la teneur en carbone des combustibles fossiles intègre automatiquement ces émissions.

le gouvernement qui définit le niveau global des émissions, le prix des permis étant déterminé par le marché.

9.2.4 *Recyclage des recettes publiques et substitution de taxes (SAR III, 11.3.2)*

Les permis vendus aux enchères ont les mêmes effets de répartition qu'une taxe sur le carbone, dans la mesure où les mêmes niveaux d'émission sont obtenus lorsque le produit des enchères et les recettes fiscales ne sont pas redistribués respectivement à ceux qui ont acquis les permis ou payé la taxe. A l'autre extrême, les permis accordés gratuitement ont les mêmes incidences au plan de la répartition qu'une taxe sur le carbone si les recettes fiscales sont redistribuées selon la même règle que celle qui régit l'attribution des permis. Il se peut cependant que les parties concernées autres que les sources réglementées pâtissent des mesures visant à limiter les émissions de GES et qu'il faille les indemniser. On peut alors utiliser les recettes provenant de la taxe sur le carbone ou de la vente des permis à cet effet.

L'incidence d'une taxe sur le carbone – ou d'un système équivalent de permis négociables – sur l'économie dépendra en partie de l'usage qui sera fait des éventuelles recettes publiques nettes. On s'accorde à penser que ces recettes peuvent servir à réduire les taxes préexistantes donnant lieu à des distorsions et, donc, à abaisser de façon notable les coûts de réduction des émissions. Certains chercheurs ont estimé qu'on pouvait augmenter le revenu national en utilisant les recettes publiques pour remplacer ou alléger certaines taxes en vigueur engendrant des distorsions particulièrement marquées. Toutefois, d'autres soutiennent qu'il s'agit là d'un argument qui plaide davantage en faveur d'une réforme générale du régime fiscal que pour l'introduction d'une taxe sur le carbone (ou d'un système analogue de permis négociables) en soi.

9.3 **Instruments économiques applicables au plan international**

Pour atteindre aux moindres frais les objectifs fixés au plan mondial en matière d'émissions, il faut pouvoir compter sur une coopération internationale active. Si des instruments économiques tels que l'application de taxes internationales et de taxes intérieures harmonisées, l'introduction de contingents négociables et la mise en œuvre conjointe peuvent faciliter la tâche à cet égard, ils nécessitent néanmoins – ou se trouveront renforcés par – une véritable coopération internationale.

9.3.1 *Taxes internationales et taxes intérieures harmonisées (SAR III, 11.5.3)*

A l'échelon international, il existe deux façons de mettre en application une taxe sur les émissions de GES. Les pays peuvent convenir de créer un organisme international qui imposerait une telle taxe aux pays participants. Ils peuvent aussi décider que chacun d'eux prélèvera des taxes sur les émissions de GES comparables au plan national. Tout accord conclu en vue de la création d'un organisme international chargé de l'application d'une taxe sur les émissions de GES doit spécifier à la fois le

(ou les) taux d'imposition et le mode de répartition des recettes que procure cette taxe.³⁰

Un système de taxes harmonisées suppose que chaque pays applique le même taux d'imposition. Compte tenu de la disparité des ressources disponibles, des habitudes de consommation, des effets du changement climatique et d'autres facteurs, il peut advenir que ce taux d'imposition se révèle assez inadapté d'un point de vue national et qu'il faille envisager des paiements compensatoires pour s'assurer d'une large participation au système. Dans le cas d'un système de taxes harmonisées, la redistribution des recettes fiscales pourrait impliquer des paiements forfaitaires, alors que l'accord pourrait indiquer quelles parts des recettes fiscales internationales iront aux divers pays participants dans le cas d'un système de taxes internationales. En principe, la négociation de transferts internationaux devrait permettre d'aboutir à la même répartition internationale des taxes dans l'un et l'autre cas. L'application d'une taxe sur les émissions de GES imposée par un organisme international empiètera sur la souveraineté nationale et sera par conséquent difficile à négocier.

Bien qu'il soit nécessaire d'appliquer un taux d'imposition uniforme dans tous les pays pour cause d'efficacité par rapport au coût, cela peut s'avérer extrêmement complexe vu la disparité des régimes fiscaux dont sont dotés les pays participants en matière énergétique.

9.3.2 *Contingents négociables³¹ (SAR III, 11.5.4)*

Les pays peuvent négocier des limites nationales de leurs émissions de GES – sous la forme d'objectifs ou de contingents volontaires ou ayant force obligatoire – à atteindre dans des délais précis. Ces limites peuvent concerner un seul gaz, un groupe de gaz ou un équivalent CO₂ global. Une démarche englobante assure davantage de souplesse et permet de réduire plus largement les coûts.

Etant donné la disparité des coûts marginaux associés à la limitation des émissions selon les pays, la possibilité d'un échange international des contingents d'émission restreindrait les frais de mise en conformité avec les limites nationales en la matière, abstraction faite de l'attribution initiale. Chaque pays devrait alors réduire ses émissions ou acheter des contingents à d'autres pays, de sorte que la somme des deux n'excède pas sa limite nationale d'émission.

³⁰ Toutes les émissions de GES (corrigées de façon à tenir compte de la capacité de rétention de la chaleur et de la durée de vie dans l'atmosphère de ces gaz) devraient être taxées (et la fixation du carbone devrait être subventionnée) au même taux dans tous les pays. Comme nous l'avons indiqué précédemment, l'application d'une taxe (d'un dégrèvement fiscal) qui couvre la totalité des sources d'émission (des puits) peut s'avérer irréalisable.

³¹ Le fait de définir le contingent comme le droit d'émettre une quantité donnée en une fois atténue le risque qu'un gouvernement en exercice vende des droits d'émission ultérieure qui ne puissent être honorés par les gouvernements suivants. Cette définition contribue en outre à empêcher les grands pays d'introduire des distorsions dans le marché des contingents.

Il est possible d'avoir recours à des attributions nationales de contingents afin de régler les questions de répartition et d'inciter les pays à adhérer à l'accord. La plupart des propositions d'attribution de contingents d'émission par pays envisagent des réductions proportionnellement plus importantes des émissions des pays industrialisés et un ralentissement de l'accroissement des taux d'émission des pays en développement. En conséquence, les négociations internationales menées à ce sujet devront aboutir à l'attribution de contingents qui ne pénalisent pas les pays à économie de transition figurant à l'Annexe I et les pays n'y figurant pas et qui assurent une répartition équitable de la charge entre les pays figurant à cette annexe.

Pour pouvoir mettre en place un système international de contingents négociables, il faut disposer au préalable d'un ou de plusieurs marchés où l'on puisse échanger les contingents. Pour qu'un plan d'échange de droits d'émission puisse contribuer efficacement à la limitation des rejets, il faut impérativement qu'il y ait de bonnes chances que ceux qui procèdent à des émissions non autorisées soient détectés et pénalisés. Cela ne suffit cependant pas à distinguer un système de contingents négociables de tout autre accord international sur les réductions d'émissions.

Dans un système de contingents négociables au plan international, les pays participants peuvent avoir recours aux politiques intérieures qu'ils préfèrent pour atteindre l'objectif fixé. Un pays peut, par exemple, employer des permis négociables, une taxe intérieure ou une réglementation. Lorsqu'il existe déjà un système national de permis négociables, le gouvernement peut permettre aux détenteurs de ces permis de les échanger directement sur le marché international. S'il existe une taxe intérieure sur le carbone, le taux d'imposition efficace pour la période à venir correspondra au prix (inconnu) des contingents pour cette période.

Si l'on a une certaine expérience de l'application de systèmes de permis négociables au plan national, ces systèmes n'ont été jusqu'ici mis en œuvre que sur une petite échelle au plan international (on peut par exemple mentionner le système d'échange international de contingents de production de CFC ainsi que le système d'échange de contingents de consommation de CFC en vigueur au sein de l'Union européenne).

En cas d'application de taxes internationales, le taux d'imposition est connu, mais l'effet de ce système sur les émissions est incertain; en outre, on peut ignorer ou non le montant des paiements de transfert internationaux selon la façon dont ils sont définis dans l'accord. Si un système de contingents négociables a une incidence connue sur les émissions (à l'exception des effets du transfert d'émissions de carbone), le prix de ces contingents et les effets de leur échange en matière de répartition demeurent incertains, de sorte qu'il peut s'avérer nécessaire d'assurer une certaine protection contre les évolutions défavorables de ce prix.³² On en déduit que le fait de connaître les incidences des systèmes de contingents négociables sur les émissions est un avantage qui s'obtient au prix d'une certaine incertitude concernant la répartition.

9.3.3 Mise en œuvre conjointe (SAR III, 11.5.5)

La mise en œuvre conjointe, prévue à l'article 4.2 a) de la Convention-cadre sur les changements climatiques, suppose que des pays coopèrent en vue d'atteindre les objectifs définis par cette convention. Un pays (ou une entreprise de ce pays) finance l'application, dans un autre pays, de mesures aboutissant à une réduction des émissions qui vient s'ajouter aux réductions qui interviendraient normalement. A la suite de la réunion de Berlin (COP 1, mars-avril 1995), un certain nombre de pays ont mis en train des projets pilotes de mise en œuvre conjointe.

Les avantages et les inconvénients que les projets de mise en œuvre conjointe peuvent présenter au plan économique ont fait l'objet de nombreux débats. La mise en œuvre conjointe peut jouer essentiellement trois rôles : ce peut être a) un moyen efficace par rapport au coût, pour les pays développés, de financer des projets de réduction des émissions de GES dans d'autres pays tout en répondant aux besoins locaux en matière de développement; b) la première étape vers l'instauration d'un système international de contingents négociables impliquant les différents pays qui se sont fermement engagés à limiter leurs émissions de GES; et c) un moyen de déterminer s'il est efficace en termes de coût d'introduire de nouvelles sources d'émission ou de nouveaux puits dans le système mondial actuel de gestion des GES.

La mise en œuvre conjointe présente indubitablement un avantage déterminant : aussi bien les pays acheteurs que les pays vendeurs tirent profit de l'échange. Toutefois, et notamment dans le cas a), le processus de contrôle et les coûts de transaction élevés peuvent poser des problèmes. De plus, en vertu des accords internationaux actuellement en vigueur, ceux qui investissent dans les projets de mise en œuvre conjointe ne peuvent pas imputer les réductions d'émissions résultant de ces projets sur les engagements pris au plan national.

9.3.4 Politiques visant à réduire le "resquillage" et le transfert d'émissions

Une politique appliquée unilatéralement par un seul pays ou par un groupe de pays peut-elle contribuer efficacement à réduire les émissions de GES à l'échelle du globe? La réponse dépend de la façon dont les autres pays réagissent aux mesures adoptées par les pays coopérants, et au nombre de ces réactions figurent deux phénomènes : le transfert d'émissions et le "resquillage". Il y a "resquillage" lorsque des pays qui tirent profit d'une réduction mondiale des émissions ne participent pas aux frais que cette politique entraîne, et transfert d'émissions lorsque les mesures de réduction prises par les pays coopérants provoquent une augmentation des émissions dans d'autres pays.

³² Si un nombre limité seulement de pays participent, le transfert d'émissions de carbone doit être pris en compte, aussi bien dans le cas des systèmes de taxes que dans celui des systèmes de contingents négociables.

Tableau 19 : Exemples choisis d'instruments économiques destinés à atténuer les émissions de GES.

Mesures	Incidences sur le climat et autres effets sur l'environnement	Conséquences économiques et sociales	Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique
Suppression de subventions	<ul style="list-style-type: none"> – Sont fonction de l'importance des subventions effectivement accordées et de l'ampleur de leur réduction 	<ul style="list-style-type: none"> – Donne lieu à une augmentation des revenus réels à longue échéance – Modifie la répartition du revenu; l'effet dépend de la façon dont les revenus sont redistribués 	
Taxes intérieures	<ul style="list-style-type: none"> – Peuvent être établies dans le but d'atteindre un objectif précis en matière d'émissions au plan national ou international 	<ul style="list-style-type: none"> – Facilitent l'application des mesures d'atténuation les plus efficaces par rapport au coût – Taux d'imposition déterminé empiriquement – La taxe sur le carbone est régressive, mais l'effet dépend de la façon dont les recettes fiscales qu'elle procure sont recyclées 	<ul style="list-style-type: none"> – Peuvent être reliées aux systèmes de collecte des taxes sur l'énergie déjà en vigueur
Permis négociables	<ul style="list-style-type: none"> – Peuvent être établis dans le but d'atteindre un objectif précis en matière d'émissions au plan national ou international 	<ul style="list-style-type: none"> – Facilitent l'application des mesures d'atténuation les plus efficaces par rapport au coût – Le prix du marché relatif aux permis et le coût des mesures appliquées sont mal connus – Les effets de répartition dépendent de la façon dont les permis sont attribués et dont les recettes tirées de la vente des permis sont utilisées 	<ul style="list-style-type: none"> – Nécessitent un marché des permis concurrentiel – Les frais d'administration sont fonction de la conception du système – Les contrats ultérieurs portant sur les permis peuvent étaler les risques de fluctuation des prix
Taxes harmonisées	<ul style="list-style-type: none"> – Peuvent être établies dans le but d'atteindre un objectif précis en matière d'émissions au plan national ou international 	<ul style="list-style-type: none"> – Facilitent l'application des mesures d'atténuation les plus efficaces par rapport au coût – Taux d'imposition déterminé empiriquement – L'équité entre pays dépend des paiements de transfert négociés 	<ul style="list-style-type: none"> – Peu de renseignements disponibles sur la mise en application de ces taxes – Des politiques intérieures peuvent limiter l'efficacité de ces taxes
Contingents négociables	<ul style="list-style-type: none"> – Peuvent être établis dans le but d'atteindre un objectif précis en matière d'émissions au plan national ou international 	<ul style="list-style-type: none"> – Facilitent l'application des mesures d'atténuation les plus efficaces par rapport au coût – Le prix du marché relatif aux contingents et le coût des mesures appliquées sont mal connus – L'équité entre pays dépend des attributions de contingents 	<ul style="list-style-type: none"> – Nécessitent un marché concurrentiel des contingents – Peu de renseignements disponibles sur la mise en application de ces contingents – Autorisent une certaine souplesse pour le choix des politiques intérieures
Mise en œuvre conjointe	<ul style="list-style-type: none"> – Peut contribuer à réduire les émissions par rapport aux niveaux qui seraient autrement atteints 	<ul style="list-style-type: none"> – Contribue à transférer des ressources et des techniques aux pays hôtes 	<ul style="list-style-type: none"> – Les frais d'administration peuvent être relativement importants – Les projets peuvent être mis en train rapidement

9.3.4.1 Politiques visant à réduire le "resquillage"

Tant que la participation aux politiques internationales de gestion des gaz à effet de serre s'effectuera sur une base volontaire, certains pays auront tendance à "resquiller". Aucun des modèles empiriques existants n'a été utilisé pour évaluer l'ampleur de ce "resquillage" potentiel; on a toutefois cherché à en apprendre plus long sur les avantages que procurerait une coopération pleine et entière.

La stabilité du groupe de pays décidés à coopérer pour réduire les émissions de GES dépendra de leur aptitude à sanctionner les pays qui se désistent et à récompenser les pays qui se joignent au groupe. Pour être efficaces, ces sanctions et ces récompenses doivent être à la fois substantielles et crédibles. Au nombre des sanctions figure par exemple la menace d'interdire les échanges de combustibles et de produits à forte teneur en carbone avec les pays qui refusent de coopérer, une fois qu'un nombre minimum de pays auront accepté de participer (SAR III, 11.6.4.1).

9.3.4.2 Politiques visant à limiter le transfert d'émissions

Le transfert d'émissions est le résultat net d'un certain nombre d'incidences, dont certaines se neutralisent. En premier lieu, la mise en œuvre d'une politique de réduction des émissions de carbone par un pays ou un groupe de pays qui coopèrent peut entraîner un déplacement de la production de biens à forte teneur en carbone vers d'autres pays dont les émissions augmentent. Deuxièmement, les mesures d'atténuation freineront la demande mondiale de combustibles à forte teneur en carbone, ce qui aura pour effet de faire baisser le cours mondial de ces combustibles et, par conséquent, d'en faire progresser la consommation (et les émissions associées) dans les pays non participants. Troisièmement, les mesures d'atténuation peuvent avoir un effet négatif sur les revenus des pays coopérants et amener ainsi ces derniers à réduire leurs importations en provenance de pays qui peuvent, à leur tour, connaître une régression de leurs revenus et de leurs émissions. Quatrièmement, ces mesures peuvent aussi avoir une incidence sur les mouvements de capitaux et les taux de change, avec des répercussions imprévisibles sur les émissions.

Le transfert d'émissions se mesure sous forme de rapport entre émissions nettes de GES et réduction des émissions dans les pays coopérants; les estimations varient beaucoup (SAR III, 11.6.4.2).

Que peut-on faire pour restreindre le transfert d'émissions? D'après la théorie élémentaire des échanges – et en considérant les pays coopérants comme une seule entité et le reste du monde comme une autre entité –, il convient d'appliquer une taxe tarifaire aux importations de produits à haute teneur en carbone des pays coopérants ou de subventionner leurs importations, selon que ces pays sont des importateurs ou des exportateurs nets avant la mise en œuvre de mesures d'atténuation. Il est aussi possible de remplacer cette taxe tarifaire à l'importation (ou ces primes à l'exportation) par une subvention (ou une taxe) à la production et une taxe (ou une subvention) à la consommation.³³

L'application d'ajustements fiscaux à la frontière (taxe tarifaire à l'importation, prime à l'exportation, etc.), si elle contribue en théorie à réduire le transfert d'émissions, pose néanmoins un certain nombre de problèmes pratiques. Déterminer la nature des émissions associées à la fabrication d'un produit donné – et par conséquent l'ajustement fiscal à la frontière le plus approprié – constitue d'ordinaire une tâche très complexe, compte tenu de la disparité des techniques de dosage et de production des combustibles employées dans les diverses régions. De plus, les ajustements fiscaux à la frontière les plus appropriés peuvent s'avérer incompatibles avec les règles qui régissent actuellement les échanges multilatéraux. En outre, vu la disparité des différents régimes fiscaux nationaux, l'application de subventions et de taxes à la production et à la consommation adéquates dans l'ensemble des pays coopérants devrait se révéler pratiquement irréalisable (SAR III, 11.6.4.3).

9.4 Évaluation des instruments économiques

La présente section est consacrée à l'évaluation des instruments économiques selon les critères évoqués dans l'introduction

(voir tableau 19). Cette évaluation porte principalement sur les taxes et les permis ou contingents négociables appliqués à l'échelon national et international. Il importe en premier lieu de considérer que chaque pays est doté de structures institutionnelles et économiques ainsi que d'un cadre d'action particuliers et que le choix des mesures d'intervention s'opère dans un contexte politique bien défini. En conséquence, la capacité de mettre à exécution les diverses mesures retenues devrait varier notablement d'un pays à l'autre.

Deuxièmement, l'adoption d'instruments économiques internationaux aura une certaine incidence sur la répartition des richesses entre les pays, de même que l'adoption d'instruments économiques nationaux en aura une sur la répartition des richesses au sein même de ces pays. Tous ces instruments peuvent être – et seront probablement – associés à des mesures compensatoires (paiements compensatoires, attribution de permis ou de contingents particuliers, etc.); il n'existe aucune différence entre les instruments à cet égard.

9.4.1 Résultats ayant trait à l'environnement

On peut concevoir les systèmes de permis ou de contingents négociables de façon à respecter les objectifs fixés au plan national ou international pour ce qui est des émissions de GES. Pour atteindre un objectif donné en la matière au moyen d'une taxe sur les émissions ou sur le carbone, il est nécessaire de procéder à un ajustement empirique du taux d'imposition. Aussi bien les systèmes de taxes que les systèmes de permis ou de contingents négociables nécessitent des mesures de surveillance et d'exécution efficaces et donnent lieu à un transfert négligeable d'émissions de carbone si l'accord international ne concerne pas l'ensemble des pays du globe.

9.4.2 Conséquences économiques et sociales

En théorie, tant les systèmes de taxes que les systèmes de permis ou de contingents négociables favorisent la mise en œuvre des mesures de réduction des émissions les plus efficaces en termes de coût. Pour atteindre un objectif donné en matière d'émissions, le montant de la taxe et le prix du marché des permis ou contingents devraient être identiques, en supposant que ces deux sortes d'instruments sont appliqués aux mêmes sources, que les frais de transaction sont comparables et que les échanges ne sont pas l'objet de restrictions arbitraires.

Les permis négociables peuvent être attribués gratuitement ou vendus aux enchères. De la même manière, les recettes fiscales peuvent être redistribuées aux sources qui auraient autrement reçu des permis gratuitement ou peuvent rester à la disposition

³³ Les règles édictées par l'Organisation mondiale du commerce prévoient des ajustements fiscaux à la frontière lorsque les moyens de production taxés ou réglementés sont physiquement incorporés dans le produit final. Il n'est toutefois pas précisé si cette règle s'applique aux émissions de GES associées à la fabrication d'un produit ou si elle serait applicable en pratique pour mettre en œuvre un tel système d'ajustements fiscaux à la frontière.

des pouvoirs publics. La manière dont les recettes nettes tirées d'une taxe sur le carbone ou de la vente de permis d'émissions sont recyclées peut avoir une incidence considérable au plan macroéconomique.

On dispose d'une documentation abondante sur les effets de répartition des taxes sur le carbone, les émissions, l'essence et l'énergie dans les pays figurant à l'Annexe I. Ces taxes sont généralement considérées comme régressives du fait que les dépenses de consommation de combustibles fossiles, rapportées au revenu annuel effectif des particuliers, ont tendance à diminuer lorsque ce revenu augmente. Toutefois, des études récentes fondées sur des données américaines et européennes montrent que les taxes sur le carbone sont considérablement moins régressives lorsqu'on les rapporte au revenu viager ou aux dépenses de consommation annuelles plutôt qu'au revenu annuel.

Il existe très peu d'études touchant les effets de répartition des systèmes de permis négociables. Si les permis sont vendus, ces effets sont analogues à ceux d'une taxe équivalente. Si les permis sont attribués gratuitement, c'est l'attribution initiale qui détermine les effets de répartition.

L'équité entre pays est fonction des attributions de contingents dans le cas des systèmes de contingents négociables, de l'accord de partage des recettes négocié dans le cas d'une taxe internationale et des paiements de transfert négociés dans le cadre des systèmes de taxes intérieures harmonisées sur le carbone. Pour parvenir à un accord équitable sur les attributions de contingents ou le partage des recettes, il faut tenir compte du fait que les mesures d'atténuation prises par un pays donné ont des répercussions économiques sur d'autres pays.

9.4.3 *Considérations d'ordre administratif, institutionnel et politique (SAR III, 11.6.2; 11.6.3)*

Que l'on opte pour un système de taxes ou de permis négociables, les frais d'administration et les coûts de transaction afférents sont souvent fort variables. Une conception adéquate peut réduire considérablement ces coûts. Dans certains pays, il a été démontré qu'il était possible d'appliquer une taxe sur le carbone sans que cela impliquât des coûts excessifs en ayant largement recours aux systèmes de recouvrement de l'impôt déjà en vigueur; dans d'autres pays, il s'est avéré difficile, au plan politique, d'instaurer des taxes sur l'énergie. Les systèmes d'échange fondés sur des permis délivrés par les pouvoirs publics (comme, par exemple, le système américain d'échange de droits concernant les émissions de dioxyde de soufre) entraînent des coûts de transaction moindres que les systèmes fondés sur des crédits autodéfinis. Il semble que les permis offrent un avantage particulier du fait qu'ils jettent les bases d'un futur marché qui devrait contribuer à une répartition plus satisfaisante des risques liés à la modification des objectifs en matière d'émissions. Pour qu'un système de permis négociables puisse donner les résultats escomptés, il est indispensable que le marché des permis (et des produits) soit soumis à des conditions

de concurrence relative. Si une entreprise détient une part importante des permis délivrés, elle peut tenter d'agir sur le prix de ces permis afin d'améliorer sa position sur le marché des permis ou des produits (par exemple en retenant les permis et en obligeant les autres entreprises à freiner leur production ou encore en barrant la route à de nouveaux entrants). La vente aux enchères des permis par les pouvoirs publics et d'autres mécanismes similaires permettent de réduire ces risques. On dispose de très peu de renseignements sur les frais d'administration associés à la surveillance, à l'application et à la gestion des systèmes de taxes internationales, de taxes harmonisées au plan international ou de contingents négociables.

9.5 **Comparaison des systèmes de permis ou de contingents négociables et des systèmes de taxes (SAR III, 11.7.2; 11.7.3)**

Tant les taxes que les permis négociables imposent des frais aux entreprises et aux consommateurs. Les sources d'émission devront engager des dépenses pour limiter leurs émissions ou procéder à des décaissements pour acquérir des permis ou payer des taxes³⁴. Dans un cas comme dans l'autre, elles chercheront à réduire au minimum ces coûts en investissant dans de nouvelles installations et de nouveaux équipements.

Dans le cas d'une taxe sur les émissions de GES, si le taux d'imposition est connu, l'incidence des émissions est incertaine et l'on peut être au fait ou non des effets de répartition. Un système de permis négociables a une incidence connue sur les émissions, mais le prix des permis et les effets de répartition dus aux échanges sont très aléatoires. Un système de taxes intérieures harmonisées nécessite souvent un accord au sujet d'éventuels transferts financiers internationaux compensatoires ainsi que de possibles ajustements destinés à contrebalancer les écarts entre les divers régimes fiscaux déjà en place. Pour qu'un tel système soit efficace, il importe aussi que les participants ne soient pas autorisés à mettre en œuvre des politiques qui contribuent indirectement à accroître les émissions de GES.

Dans le cas d'un système de contingents négociables, chacun des participants peut décider de la politique intérieure qu'il souhaite appliquer. Si l'attribution initiale de contingents aux différents pays participants soulève des problèmes de répartition, les conséquences exactes ne peuvent être connues à l'avance, puisque le prix des contingents ne sera déterminé qu'après le début des échanges. On peut déterminer les répercussions d'un système de contingents négociables sur les émissions à l'échelle du globe, avec certitude en cas d'accord mondial et aux transferts d'émissions de carbone près dans le cas d'un accord concernant une partie seulement des pays de la planète.

³⁴ Sauf, bien entendu, dans le cas où une source aurait reçu assez de permis gratuits pour que cela couvre ses émissions. Même en ce cas, la source en question serait assujettie à un coût marginal implicite des émissions, puisque la réduction de ces émissions lui permettrait de vendre davantage de permis.

Appendice A

PROJECTIONS DE RÉFÉRENCE

Tableau A1 : Données mondiales – énergie primaire consommée^d et carbone émis^b selon les scénarios IS92, par élément du cycle des combustibles donnant lieu à une consommation de combustible primaire

SCÉNARIO	1990 ^c			2010			2020			2050				
	Energie utilisée	CO ₂ émis	tous scénarios	Energie utilisée	CO ₂ émis	a	c	e	Energie utilisée	CO ₂ émis	a	c	e	
Aspects liés à l'offre														
<i>Approvisionnement en énergie et industries de transformation</i>														
Production d'électricité	123	1,7	198	165	221	2,7	1,9	3,5	253	199	292	3,3	2,1	4,5
Production de combustibles de synthèse ^d	0	0,0	0	1	1	0,0	0,0	0,0	4	6	8	-0,2	-0,3	-0,3
<i>Consommation directe de combustibles par secteur</i>														
Bâtiment	62	1,2	83	68	93	1,5	1,2	1,7	94	74	109	1,7	1,4	2,0
Industrie ^e	91	1,8	123	102	137	2,4	2,0	2,7	146	114	171	2,8	2,2	3,3
Transport	68	1,3	95	77	112	1,8	1,4	2,1	114	87	140	2,1	1,6	2,6
TOTAL	344	6,0	499	412	564	8,4	6,5	9,9	610	480	720	9,8	7,0	12,1
Aspects liés à la demande														
Bâtiment	112	1,9	151	125	170	2,5	1,9	2,9	174	138	203	2,7	1,9	3,3
Industrie ^e	161	2,8	251	209	281	4,1	3,2	4,9	317	250	372	5,0	3,5	6,2
Transport	70	1,3	97	78	115	1,8	1,4	2,1	119	91	148	2,1	1,6	2,7
TOTAL	344	6,0	499	412	565	8,4	6,5	9,9	610	480	723	9,8	7,0	12,1
Par source														
Solides	100	2,5	142	113	164	3,6	2,9	4,2	179	127	221	4,5	3,2	5,6
Liquides	123	2,3	154	119	195	2,8	2,2	3,6	165	122	224	3,0	2,3	4,1
Gaz	79	1,2	129	100	141	1,9	1,5	2,1	150	101	160	2,2	1,5	2,4
Autres	42	0,0	74	81	65	0,0	0,0	0,0	117	129	117	0,0	0,0	0,0
TOTAL	344	6,0	499	412	565	8,4	6,5	9,9	610	480	723	9,8	7,0	12,1

^a Quantités d'énergie exprimées en exajoules (EJ),

^b Quantités de carbone exprimées en gigatonnes de carbone (Gt C),

^c Les données pour 1990 sont tirées des estimations fournies dans les scénarios IS92, Elles sont indiquées ici dans le but de faciliter le calcul des variations en pourcentage de la consommation d'énergie et des émissions futures et ne correspondent pas à la consommation d'énergie et aux émissions effectives, On trouvera les données effectives pour 1990 à la figure 1 et au tableau 9,

^d Les chiffres négatifs correspondent à la production de combustibles de synthèse à partir de la biomasse, La combustion des combustibles donne lieu à des émissions de CO₂ qui sont comptabilisées à la rubrique "consommation directe de combustibles par secteur" et doivent donc être soustraites à la rubrique "approvisionnement en énergie", puisque la biomasse est considérée comme une source d'émission zéro de carbone,

^e Pour les scénarios IS92, le secteur de l'industrie comprend les activités industrielles relatives à la fabrication, l'agriculture, les mines et la culture forestière.

Tableau A2 : Données mondiales – énergie utilisée^a et carbone émis^b par secteur d'utilisation finale selon les scénarios IS92, avec subdivision par élément du cycle des combustibles donnant lieu à la consommation de combustible primaire

Scénario	1990 ^c			2010			2020			2050											
	Energie utilisée tous scénarios	CO ₂ émis		Energie utilisée	CO ₂ émis		Energie utilisée	CO ₂ émis		Energie utilisée	CO ₂ émis										
Bâtiment																					
Production d'électricité	51	0,7		69	57	77	0,9	0,7	1,2	79	62	91	1,0	0,7	1,4	109	71	148	1,1	0,5	1,9
Production de combustibles de synthèse ^d	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	0,0	-0,1	-0,1	10	8	19	0	-0,1	0,1
Consommation directe de combustibles	62	1,2		83	68	93	1,5	1,2	1,7	94	74	109	1,7	1,4	2,0	143	86	177	2,6	1,6	3,3
Total	112	1,9		151	125	170	2,5	1,9	2,9	174	138	203	2,7	1,9	3,3	261	165	344	3,8	1,9	5,3
Industrie^e																					
Production d'électricité	70	1,0		128	107	143	1,7	1,3	2,2	171	134	197	2,2	1,4	3,1	256	168	348	2,6	1,1	4,4
Production de combustibles de synthèse ^d	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	0,0	-0,1	-0,1	10	8	19	0	-0,1	0,1
Consommation directe de combustibles	91	1,8		123	102	137	2,4	2,0	2,7	146	114	171	2,8	2,2	3,3	176	107	216	3,5	2,1	4,2
Total	161	2,8		251	209	281	4,1	3,2	4,9	317	250	372	5,0	3,5	6,2	442	283	583	6,1	3,1	8,8
Transportation																					
Production d'électricité	3	0,0		1	1	2	0,0	0,0	0,0	3	3	4	0,0	0,0	0,1	5	4	7	0,1	0,0	0,1
Production de combustibles de synthèse ^d	0	0,0	0	0	0	1	0,0	0,0	0,0	1	2	1	-0,1	-0,1	-0,1	48	18	63	-0,2	-0,5	-0,1
Consommation directe de combustibles	68	1,3		95	77	113	1,8	1,4	2,1	114	87	143	2,1	1,6	2,6	177	102	243	3,3	1,9	4,5
Total	70	1,3		97	78	115	1,8	1,4	2,1	119	91	148	2,1	1,6	2,7	231	124	313	3,2	1,4	4,5
Ensemble des secteurs d'utilisation finale																					
Production d'électricité	123	1,7		198	165	221	2,7	1,9	3,5	253	199	292	3,3	2,1	4,5	370	242	503	3,8	1,6	6,4
Production de combustibles de synthèse ^d	0	0,0	0	0	1	1	0,0	0,0	0,0	4	6	8	-0,2	-0,3	-0,3	68	35	101	-0,1	-0,8	0,2
Consommation directe de combustibles	221	4,2		301	246	343	5,7	4,6	6,4	354	275	423	6,7	5,2	7,9	496	295	637	9,3	5,6	12,0
Total	344	6,0		499	412	565	8,4	6,5	9,9	610	480	723	9,8	7,0	12,1	934	572	1240	13,1	6,4	18,6

^a Quantités d'énergie exprimées en exajoules (EJ),

^b Quantités de carbone exprimées en gigatonnes de carbone (Gt C),

^c Les données pour 1990 sont tirées des estimations fournies dans les scénarios IS92, Elles sont indiquées ici dans le but de faciliter le calcul des variations en pourcentage de la consommation d'énergie et des émissions futures et ne correspondent pas à la consommation d'énergie et aux émissions effectives, On trouvera les données effectives pour 1990 à la figure 1 et au tableau 9,

^d Les chiffres négatifs correspondent à la production de combustibles de synthèse à partir de la biomasse, La combustion des combustibles donne lieu à des émissions de CO₂ qui sont comptabilisées à la rubrique "consommation directe de combustibles par secteur" et doivent donc être soustraites à la rubrique "approvisionnement en énergie", puisque la biomasse est considérée comme une source d'émission zéro de carbone,

^e Pour les scénarios IS92, le secteur de l'industrie comprend les activités industrielles relatives à la fabrication, l'agriculture, les mines et la culture forestière.

Tableau A3 : Annexe I – énergie primaire consommée^a et carbone émis^b selon les scénarios IS92 par élément du cycle des combustibles donnant lieu à la combustion de combustible primaire.

SCÉNARIO	1990 ^c			2010			2020			2050										
	Energie utilisée	CO ₂ émis	tous scénarios	a	c	e	a	c	e	a	c	e								
Aspects liés à l'offre																				
<i>Approvisionnement en énergie et industries de transformation</i>																				
Production d'électricité	96	1,3	141	120	153	1,9	1,4	2,4	165	135	183	2,2	1,4	2,9	187	135	234	1,9	1,0	3,1
Production de combustibles de synthèse	0	0,0	0	1	1	0,0	0,0	0,0	2	4	5	-0,1	-0,2	-0,2	38	18	61	0,2	-0,4	0,7
<i>Consommation directe de combustibles par secteur</i>																				
Bâtiment	47	0,9	59	49	65	1,1	0,9	1,2	64	52	73	1,2	0,9	1,3	73	48	87	1,3	0,9	1,6
Industrie ^e	68	1,4	74	63	81	1,4	0,0	0,0	74	61	86	1,4	1,2	1,6	61	42	69	1,2	0,8	1,4
Transport	51	0,9	64	53	74	1,2	0,0	0,0	65	52	78	1,2	1,0	1,4	69	45	85	1,3	0,8	1,6
TOTAL	262	4,5	338	286	375	5,6	2,3	3,6	370	304	425	5,9	4,4	7,1	427	288	535	5,9	3,1	8,3
Aspects liés à la demande																				
Bâtiment	86	1,4	108	91	119	1,7	1,4	2,0	116	95	132	1,8	1,3	2,2	134	92	166	2,0	1,1	2,7
Industrie ^e	122	2,1	165	141	181	2,7	2,1	3,1	186	154	211	2,9	2,1	3,5	196	140	242	2,6	1,4	3,7
Transport	53	1,0	65	0	76	1,2	1,0	1,4	68	55	82	1,2	0,9	1,4	98	56	127	1,4	0,6	1,9
TOTAL	262	4,5	338	232	375	5,6	4,5	6,5	370	304	425	5,9	4,4	7,1	427	288	535	5,9	3,1	8,3
Par source																				
Solides	77	1,9	99	79	115	2,5	2,0	2,9	113	84	140	2,9	2,1	3,5	163	76	256	4,1	1,9	6,5
Liquides	91	1,7	100	79	122	1,8	1,4	2,3	92	71	119	1,7	1,3	2,2	46	41	49	0,9	0,8	0,9
Gaz	61	0,9	85	68	93	1,3	1,0	1,4	88	62	94	1,3	0,9	1,4	63	31	60	0,9	0,5	0,9
Autres	34	0,0	54	60	45	0,0	0,0	0,0	77	87	72	0,0	0,0	0,0	155	140	170	0,0	0,0	0,0
TOTAL	262	4,5	338	286	375	5,6	4,5	6,5	370	304	425	5,9	4,4	7,1	427	288	535	5,9	3,1	8,3
<p>^a Quantités d'énergie exprimées en exajoules (EJ), ^b Quantités de carbone exprimées en gigatonnes de carbone (Gt C), ^c Pour les scénarios IS92, le secteur de l'industrie comprend les activités industrielles relatives à la fabrication, l'agriculture, les mines et la culture forestière.</p>																				

Tableau A4 : Annexe I – énergie utilisée^a et carbone émis^b par secteur d'utilisation finale selon les scénarios IS92, avec subdivision par élément du cycle des combustibles dominant lieu à la combustion de combustible primaire

SCÉNARIO	1990			2010			2020			2050		
	Energie utilisée tous scénarios	CO ₂ émis		Energie utilisée a c e	CO ₂ émis a c e		Energie utilisée a c e	CO ₂ émis a c e		Energie utilisée a c e	CO ₂ émis a c e	
Bâtiment												
Production d'électricité	40	0,6		49	0,7		51	0,4		55	0,6	
Production de combustibles de synthèse	0	0,0		0	0		0	-0,1		4	0	
Consommation directe de combustibles	47	0,9		59	1,1		64	0,9		73	1,3	
TOTAL	86	1,4		108	1,7		116	1,3		134	2,0	
Industrie^c												
Production d'électricité	54	0,8		91	1,2		111	1,0		129	1,3	
Production de combustibles de synthèse	0	0,0		0	0		0	-0,1		6	0	
Consommation directe de combustibles	68	1,4		74	1,4		74	1,2		61	1,2	
TOTAL	122	2,1		165	2,7		186	2,1		196	2,6	
Transportation												
Production d'électricité	2	0,0		1	0,0		2	0,0		3	0,0	
Production de combustibles de synthèse	0	0,0		0	0,0		1	-0,1		27	0,1	
Consommation directe de combustibles	51	0,9		64	1,2		65	1,0		69	1,3	
TOTAL	53	1,0		65	1,2		68	0,9		98	1,4	
Ensemble des secteurs d'utilisation finale												
Production d'électricité	96	1,4		141	1,9		165	1,4		187	1,9	
Production de combustibles de synthèse	0	0,0		0	0,0		2	-0,2		38	0,2	
Consommation directe de combustibles	166	3,2		198	3,7		203	3,1		202	3,8	
TOTAL	262	4,5		338	5,6		370	4,4		427	5,9	

^a Quantités d'énergie exprimées en exajoules (EJ),

^b Quantités de carbone exprimées en gigatonnes de carbone (Gt C),

^c Les données pour 1990 sont tirées des estimations fournies dans les scénarios IS92, Elles sont indiquées ici dans le but de faciliter le calcul des variations en pourcentage de la consommation d'énergie et des émissions futures et ne correspondent pas à la consommation d'énergie et aux émissions effectives, On trouvera les données effectives pour 1990 à la figure 1 et au tableau 9,

Appendice B

DOCUMENTS DU GIEC UTILISÉS À DES FINS D'INFORMATION

SAR I

IPCC, 1996: *Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.J., L.G. Meiro Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg et K. Maskell (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge et New York, 584 p.

SAR II

IPCC, 1996: *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations, and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Watson, R.T., M.C. Zinyowera et R.H. Moss (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge et New York, 880 p.

SAR III

IPCC, 1996: *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Bruce, J., Hoesung Lee et E. Haites (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge et New York, 464 p.

SAR Syn.Rpt.

GIEC, 1996: *Deuxième 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*, Organisation météorologique mondiale, Genève, 17 p.

IPCC 1994

IPCC, 1994. *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios* [Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, J.P. Bruce, Hoesung Lee, B.T. Callander, E.F. Haites, N. Harris et K. Maskell (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge et New York, 339 p.

IPCC 1992

IPCC, 1992. *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Report of the IPCC Scientific Assessment Working Group* [Houghton, J.T., B.T. Callander et S.K. Varney (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge et New York, 200 p.

Appendice C

ACRONYMES ET SIGLES

AGBM	Groupe <i>ad hoc</i> du Mandat de Berlin
CHP	chaleur et énergie combinées
CNG	gaz naturel comprimé
COP	Conférence des Parties
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FCCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
GDP	produit intérieur brut
GEF	Fonds pour l'environnement mondial
GHG	gaz à effet de serre
GWP	potentiel de réchauffement de la planète
HDV	Organisation de l'aviation civile internationale
ICAO	UN International Civil Aviation Organization
IEA	Agence internationale de l'énergie
IGCC	cycle combiné à gazéification intégrée
IPCC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ISO	Organisation internationale de normalisation
LDV	véhicule de service léger
LESS	système d'approvisionnement en énergie à faible taux d'émission de CO ₂
LNG	gaz naturel liquéfié
LPG	gaz de pétrole liquéfié
NGO	organisation non gouvernementale
OECD	organisation de coopération et de développement économiques
PPP	parité de pouvoir d'achat
PURPA	Public Utilities Regulatory Policy Act
R&D	recherche et développement
RD&D	recherche, développement et démonstration
SAR	Deuxième Rapport d'évaluation
SPM	résumé à l'intention des décideurs
TPD	tonnes par jour
UNITAR	Institut des Nations Unies pour la formation et la recherche
US III	Initiative américaine concernant la mise en œuvre conjointe

Symboles chimiques

CFC	chlorofluorocarbone
CFC-14	tétrafluorométhane (CF ₄)
CFC-116	hexafluoroéthane (C ₂ F ₆)
C ₂ F ₆	hexafluoroéthane (CFC-116)
CF ₄	tétrafluorométhane (CFC-14)
CH ₄	méthane
CO ₂	dioxyde de carbone
HCFC	hydrochlorofluorocarbone
HFC	hydrofluorocarbone
N ₂ O	oxyde nitreux
NO _x	oxydes d'azote
PFC	hydrocarbure perfluoré
SF ₆	hexafluorure de soufre
SO ₂	dioxyde de soufre
SO _x	oxydes de soufre

Appendice D

UNITÉS

Unités SI (Système international)

Quantité physique	Unité	Symbole
longueur	mètre	m
masse	kilogramme	kg

Multiple	Préfixe	Symbole
10^3	kilo	k
10^6	mega	M
10^9	giga	G
10^{12}	téra	T
10^{15}	péta	P
10^{18}	exa	E

Noms et symboles spéciaux de certains unités SI dérivées

Quantité physique	Nom de l'unité SI	Symbole	Définition de l'unité
énergie	joule	J	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$
puissance	watt	W	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-3} (= \text{J s}^{-1})$

Fractions et multiples décimaux d'unités SI dotées de noms spéciaux

Quantité physique	Nom de l'unité	Symbole	Définition de l'unité
surface	hectare	ha	10^4 m^2
poids	tonne	t	10^3 kg

Unités hors SI

°C	degré Celsius ($0^\circ\text{C} = 273\text{K}$ environ); température
kWh	kilowattheure
MW _e	mégawatts d'électricité
ppmv	parties par million (10^6) en volume
ppbv	parties par milliard (10^9) en volume
pptv	parties par billion (10^{12}) en volume
tce	tonnes d'équivalent charbon
toe	tonnes d'équivalent pétrole
TWh	térawattheure

Appendice E

GLOSSAIRE

Pays figurant à l'Annexe I

A l'Annexe I de la Convention-cadre sur les changements climatiques figurent les pays qui étaient membres de l'OCDE en 1992, onze pays qui ont entrepris un processus de transition vers une économie de marché et la Communauté économique européenne. Les parties à la Convention-cadre citées à l'Annexe I sont convenus, au plan national, d'adopter des politiques et de prendre des mesures visant à atténuer le changement climatique.

Dépenses d'investissement

Coûts associés aux capitaux investis en terrain, installations, équipement et stocks. A l'inverse des coûts de main-d'œuvre et des frais d'exploitation, les dépenses d'investissement sont indépendantes du niveau de production.

Commercialisation

Série de démarches à faire pour assurer la mise en marché et la compétitivité globale des nouvelles techniques et des nouveaux procédés et produits.

Efficace par rapport au coût

Critère qui spécifie qu'une technique ou une mesure donnée permet d'obtenir un produit ou un service à un coût égal ou inférieur au coût habituel. Dans le présent document, les externalités liées à l'environnement ne sont pas internalisées; la période d'amortissement varie selon le secteur et le marché considérés.

Potentiel économique

Fraction du potentiel technique de réduction des émissions de GES ou d'amélioration du rendement énergétique qui peut être réalisée de façon efficace par rapport au coût en l'absence d'obstacles à l'accès du marché. La réalisation du potentiel économique exige que l'on mette en oeuvre des politiques et des mesures supplémentaires destinées à lever ces obstacles.

Permis d'émission

Autorisation non transférable ou négociable d'émettre une quantité déterminée de substance accordée par un gouvernement à une entreprise.

Contingent d'émission

Portion ou part du total des émissions permises assignée à un pays ou à un groupe de pays dans le contexte d'une limite maximale des émissions totales et d'affectations obligatoires des ressources ou d'évaluations.

Norme d'émission

Niveau d'émission que la loi prescrit de ne pas dépasser.

Intensité énergétique

Rapport de la consommation d'énergie à la production économique ou physique. A l'échelon national, l'intensité énergétique est le rapport de la consommation intérieure totale d'énergie primaire ou de la consommation finale d'énergie au produit intérieur brut ou à la production matérielle.

Externalités

Sous-produits des activités qui influent sur les conditions de vie des populations ou endommagent l'environnement, lorsque ces effets ne se répercutent pas sur les prix du marché. Les coûts (ou les avantages) associés aux externalités ne sont pas pris en considération dans les systèmes de comptabilité habituels.

Energie finale

Energie fournie au consommateur afin qu'il la transforme en énergie utile (par exemple l'électricité que fournit une prise de courant).

Fixation des prix au coût complet

Fixation du prix de produits commerciaux tels que l'énergie électrique en tenant compte, dans le prix facturé à l'utilisateur final, non seulement du coût privé des moyens de production, mais aussi du coût des externalités engendrées par leur production et leur emploi.

Ampleur possible de la réduction des émissions de GES

Réduction des émissions de gaz à effet de serre (exprimée sous forme de réduction absolue ou de pourcentage des émissions de référence) qui peut être obtenue en mettant en oeuvre des technologies ou des mesures particulières.

Mesures d'information et d'éducation

Initiatives visant à informer, à former, à encourager ou à mieux faire comprendre certaines notions. Ces mesures peuvent renseigner sur la disponibilité, l'efficacité ou d'autres caractéristiques des technologies, pratiques et mesures.

Fixation des prix au coût marginal

Fixation du prix des biens et services commerciaux de sorte que ce prix soit égal au coût additionnel résultant de l'augmentation d'une unité supplémentaire de la production.

Obstacles à l'accès du marché

Conditions qui empêchent la diffusion de techniques ou de pratiques efficaces par rapport au coût susceptibles de réduire les émissions de GES (on parle aussi de barrières commerciales).

Mesures d'incitation fondées sur les lois du marché

Mesures destinées à modifier directement les prix relatifs des services énergétiques et à surmonter les obstacles à l'accès du marché.

Pénétration du marché

Part d'un marché qui est approvisionnée en un bien ou un service particulier à un moment donné.

Potentiel actuellement réalisable (ou potentiel offert par le marché)

Fraction du potentiel économique de réduction des émissions de GES ou d'amélioration du rendement énergétique qui peut être réalisée dans les conditions actuelles du marché, en l'absence de nouvelles politiques ou mesures.

Mesures

Initiatives que peuvent prendre un ou plusieurs gouvernements, souvent en consultation avec le secteur privé, afin d'encourager l'emploi de technologies ou de pratiques susceptibles de réduire les émissions de GES.

Mesures "sans regrets"

Mesures dont les avantages tels que l'amélioration du rendement ou la réduction de la pollution au plan local ou régional (mais non les avantages apportés par l'atténuation des effets du changement climatique) sont au moins égaux aux coûts qu'elles entraînent. On parle aussi parfois de "mesures utiles en tout état de cause".

Coût d'opportunité

Coût d'une activité économique à laquelle on renonce pour en choisir une autre.

Politiques

Actions que peuvent élaborer et engager un ou plusieurs gouvernements dans l'optique d'une atténuation des effets du changement climatique en se fondant sur des technologies ou des mesures particulières.

Energie primaire

Energie présente dans les ressources naturelles (charbon, pétrole brut, lumière solaire, uranium, etc.) qui n'a encore fait l'objet d'aucune conversion ou transformation anthropique.

Coûts d'un projet

Ensemble des coûts financiers d'un projet (dépenses d'investissement, coûts de main-d'œuvre, frais d'exploitation, etc.).

Dispositions réglementaires

Règles ou codes édictés par les pouvoirs publics en vue d'im-

poser des spécifications de produits ou des caractéristiques de procédés particulières.

Recherche, développement et démonstration

Dans le domaine scientifique et technique, activités de recherche et de développement visant à élaborer de nouveaux procédés de production ou produits, associées à des analyses et des mesures informant les utilisateurs potentiels de leurs usages possibles; quant à la démonstration, elle sert à s'assurer de l'applicabilité des produits et des procédés en question par le biais d'essais réalisés dans des installations pilotes et d'autres applications précommerciales.

Scénario

Description vraisemblable de ce que nous réserve l'avenir, fondée sur un ensemble cohérent et intrinsèquement homogène d'hypothèses concernant les principales relations et forces motrices en jeu (rythme des progrès techniques, prix, etc.). Remarque : des scénarios ne sont ni des prédictions, ni des prévisions.

Normes et critères d'efficacité

Ensemble de règles ou de codes imposant ou définissant les caractéristiques de performance d'un produit (qualité, dimensions, caractéristiques, méthodes d'essai, prescriptions concernant son usage).

Mutations structurelles

Modification de la part relative du PIB produite par les secteurs de l'industrie, de l'agriculture ou des services ou, plus généralement, transformation des systèmes lors de laquelle certains éléments sont remplacés en totalité ou en partie par d'autres.

Potentiel technique

Ampleur possible de la réduction des émissions de GES ou de l'amélioration du rendement énergétique résultant de l'emploi d'une technologie ou d'une pratique dans tous les cas où ces dernières sont techniquement applicables, indépendamment de leur coût ou de la faisabilité pratique de leur adoption.

Technologie

Pièce d'équipement ou technique permettant d'accomplir une activité particulière.

Mesures volontaires

Mesures de réduction des émissions de GES adoptées par des entreprises ou d'autres acteurs en l'absence de directives gouvernementales. Ces mesures volontaires contribuent à faciliter l'accès aux produits ou aux procédés ne nuisant pas au climat et à encourager les consommateurs à intégrer des valeurs écologiques à leurs choix commerciaux.

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).

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, composé 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.