

Le présent numéro du bulletin *Le CO<sub>2</sub> et le climat* est consacré à trois courtes évaluations d'un certain nombre de rapports et articles scientifiques qui ont été publiés récemment et ont attiré beaucoup d'attention dans les milieux des politiques et de la science du changement climatique.

Le premier fournit une évaluation de deux rapports sur les options scientifiques et de politiques en matière de puits du carbone. Ces rapports présentent un intérêt particulier dans le contexte actuel des négociations internationales sur l'utilisation de la gestion des forêts et des sols agricoles pour séquestrer davantage de dioxyde de carbone atmosphérique dans la biosphère terrestre, et donc contribuer à compenser partiellement les émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Bien que ces rapports n'aient pas examiné toutes les questions scientifiques connexes (surtout celles qui se sont fait jour pendant les négociations de la Cdp6 à La Haye), ils donnent une bonne idée de la complexité du problème.

La deuxième évaluation présente une synthèse des nouveaux scénarios d'émissions « maintien du statu quo » élaborés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour être utilisés dans les discussions internationales sur les risques de changement climatique. Ces scénarios remplacent ceux qui ont constitué la base de nombreuses projections du changement climatique réalisées avec des modèles du climat. Il est donc important de comprendre de quelle manière l'utilisation des nouveaux scénarios pourra modifier ces projections.

Enfin, la troisième porte sur les arguments scientifiques utilisés l'été dernier par une équipe d'experts du Goddard Institute for Space Studies de la NASA quand ils ont publié une évaluation des rôles relatifs de diverses émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols dans les changements climatiques passés et futur, et leurs implications pour les politiques d'atténuation. Nous examinons comment ces arguments ont fait l'objet de mauvaises interprétations de la part de certains médias, et comment ils se comparent avec la perspective présentée en général dans la littérature scientifique internationale.

Hiver 2001

**Dans ce numéro...**

Puits de carbone – Le décompte des molécules séquestrées dans les arbres et les sols .....	1
Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions (SRES) .....	4
Débat sur le forçage radiatif anthropique .....	6

**Puits de carbone – Le décompte des molécules séquestrées dans les arbres et les sols**

Avec le Protocole de Kyoto, les pays de l'annexe I, dont le Canada, s'engagent à ramener, d'ici les années 2008 à 2012, leurs émissions de gaz à effet de serre en moyenne à environ 5 % sous les niveaux de 1990. Cependant, en raison de leurs engagements aux termes du Protocole de Kyoto, ils doivent aussi inclure dans leurs inventaires nationaux des gaz à effet de serre les sources (émissions dans l'atmosphère) et les puits (retrait de l'atmosphère) liés aux activités de boisement, reboisement et déboisement, ou toute autre activité de changement d'affectation des terres acceptées par les Parties au Protocole.

Bien que l'inclusion des puits forestiers et autres puits biologiques pour honorer les engagements de réduction des émissions puisse fournir à certains pays un excellent moyen de réduire les coûts du respect de ces engagements, il y a de nombreux obstacles à lever avant que les méthodologies de quantification et de déclaration de ces puits soient acceptées et convenablement mises en œuvre. Plusieurs rapports récents ont donné une idée de ces obstacles, et des façons dont on pourrait les contourner.

**Rapport spécial du GIEC – utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie (UTCATF).** Ce rapport du GIEC fournit une analyse en profondeur des considérations scientifiques pertinentes à la discussion des sources et puits de carbone

liés aux forêts et à la gestion des sols dans le contexte du Protocole de Kyoto. On y fait remarquer que les changements d'affectation des terres au cours des derniers siècles ont déjà contribué de façon significative à un changement des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone. Bien que la combustion de combustibles fossiles depuis 1850 ait collectivement rejeté dans l'atmosphère une quantité estimative de 270 milliards de tonnes de carbone (GtC) sous la forme de dioxyde de carbone, les activités de déboisement y ont ajouté environ 50 % de plus. Étant donné que, pendant la même période, l'atmosphère n'a accru son bassin net de carbone que de quelque 176 GtC, il faut qu'environ 2/3 des émissions accumulées aient été absorbées par les océans et la biosphère terrestre. Pour la dernière décennie, les émissions annuelles dues aux activités humaines ont augmenté jusqu'à une valeur estimative de 7,9 GtC, alors que les concentrations atmosphériques ont monté de 3,3 GtC/an. Par conséquent, à l'heure actuelle, environ 58 % du carbone excédentaire rejeté dans l'atmosphère par l'homme est de nouveau absorbé par les océans et les systèmes terrestres. Or, les océanographes estiment que le puits océanique est de l'ordre de 2 GtC/an, ce qui implique un puits terrestre du même ordre de grandeur. Ces résultats montrent que les activités de changement d'affectation des terres sont déjà un facteur important du rejet (via le déboisement) et de l'absorption (via la régénération des forêts) de dioxyde de carbone atmosphérique.

Des politiques délibérées visant à accroître ce puits terrestre peuvent aider considérablement à ralentir l'augmentation des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub>. Le rapport UTCATF estime, par exemple, qu'un effort planétaire concerté visant à accroître les stocks de carbone sur quelque 12 milliards d'hectares de terres, aurait le potentiel de retirer de l'atmosphère environ 1 GtC/an de plus d'ici 2010. Sur cette quantité, moins de 0,3 GtC serait attribuable aux pays de l'annexe I.

Le rapport examine aussi les principaux obstacles qu'il faudra surmonter pour que les procédures de comptabilisation adoptées par la collectivité internationale pour les activités d'utilisation des terres et de changement d'affectation des terres aux termes du Protocole de Kyoto soient transparentes et vérifiables, et représentent avec précision les changements réels induits dans les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre.

Le premier obstacle est lié aux définitions. Il existe, selon les pays, diverses définitions de ce qu'est une forêt, certaines reposant sur des critères d'utilisation des terres, d'autres sur des seuils de couvert ou d'abondance du carbone, d'autres encore sur des notions culturelles, juridiques ou administratives. Des définitions inadéquates aux fins du Protocole de Kyoto pourraient entraîner des fuites considérables de carbone, si les puits de carbone déclarés sont bien supérieurs à ce qui est effectivement réalisé, ou, inversement, pourraient sous-estimer significativement les puits réels. De même, diverses définitions peuvent être appliquées aux termes de « déboisement », « reboisement » et « boisement ». Des définitions trop larges de ces activités créeraient une confusion entre ce qui est naturel et ce qui est anthropique, et des définitions trop étroites poseraient de grands défis de comptabilisation pour

éviter le double compte ou d'autres problèmes. De la même manière, le terme « bassin de carbone » peut lui-même désigner la seule biomasse aérienne, ou des combinaisons de la teneur en carbone de divers éléments d'un écosystème forestier : aériens, souterrains, sols, litère, etc.

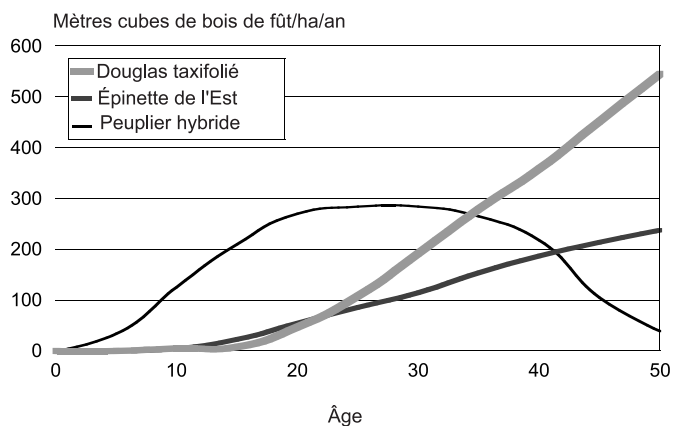
Un autre gros obstacle est l'élaboration d'un protocole de comptabilisation qui soit à la fois précis et suffisamment simple à appliquer. Il y a deux grands modes de comptabilisation. L'un, basé sur les types de terres, mesure les changements nets du stock de carbone dans les bassins concernés entre deux périodes d'engagement sur des terres où sont entreprises des activités de changement d'affectation des terres liées au Protocole de Kyoto. Il serait alors cependant difficile de déterminer quelle partie du changement du stock de carbone est directement attribuable à des activités de changement d'affectation des terres et quelle partie est due à des processus naturels ou aux effets indirects d'activités humaines tels que la fertilisation par le CO<sub>2</sub> et le changement climatique. L'autre méthode, basée sur les types d'activités, ne prend en compte que l'effet direct de chaque activité sur le stock de carbone pour toutes les superficies sur lesquelles cette activité est entreprise, et fait la somme de tous les changements d'activité par activité. Le problème peut ici être que des terres où se déroulent plusieurs activités seraient comptabilisées plusieurs fois, bien que les effets de ces activités ne soient pas nécessairement additifs. Dans les deux cas, les variations des sources et puits de gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub> entraînées par ces activités devraient aussi être incluses dans la comptabilisation. De plus, il faudrait veiller à éviter les fuites (si les activités prises en compte entraînent ailleurs des activités qui les contrebalancent). Les méthodes de comptabilisation devraient aussi prendre en compte la question de la permanence du changement du stock de carbone. Par exemple, certains types d'activités (comme un travail minimal du sol en vue d'augmenter sa capacité de séquestration du carbone) devraient être poursuivis indéfiniment pour conserver le stock de carbone. De même, des perturbations naturelles telles que les feux de friche et les infestations d'insectes pourraient compenser la constitution de stocks de carbone dans les forêts réalisés grâce aux activités d'affectation des terres liées à Kyoto.

La conception de bons protocoles de mesure et de surveillance sera aussi une tâche délicate. Ceux-ci devront en effet combiner des mesures directes avec des estimations indirectes basées sur la télédétection et les modèles. Il faudra établir un équilibre entre, d'une part, la précision et la vérifiabilité des changements déclarés du stock de carbone et, d'autre part, le coût de la réalisation de ces mesures. La résolution spatiale sera un facteur important. Par exemple, des mesures effectuées à une résolution grossière peuvent, au cours du processus de moyennage, faire perdre une grande partie du changement à petite échelle dû au défrichage de petites parcelles, alors que les activités de mesure et de surveillance à haute résolution peuvent être extrêmement coûteuses.

**Rapport sur les options de la Table des puits :** Le deuxième document qui est particulièrement pertinent à la question des activités d'utilisation des terres et de changement d'affectation des

terres liées au Protocole de Kyoto et menées au Canada est le rapport de 1999 de la Table des puits, créée dans le cadre du processus national de mise en œuvre de l'après-Kyoto. La Table des puits était consciente qu'il demeurait de nombreuses questions quant à la façon dont les puits seraient définis aux termes du Protocole de Kyoto et aux modalités, règles et lignes directrices qui seraient adoptées pour déclarer ces puits. Elle a cependant entrepris une évaluation en profondeur des questions de science et de politiques en jeu, en partie pour que le Canada ait une expertise suffisante sur le sujet pour participer efficacement aux futures négociations internationales visant à élaborer ces définitions et lignes directrices. On trouvera ci-dessous certaines des grandes conclusions de cette évaluation :

- Il y a au Canada un fort potentiel de **boisement**, sous la forme à la fois de plantations en blocs sur des terres privées et de plantations de brise-vent dans les Prairies. La plupart des essences, cependant, n'accumulent que très peu de carbone pendant la première décennie de leur croissance. La plus grande partie des bénéfices des programmes de boisement entrepris dans les dix prochaines années en termes de puits de dioxyde de carbone ne se matérialiseraient donc qu'après la première période d'engagement de Kyoto, soit 2008-2012. Le potentiel le plus élevé à court terme serait offert par les essences à croissance rapide. Par exemple, un effort concerté visant à planter, entre 2001 et 2005, des espèces à croissance rapide sur 50 000 ha de



**Figure 1 :** Courbes de croissance pour plusieurs essences canadiennes. Les peupliers hybrides à croissance rapide peuvent accumuler des quantités significatives de carbone pendant les dix premières années de croissance, mais le taux de croissance culmine après 30 ans puis commence à baisser rapidement. En comparaison, le Douglas taxifolié et l'épinette blanche croissent lentement pendant les premières décennies, mais peuvent par la suite devenir d'importants puits du carbone.

terres non boisées pourrait créer un puits d'environ 1,3 Mt de CO<sub>2</sub> atmosphérique d'ici 2010. En comparaison, la plantation similaire d'essences indigènes sur quelque 800 000 ha entre 2001 et 2015 n'accumulerait que 0,8 Mt de CO<sub>2</sub> d'ici 2010. Cependant, pour les puits à long terme jusqu'en 2050, les

espèces indigènes accumuleraient une moyenne de l'ordre de 4 Mt de CO<sub>2</sub> par an, alors que les espèces à croissance rapide de courte durée de vie arriveraient rapidement à maturité, puis ralentiraient en tant que puits.

- À l'heure actuelle, 50 % des terres forestières exploitées du Canada sont rétablies par **régénération** naturelle, 5 % par ensemencement et les 45 % restants par plantation. Les peuplements replantés arrivent généralement à maturité au moins dix ans plus vite que ceux qui se régénèrent naturellement. Le choix judicieux des essences et la gestion de la densité peuvent aussi accroître le stockage du carbone. Toutefois, la mesure dans laquelle ces actions pourront être incluses dans les inventaires nationaux de gaz à effet de serre dépendra des définitions finales et des pratiques de comptabilisation adoptées aux termes du Protocole de Kyoto.
- D'autres **pratiques de gestion forestière** telles que l'éclaircissement, la fertilisation, la suppression des feux et la protection contre les ravageurs peuvent aussi aider à accroître le stockage du carbone dans les forêts canadiennes. Les puits ainsi accumulés seraient cependant difficiles à calculer et vérifier, puisque l'impact de ces pratiques varierait selon l'endroit et l'espèce concernés. Il est peu probable que ces activités soient prises en considération individuellement dans le cadre du Protocole de Kyoto. Par contre, la notion de forêt aménagée faisant intervenir une pleine comptabilisation des changements du stock de carbone dans la zone gérée serait conforme aux objectifs de la CCCC quant à la protection et à l'amélioration des puits et réservoirs de carbone, et donc pourrait avoir un avenir dans le contexte de Kyoto.
- Diverses activités contribuent à la conversion de terres forestières canadiennes à d'autres usages, et donc au **déboisement**. Par exemple, chaque année, entre 10 000 et 30 000 ha de terres sont converties à l'agriculture, quelque 10 000 ha sont inondés pour la production d'électricité, plus de 20 000 ha font l'objet d'une exploitation forestière, et d'autres milliers sont absorbés par l'étalement urbain, les corridors de transport, l'exploitation minière, etc. La perte totale annuelle de terres forestières est estimée entre 55 et 80 000 hectares. La perte associée de carbone de la seule biomasse aérienne, convertie totalement en dioxyde de carbone, libérerait chaque année 9 à 14 Mt de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Les émissions dues au déboisement sont déjà incluses dans le Protocole de Kyoto, mais les définitions et les méthodologies de calcul des émissions restent à négocier.
- Les **sols agricoles** canadiens constituent un vaste réservoir de carbone, qui peut être considérablement amélioré par l'adoption de pratiques de conservation des terres cultivées, l'amélioration de la gestion des pâturages et la conversion de terres marginales en prairies. On s'attend déjà à ce que les tendances actuelles à l'amélioration de la gestion des sols transforment le flux de carbone des terres agricoles du Canada qui, d'une source nette estimée à 1,6 million de tonnes (Mt) par an en 1996, deviendraient un puits net de 1,6 Mt par an en 2010. Avec un programme de gestion amélioré, on pourrait même atteindre

environ 24 Mt par an. Cependant, un manque de confiance dans les méthodes de déclaration et des doutes quant à la possibilité de vérifier les changements du carbone du sol ont empêché leur inclusion dans l'entente de Kyoto sur les puits.

- En général, les milieux humides canadiens sont un important puits de CO<sub>2</sub> et une source de méthane. Les changements de l'état des milieux humides dus à une interférence humaine directe influenceront donc sur le flux net de gaz à effet de serre entre ces milieux et l'atmosphère. Bien que les milieux humides ne soient pas directement inclus dans le Protocole de Kyoto, nombre d'entre eux font partie intégrante des sols agricoles et des paysages forestiers boréaux; c'est pourquoi les activités visant à accroître les puits dans les sols agricoles et les forêts doivent aussi prendre en compte les effets connexes sur les flux de gaz à effet de serre des milieux humides situés dans les zones concernées et à proximité.
- Enfin, pour que les déclarations des impacts nets des activités menées aux termes du Protocole de Kyoto soient crédibles et vérifiables, et que les activités réelles de puits qui ne sont pas encore incluses dans les dispositions du Protocole puissent être convenablement prises en compte dans l'avenir, le Canada devra investir beaucoup dans des actions renforcées de recherche et de collecte d'information.

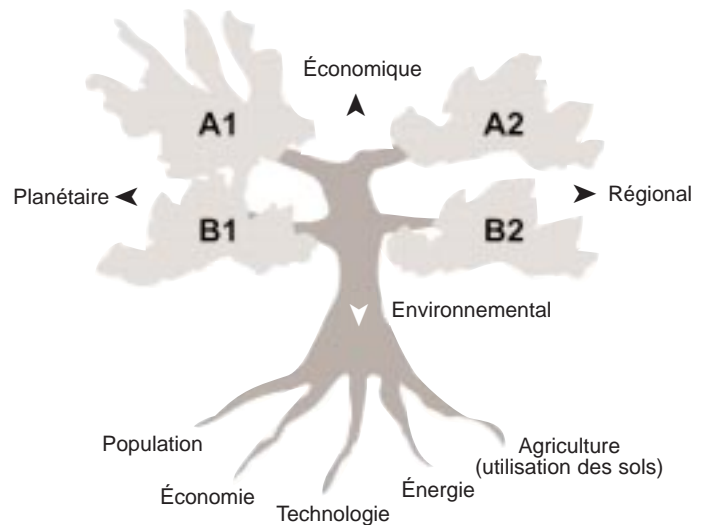
## Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions (SRES)

Les scénarios d'émissions sont un élément important des évaluations du changement climatique, puisque les modèles du climat ont besoin des émissions futures comme données d'entrée. Les scénarios sont en effet des images du futur, ou de futurs possibles. C'est ainsi que les scénarios d'émissions fournissent des projections pour une gamme plausible de futures émissions de gaz à effet de serre. Pour élaborer des scénarios de futurs possibles, on formule de nombreuses hypothèses sur l'état futur du monde, surtout les trois principales forces motrices : la population, le développement économique et les changements structurels ou technologiques (par exemple, l'efficacité énergétique).

Les scénarios IS92 ont été élaborés par le GIEC au début des années 1990 pour illustrer une gamme plausible d'émissions futures de gaz à effet de serre. À l'extrémité supérieure de la fourchette se situe le scénario IS92e, qui combine une croissance démographique modérée, une croissance économique élevée, une grande disponibilité de combustibles fossiles et, à terme, une élimination graduelle de la filière nucléaire. À l'extrémité inférieure, on trouve le scénario IS92c, avec des émissions de CO<sub>2</sub> en 2100 inférieures à celles de 1990, en raison d'une baisse de la croissance démographique, d'une faible croissance économique et de fortes restrictions sur les approvisionnements en combustibles fossiles. Au milieu figure le scénario IS92a, combinant des croissances démographique et économique modérées, une grande disponibilité de combustibles fossiles équilibrée par une baisse des

coûts de l'énergie solaire. Le scénario IS92a a été largement utilisé dans les modélisations à titre de scénario standard « maintien du statu quo ». Certains récents modèles aux états transitoires utilisent aussi une augmentation annuelle de 1 % des émissions de CO<sub>2</sub>, semblable à celle de IS92a. Bien qu'ils aient été très utilisés, les scénarios IS92 ont leurs limites. Bien que de nombreuses études prennent le scénario IS92a comme scénario intermédiaire ou de référence, ce n'est pas nécessairement le plus probable; en outre, il n'est central que pour certaines caractéristiques, mais présente des lacunes pour certaines autres, surtout en ce qui concerne les émissions régionales. Les autres faiblesses de la série IS92 sont entre autres : une fourchette limitée d'émissions de CO<sub>2</sub> par unité d'énergie; l'absence de tout scénario avec fermeture significative de l'écart de revenu entre les pays développés et en développement; et l'absence de prise en compte d'une législation future plafonnant les émissions de soufre pour des raisons de qualité de l'air.

**Le rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES)** a été entrepris par le GIEC après qu'une évaluation de 1995 ait recommandé de prendre en compte les changements significatifs (survenus depuis l'élaboration de la série IS92) de la compréhension des forces motrices des émissions et des



**Figure 2 :** Illustration schématique des scénarios SRES. (Source : d'après le Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions)

méthodologies. Les scénarios SRES reflètent les plus récentes tendances des forces motrices des émissions : les projections démographiques, le développement économique, et les changements structurels et technologiques. Le processus a débuté par un examen de la littérature et l'élaboration d'une base de données de plus de 400 scénarios planétaires et régionaux, dont 190 s'étendent de 1900 à 2100 et sont donc entrés dans la formulation de canevas narratifs de scénarios. Les scénarios couvrent la plus grande partie de la fourchette d'émissions planétaires de gaz à effet de serre liées à



l'énergie, du 95<sup>e</sup> percentile à l'extrémité supérieure de la distribution jusqu'à des émissions faibles juste au-dessus du 5<sup>e</sup> percentile. Ainsi, on n'a exclu que les scénarios d'émissions les plus extrêmes trouvés dans la littérature. À partir de l'examen de la littérature, l'équipe de rédaction a élaboré un ensemble de quatre « familles » de scénarios, soit un total de 40 scénarios d'émission. Chaque famille comporte un canevas narratif décrivant les conditions démographiques, sociales, économiques, technologiques, environnementales et politiques d'un futur. L'équipe de rédaction avait convenu qu'il ne pourrait pas y avoir de scénario de « meilleure intuition »; les 4 familles de scénarios ont donc été choisies de manière à éviter de donner l'impression qu'il y a un cas central ou plus vraisemblable.

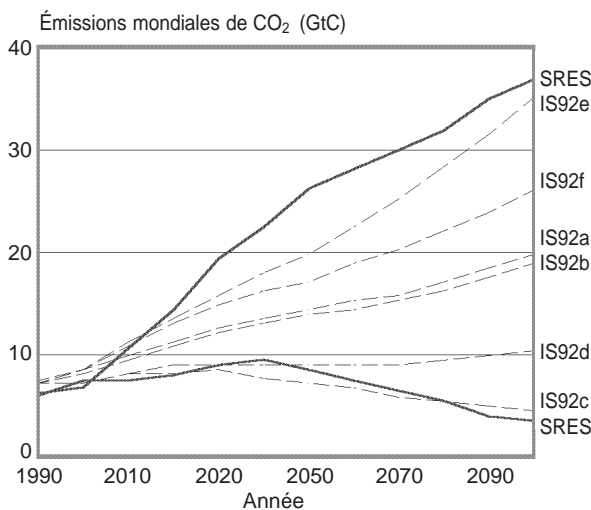
**Les scénarios :** Le Rapport spécial sur les scénarios d'émissions concluait que, sur les 4 familles de scénarios, il y a 6 groupes (A1F1, A1T, A1B, A2, B1, B2) qui devraient être considérés comme également valides, et couvrant une large plage d'incertitude. Quatre de ceux-ci sont désignés scénarios « marqueurs », caractéristiques des 4 familles. Deux autres scénarios d'illustration ont été choisis dans la famille A1; ensemble, ils représentent la plupart des possibilités d'émissions et de forces motrices couvertes par l'ensemble complet de scénarios. Les six scénarios présentent les caractéristiques suivantes :

- La famille A1 est basée sur une croissance économique très rapide, une croissance démographique lente et l'introduction rapide de nouvelles technologies plus efficaces. Le groupe A1B est équilibré en ce sens qu'il ne repose pas trop sur une source d'énergie unique. Le groupe A1F1 repose sur des technologies

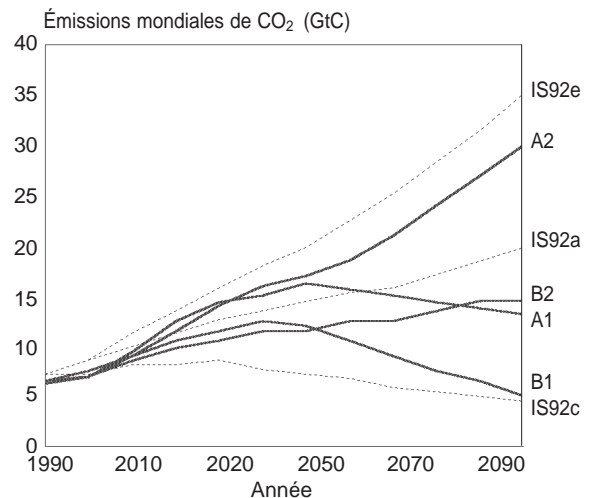
à forte intensité de combustibles fossiles, et A1T postule un avenir sans combustibles fossiles.

- Le scénario A2 décrit un monde hétérogène avec une croissance démographique élevée. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique y sont fragmentées et lentes.
- Le scénario B1 décrit un monde convergent. La croissance démographique y est aussi lente que dans A1, mais avec un changement rapide des structures économiques vers une économie de services et d'information. Parmi les autres caractéristiques figurent une réduction de l'intensité des matériaux, l'introduction de technologies propres et efficaces, et une meilleure équité.
- Le scénario B2 met l'accent sur des solutions locales dans le sens de la durabilité économique, sociale et environnementale. Il postule une croissance démographique modérée et des niveaux intermédiaires de développement économique. L'évolution technologique y est moins rapide et plus diversifiée que dans les scénarios A1 et B1.

**Comparaison entre les scénarios IS92 et les scénarios SRES :** Une comparaison des nouveaux scénarios SRES avec les IS92 montre que, malgré certains écarts, les nouveaux ne sont pas radicalement différents des précédents. Les scénarios SRES couvrent une plus large gamme de structures énergétiques que les scénarios IS92, pour refléter les incertitudes sur les ressources en combustibles fossiles et les changements technologiques de l'avenir. La fourchette des émissions de CO<sub>2</sub> est semblable pour les deux ensembles de scénarios (voir la figure 1). Par rapport aux scénarios IS92, les 40 scénarios SRES repoussent tous quelque peu la limite supérieure des émissions cumulatives, mais pas leur limite inférieure. Cette situation est particulièrement nette en 2050 mais, en 2100, l'extrémité supérieure des deux séries est semblable. Les



**Figure 3 :** Comparaison des scénarios IS92 pour ce qui est de la gamme complète des nouveaux scénarios SRES. Note : c'est le scénario IS92a qui a été utilisé le plus couramment dans les expériences avec les modèles du climat.



**Figure 4 :** Comparaison des scénarios de la série IS92 et des nouveaux scénarios SRES.

deux ensembles présentent aussi quelques différences dans les forces motrices :

- les projections de la population mondiale sont généralement plus basses;
- tous les scénarios décrivent une société plus riche (le produit mondial brut est 10 à 26 fois plus élevé que de nos jours); et
- les scénarios SRES couvrent une gamme plus vaste de structures énergétiques – depuis des pourcentages élevés de combustibles fossiles jusqu’à des fractions élevées de combustibles non fossiles.

Les émissions mondiales tant de méthane que d’hémioxyde d’azote couvrent des fourchettes plus larges en 2100, 250 à 1000 Mt CH<sub>4</sub>/an et 5 à 20 Mt N/an, respectivement. Dans tous les scénarios SRES, des facteurs autres que le changement climatique, comme la qualité de l’air aux échelles régionale et locale, entrent en jeu pour limiter les émissions de soufre futures. Les scénarios publiés depuis les IS92 postulent généralement que divers degrés de mesures visant le soufre seront mises en place dans l’avenir, et présentent donc des projections nettement plus basses que les précédents. Même la plus élevée des fourchettes d’émissions de soufre dans les scénarios SRES (fourchette de 20 à 60 MtS) est substantiellement plus basse que celles du scénario IS92a (~170 MtS).

L’implication de cette réduction des émissions de soufre est que le forçage radiatif négatif des aérosols de sulfates, historiquement important, quoiqu’incertain, pourrait baisser à long terme. En termes de forçage radiatif, l’effet combiné de la baisse des émissions de CO<sub>2</sub> dans le scénario médian et de la baisse des émissions de soufre pourrait être très semblable aux projections actuelles des modèles utilisant le scénario IS92a.

Une comparaison des scénarios marqueurs avec les scénarios IS92 (voir la figure 2) montre que la médiane et la moyenne des scénarios SRES mènent à des émissions à peu près triples des niveaux de 1990, soit environ 16GtC, en 2100. C’est une valeur plus basse que la médiane de l’ensemble IS92 et aussi que celle du scénario IS92a.

Un certain nombre de travaux de modélisation actuels ont choisi les scénarios A2 et B2 pour les premières expériences. Les émissions de CO<sub>2</sub> du scénario A2 sont plus élevées que celles du scénario IS92a, et celles de B2 plus basses.

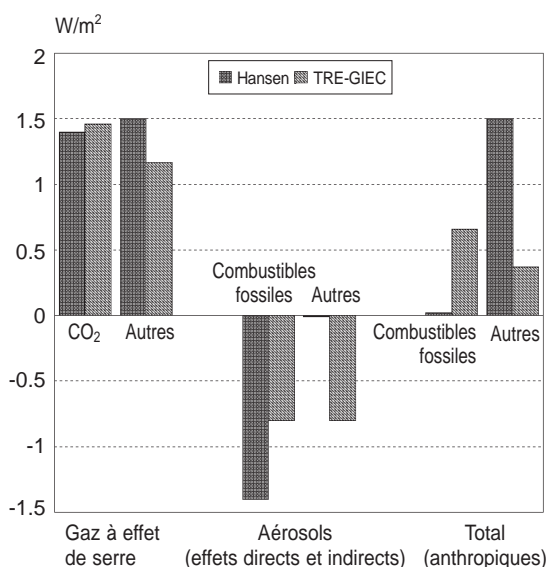
Les nouveaux scénarios SRES constituent une amélioration sur les scénarios IS92 en ce sens qu’ils reflètent une plus large gamme d’évolutions des émissions, et sont de vaste portée. Une des principales conclusions des récents travaux de modélisation menés avec les scénarios est que diverses combinaisons des principales forces motrices des scénarios peuvent arriver à des niveaux similaires d’émissions de GES à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Des scénarios basés sur des hypothèses différentes peuvent déboucher sur des changements climatiques très semblables. En outre, il a été constaté que la technologie était une force motrice des émissions de GES au moins aussi importante que la démographie et le développement économique. Dans l’ensemble, par comparaison avec les scénarios IS92, les scénarios SRES remontent la limite supérieure des émissions de CO<sub>2</sub> et abaissent significativement les émissions de soufre.

Le rapport SRES est disponible sur le Web à l’adresse suivante : [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).

## Débat sur le forçage radiatif anthropique

Au milieu d’août 2000, James Hansen et ses collègues du Goddard Institute for Space Studies (GISS) de la NASA ont publié un document intitulé « Global Warming in the 21<sup>st</sup> Century: An Alternative Scenario » (Réchauffement planétaire au XXI<sup>e</sup> siècle : un autre scénario) dans les *Proceedings of the National Academy of Science*. Ils ont en même temps publié une note semblable mais moins technique, portant le même titre, sur le site Web du GISS. Ces documents ont beaucoup attiré l’attention des médias à l’époque. Cependant, un certain nombre d’articles ont suggéré, bien à tort, que Hansen était revenu sur ses préoccupations antérieures quant au changement climatique. D’autres ont sous-entendu qu’il ne considérait plus la combustion de combustibles fossiles comme une préoccupation première dans les efforts internationaux qui seront menés dans les prochaines décennies pour réduire les risques du changement climatique, mais qu’il estimait que la meilleure solution pour réduire ces risques était de réduire les gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub>. Certains ont même avancé que ces rapports fournissaient une preuve supplémentaire que la ratification et la mise en œuvre du Protocole de Kyoto n’étaient pas justifiées. Malgré diverses tentatives de clarification de ce que Hansen et ses collègues ont dit et n’ont pas dit, il persiste une confusion et un débat sur leurs conclusions. L’analyse ci-après propose une évaluation des points clés avancés par Hansen *et al.* dans leurs présentations, de la manière dont ils se comparent à la compréhension générale de la communauté scientifique internationale, et de ce qu’en sont les véritables implications en matière de politiques.

**Forçage anthropique passé du système climatique :** Hansen *et al.* font remarquer que les risques d’un changement climatique dangereux sont bien réels, et que l’on a de bonnes indications que les émissions passées de gaz à effet de serre ont déjà contribué au changement climatique planétaire. De toute évidence, ils ne sont donc pas « revenus » sur leurs préoccupations passées face au changement climatique. Ils font remarquer, par exemple, que « l’on convient de plus en plus que le réchauffement des dernières décennies est, au moins en partie, une conséquence de l’augmentation anthropique des gaz à effet de serre » (traduction libre), et étayent cette assertion par des estimations des changements des forçages radiatifs par rapport à ceux d’autres causes du changement climatique. En outre, font-ils aussi remarquer, le réchauffement des océans survenu depuis le milieu des années 1950 concorde avec les effets estimés des augmentations passées du forçage radiatif dues aux activités humaines. Il y a donc de nombreuses preuves empiriques que les estimations du forçage radiatif et les projections des modèles seraient sur la bonne voie. Les auteurs concluent enfin que les projections du changement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre et d’aérosols laissent penser qu’il faudrait jusqu’à



**Figure 5 :** Comparaison des estimations du forçage radiatif anthropique passé dû à la combustion de combustibles fossiles et à d'autres causes, telles que présentées par Hansen *et al.*, avec celles du GIEC dans son Troisième rapport d'évaluation. Le forçage des aérosols inclut une estimation des effets indirects, présumés proportionnels aux effets directs, quelle que soit la source. Les ordres de grandeur du forçage estimatif total des gaz à effet de serre seulement et de celui des aérosols seulement sont très similaires. Les importantes différences dans le forçage net sont liées essentiellement à la seule combustion de combustibles fossiles. En comparaison, le GIEC estime que la moitié des effets directs des aérosols provient d'autres sources.

« trente Kyoto » pour ramener le réchauffement à un niveau acceptable. Ces conclusions concordent avec l'interprétation des indications que font les experts du monde entier.

Hansen *et al.* calculent que le forçage cumulatif net du climat entre 1850 et 2000 imputable à toutes les activités humaines est d'environ 1,6 W/m<sup>2</sup>. Ils avancent cependant qu'il est surtout dû à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub>. En comparaison, ils suggèrent que le forçage net dû à la combustion de combustibles fossiles est relativement modeste, puisque le forçage causé par les émissions de CO<sub>2</sub> de cette source (environ 1,4 W/m<sup>2</sup>) est largement compensé par le forçage égal mais de signe opposé (-1,4 W/m<sup>2</sup>) des aérosols produits par les mêmes processus de combustion. Les auteurs postulent que les aérosols sont surtout produits par la combustion de combustibles fossiles.

Les plus récentes estimations d'autres études internationales publiées dans divers articles de journaux à comité de lecture et résumées dans la version préliminaire du troisième rapport d'évaluation (TRE) du GIEC suggèrent un forçage radiatif historique du même ordre de grandeur que ceux estimés par Hansen *et al.* pour le dioxyde de carbone (1,46 W/m<sup>2</sup>) et pour les aérosols (entre près de zéro et -3 W/m<sup>2</sup>), mais inférieur à celui de Hansen pour les gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub> (1,2 W/m<sup>2</sup>). Ces études suggèrent aussi qu'environ 50 % du forçage des aérosols est causé par ceux qui proviennent de la combustion de combustibles non fossiles (c.-à-d.

combustion de la biomasse et poussière minérale). Donc, l'estimation de mi-fourchette pour les effets des aérosols provenant de la combustion de combustibles fossiles serait plus proche d'environ -0,7 W/m<sup>2</sup>, ce qui donnerait un forçage combiné des émissions dues aux combustibles fossiles (CO<sub>2</sub> + aérosols de sulfates) d'environ 0,7 W/m<sup>2</sup>. Celui des processus de combustion de combustibles non fossiles, qui inclut l'autre moitié de l'effet des aérosols, ne serait que d'environ 0,5 W/m<sup>2</sup>. C'est pourquoi d'autres experts nient que la combustion de combustibles fossiles ait joué un rôle secondaire dans les changements passés du forçage radiatif.

Hansen *et al.* font en outre remarquer que l'accroissement des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> a ralenti dans les dernières décennies, même si les émissions ont continué d'augmenter. Pour eux, cette situation suggère que les taux de croissance futurs pourraient être moindres que ne le suggèrent certains scénarios « maintien du statu quo » des concentrations. Si c'est le cas, les efforts visant à maîtriser l'augmentation du CO<sub>2</sub> seraient plus simples à réaliser que beaucoup ne le pensent. Le ralentissement de la croissance semble dû à l'augmentation de l'absorption de CO<sub>2</sub> par les océans et la biosphère terrestre, et non à des valeurs plus basses que prévu des émissions anthropiques. Ils admettent cependant que cette augmentation du puits pourrait être de courte durée (les taux de croissance ont en effet connu un regain récemment) et que, pour maintenir un faible taux de croissance des concentrations de CO<sub>2</sub>, il faudrait presque certainement que le taux de croissance des émissions dues aux combustibles fossiles soit inférieur à celui projeté par les scénarios « maintien du statu quo ». À titre de comparaison, d'autres d'études qui faisaient intervenir nombre des rétroactions complexes et variables qui régissent le taux global d'absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique (comme les effets des épisodes El Niño et des volcans, les changements de la circulation océanique, les effets de la fertilisation par le CO<sub>2</sub> et l'azote, et les changements de la température) dans les modèles du bilan du carbone continuent de projeter une fourchette de concentrations « maintien du statu quo » du CO<sub>2</sub> d'ici 2100 qui est presque double des niveaux préindustriels de CO<sub>2</sub>, et possiblement triple. Ainsi, bien que le scénario de maintien du statu quo (MSQ) de la croissance du CO<sub>2</sub> proposé par Hansen *et al.* se situe à l'intérieur de la fourchette des nouvelles estimations SRES des experts d GIEC, il est à son extrémité inférieure et semble trop optimiste. Un scénario significativement plus pessimiste pourrait être tout aussi probable.

#### Forçage radiatif estimatif actuel et futur dans un scénario de MSQ :

Hansen *et al.* avancent que la combustion actuelle et future de combustibles fossiles (principale source d'émissions de CO<sub>2</sub>) dans des scénarios de maintien du statu quo ne génère pas et ne générera pas les mêmes émissions d'aérosols compensatrices que par le passé. Cette situation tient surtout au fait que les préoccupations quant à la qualité de l'air locale ont amené, et continueront d'amener, des mesures de limitation des émissions d'aérosols provenant de cette combustion. Par conséquent, l'influence relative des émissions liées aux combustibles fossiles par rapport aux autres gaz à effet de serre est plus importante à l'heure actuelle que par le passé, et le sera encore plus dans les décennies à venir.

---

D'autres études effectuées par la communauté scientifique internationale ont récemment estimé que, pour deux scénarios SRES situés aux extrémités inférieure (B2) et supérieure (A2) de la fourchette des nouveaux scénarios d'émission SRES, le forçage du CO<sub>2</sub> sera respectivement supérieur aux niveaux actuels d'environ 1,4 et 3 W/m<sup>2</sup> d'ici 2050, et d'environ 2,6 et 4,4 W/m<sup>2</sup> d'ici 2100. Par comparaison, d'ici 2100, le forçage des gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub> ne devrait augmenter respectivement que de 0,6 W/m<sup>2</sup> et 1,2 W/m<sup>2</sup>, et celui des aérosols de sulfates baisserait probablement un peu par rapport aux niveaux actuels. Ces études suggèrent donc que le rôle des combustibles fossiles, qui domine déjà le forçage radiatif, augmentera de façon spectaculaire par rapport aux autres gaz à effet de serre dans les scénarios MSQ futurs et que, à long terme, l'effet compensateur des aérosols sera négligeable.

**Le scénario d'atténuation de Hansen :** Le scénario d'atténuation proposé par Hansen *et al.* préconise des efforts concentrés pour réduire les émissions de gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub> (dont les précurseurs de l'ozone troposphérique) et de suie. Ils font remarque que ces efforts auraient de grands avantages connexes, entre autres de réduire les effets néfastes pour la santé de substances telles que l'ozone et les aérosols. Selon eux, les réductions des émissions hors CO<sub>2</sub> permettraient probablement au forçage dû aux émissions de CO<sub>2</sub> d'augmenter d'environ 1 W/m<sup>2</sup> d'ici 2050 sans que soient compromises les actions visant à éviter un changement climatique dangereux. Bien que cette solution continue d'exiger des efforts considérables pour réduire aussi les émissions de CO<sub>2</sub>, les auteurs soutiennent qu'on peut y parvenir avec beaucoup moins de perturbation économique que si tous les efforts étaient axés sur des réductions des seules émissions de CO<sub>2</sub>. En fait, d'ici 25 ans, des programmes rentables d'efficacité énergétique et de passage à d'autres combustibles et carburants suffiraient pour atteindre cet objectif, mais il faudrait pour cela surmonter des obstacles économiques et sociaux. Après 2025, on devrait s'attacher davantage à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> en augmentant l'utilisation des énergies renouvelables, pour les quelles on devra entre temps faire des investissements dans la R&D.

Les estimations ci-dessus, basées sur les scénarios SRES du GIEC, suggèrent que, pour ramener le forçage dû au CO<sub>2</sub> à 1 W/m<sup>2</sup> d'ici 2050 (comme le demande l'hypothèse de Hansen *et al.*), la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> des projections MSQ devrait être augmentée de jusqu'à 40 % pour le scénario B2 et de plus de 100 % pour le scénario A2. Par conséquent, même le scénario optimiste de Hansen *et al.* exigerait une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> provenant des combustibles fossiles qui dépasserait de loin les engagements de Kyoto. De plus, à l'exception de l'ozone et des

aérosols, les autres gaz à effet de serre envisagés dans le scénario de Hansen *et al.* sont déjà couverts par le Protocole de Kyoto.

Le Protocole de Kyoto ne prenait pas en compte l'ozone et la suie parce qu'il est difficile de lier l'effet de mesures visant à réduire les émissions à des changements réels des concentrations locales de ces substances de courte durée de vie et donc non homogènes. De plus, leur contribution au forçage futur n'est pas importante. On estime que les mesures visant à réduire l'ozone et la suie proposées par Hansen *et al.*, par exemple, ne réduiraient le réchauffement planétaire que de 0,1 W/m<sup>2</sup> et 0,5 W/m<sup>2</sup> respectivement d'ici 2050. De plus, ces estimations semblent optimistes, étant donné que la totalité des émissions planétaires de suie devraient être éliminées pour atteindre les réductions indiquées. Par comparaison, la plage estimative d'augmentation du forçage radiatif pour la totalité des scénarios SRES se situe entre 1,6 et 2,5 W/m<sup>2</sup> d'ici 2050.

**Implications pour les actuelles stratégies d'atténuation :** En résumé, l'accent que mettent Hansen *et al.* sur une option d'atténuation du changement climatique visant tous les gaz à effet de serre va dans le sens des recommandations du GIEC quant à des « éventails » nationaux, qu'accepte le Protocole de Kyoto, de mesures d'atténuation qui couvrent un « panier » de six gaz à effet de serre et qui sont adaptés aux circonstances sociales et économiques de chaque pays. Un élément clé de l'approche de Hansen est l'accent mis sur la pollution de l'air, surtout en ce qui concerne les précurseurs de l'ozone troposphérique (NO<sub>x</sub> et COV) et les aérosols. Que l'on accepte ou non les arguments scientifiques de Hansen, cette approche, si elle est adoptée de façon intégrée, concorde largement avec les plans gouvernementaux d'atténuation du changement climatique et d'assainissement de l'air de la plupart des pays de l'annexe 1, dont le Canada. De plus, bien qu'elle repose sur un scénario optimiste de maintien du statu quo, l'approche proposée par Hansen *et al.* conserve le besoin d'efforts substantiels pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> pendant encore 50 ans, ce qui dépasse les exigences de Kyoto, et implique des réductions encore plus marquées au-delà de 2050.

---

*Ces revues ont été compilées par Patti Edwards et Henry Hengeveld, conseillers scientifiques en matière de changement climatique auprès du Service météorologique du Canada (SMC), d'Environnement Canada.*