

L'ÉNERGIE ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

– Une perspective canadienne en ingénierie –

Un rapport de

l'Académie canadienne du génie



**Préparé par un groupe de travail dirigé par
M. Jozinus Ploeg, MACG
Mars 2002**

ISBN 0-9730830-0-X

**Académie canadienne du génie
180, rue Elgin, bureau 1100
Ottawa ON K2P 2K3**

**Tél.: (613) 235-9056 Téléc. (613) 235-6861
acadeng@ccpe.ca
www.acad-eng-gen.ca**

RAISON D'ÊTRE ET MISSION

L'Académie canadienne du génie est un organisme indépendant, autogéré et à but non lucratif, créé en 1987 afin de servir le pays dans les dossiers qui impliquent le génie. Les membres de l'Académie sont des ingénieurs canadiens de toutes les disciplines et sont élus pour leurs services émérites et leur contribution à la société, au pays et à leur profession.

L'Académie est auto financée et ne reçoit aucune subvention des gouvernements tout en étant prête à accepter des contrats pour enquêtes et études. Les membres de l'Académie peuvent donc apporter dans son activité, de façon complètement indépendante et impartiale, l'expérience et l'expertise qu'ils ont acquises comme ingénieurs pratiquants au sein de la profession de l'ingénierie au Canada, profession qui compte 160 000 membres.

La mission de l'Académie est de rehausser, par l'application et l'adaptation des principes de l'ingénierie et de la science, le bien-être et la création de la richesse au Canada.

L'Académie poursuit sa mission en:

- promouvant une conscience accrue du rôle de l'ingénieur dans la société,
- reconnaissant l'excellence dans la contribution de l'ingénierie à l'économie du Canada,
- soumettant des conseils et recommandations concernant la formation, la recherche, le développement et l'innovation en ingénierie,
- favorisant la concurrence industrielle tout en protégeant l'environnement au Canada et à l'étranger,
- émettant des avis sur des sujets relevant de l'ingénierie au Canada et à l'étranger,
- développant et maintenant des relations efficaces avec d'autres organisations professionnelles d'ingénieurs, académies et sociétés savantes au Canada et à l'étranger.

TABLE DES MATIÈRES

Raison d'être et mission	ii
Remerciements	iv
Résumé	v
Introduction	1
Le climat de la Terre	2
Offre et demande énergétiques au Canada	5
Demande énergétique	5
Offre énergétique	6
Production et réserves de pétrole.....	6
Production et réserves de gaz naturel	6
Production et réserves de charbon	7
Autres sources d'énergie et leurs réserves	7
Offre et demande énergétiques à l'échelle mondiale	7
Utilisation future de l'énergie	9
Scénarios pour l'avenir énergétique canadien	9
Scénarios pour l'avenir énergétique à l'échelle mondiale	12
Discussion	14
Conclusions	16
Références	17
Annexes	18

*L'Académie canadienne du génie remercie sincèrement
les commanditaires des entreprises suivantes
dont l'appui a facilité la recherche et la publication
de ce rapport.*

SNC-Lavalin inc.



Hydro-Québec



Imperial Oil Limitée

Imperial Oil



Ontario Power Generation



**Secrétariat du changement climatique
Government of Canada**



L'ÉNERGIE ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

– Une perspective canadienne en ingénierie –

RÉSUMÉ

L'Académie canadienne du génie entreprend une étude sur **l'énergie et le changement climatique** dans le cadre de son mandat qui est «*d'émettre des avis sur des sujets relevant de l'ingénierie au Canada et à l'étranger*». Un groupe de travail a été formé au mois de septembre 2000 pour définir le rôle que l'Académie pourrait jouer dans le débat sur l'énergie et le changement climatique. Le groupe de travail a examiné de grandes quantités de données sur la demande énergétique actuelle et projetée, ainsi que sur les systèmes d'approvisionnement énergétique. Les résultats de cet examen ont été présentés aux membres de l'Académie lors de l'assemblée générale annuelle de 2001. Le présent rapport contient essentiellement les informations présentées à l'assemblée.

Bien que le développement d'une stratégie énergétique et durable, à long terme, implique de nombreux aspects, la **technologie** ressort comme un facteur commun. Par les vastes connaissances et l'expertise de ses membres, l'Académie peut faire une contribution importante à l'élaboration d'une telle stratégie en faisant un examen critique et impartial de la demande et l'offre énergétiques.

L'examen du groupe de travail a fait ressortir les faits saillants suivants:

- la demande énergétique mondiale augmentera par un facteur de 5 à 6 au cours du prochain siècle, cette croissance provenant presque entièrement des pays en voie de développement en raison de l'accroissement démographique et de la croissance du PIB;
- une majorité de scientifiques conviennent que le climat est affecté par les activités humaines depuis le début de la révolution industrielle;
- même s'il y a suffisamment de sources d'énergie conventionnelles (à base d'hydrocarbures) pour satisfaire même les prévisions de demande future les plus extrêmes, les conséquences environnementales en seraient inacceptables;
- une attitude d'attentisme n'est pas acceptable pour évaluer les changements climatiques définitifs et, par conséquent, pour élaborer une stratégie qui permettra de réagir aux circonstances changeantes;
- les scénarios d'utilisation de l'énergie développés pour le Canada et pour le monde montrent que même les scénarios les plus optimistes impliquent des augmentations sensibles de la température moyenne de la surface de la Terre;
- pour répondre à l'important accroissement de la demande énergétique sans conséquences environnementales majeures, il faudra considérablement augmenter le choix de sources d'énergie ainsi que l'efficacité de l'utilisation de l'énergie;

- le facteur fondamental qui permettra d'accroître le choix de sources d'énergie économiques et acceptables, ainsi que de réduire la demande énergétique, est le développement de nouvelles technologies;
- le coût d'approvisionnement en énergie devra toujours faire l'objet d'une considération particulière puisque certaines sources d'énergie parmi les plus souhaitables du point de vue environnemental sont aussi les plus coûteuses;
- une stratégie énergétique et durable, à long terme, doit satisfaire les besoins actuels sans compromettre les besoins des générations futures que ce soit aux plans économique, environnemental ou social;
- les complexités inhérentes au développement de nouvelles technologies adéquates impliquent des défis techniques immenses en ingénierie;
- l'Académie canadienne du génie peut apporter une contribution unique au débat et à l'élaboration d'une stratégie énergétique en faisant une évaluation critique des technologies énergétiques émergentes et en estimant leur potentiel à contribuer à la résolution du «problème» de l'énergie.

Le groupe de travail conclut que les sources d'énergie à base d'hydrocarbures pourront satisfaire la demande énergétique qui, selon les prévisions, aura sextuplé d'ici la fin du siècle. Le risque que l'utilisation de ces sources entraîne des effets importants sur le climat et donc sur l'environnement à l'échelle mondiale est toutefois trop important pour être acceptable.

Une stratégie énergétique et durable, à long terme, requiert un plus grand choix de sources d'énergie et de technologies énergétiques que celles présentement disponibles. Vu l'ampleur des défis que pose le développement de nouvelles technologies en énergie et compte tenu de l'expertise collective des membres de l'Académie canadienne du génie, il est évident que l'Académie peut jouer un rôle important dans l'évaluation non seulement des technologies existantes mais aussi de toute nouvelle technologie énergétique.

L'ÉNERGIE ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

- Une perspective canadienne en ingénierie -

INTRODUCTION

L'Académie canadienne du génie (ACG) est un organisme indépendant, autogéré et sans but lucratif – l'une des sociétés savantes du Canada. Le texte de la mission de l'Académie comprend l'énoncé suivant:

«rehausser le bien-être et la création de la richesse au Canada... en... émettant des avis sur des sujets relevant de l'ingénierie au Canada et à l'étranger».

Un approvisionnement en énergie adéquat et sûr est essentiel au bien-être de toute société moderne. La plupart des membres d'une telle société savent maintenant à quel point la demande énergétique croissante a commencé à affecter le climat à l'échelle locale, régionale et mondiale. Comme les systèmes énergétiques dépendent dans une large mesure de la technologie, la question de **l'énergie et du changement climatique** est un sujet tout indiqué pour une académie du génie.

Le comité de développement et de mise en oeuvre de l'ACG a établi en septembre 2000 un petit groupe de travail pour entreprendre une étude sur l'énergie et le changement climatique. Dans la première phase de l'étude, le groupe de travail a compilé et analysé des données existantes sur l'offre et la demande énergétiques actuelles et projetées au Canada et à l'échelle mondiale pour bien cerner la question. Le présent rapport présente un survol des résultats de la première phase de l'étude.

Tirant parti du vaste réservoir de connaissances et d'expertise de ses membres, l'Académie est en mesure, avec un appui financier modeste provenant d'autres agences et organismes qui s'intéressent au développement d'une stratégie énergétique à long terme et durable, d'apporter une contribution au développement d'une telle stratégie pour le Canada et pour d'autres pays.

L'objectif ultime de cette étude de l'Académie est de fournir des informations impartiales, fiables et à jour sur les technologies pertinentes à la demande et l'offre énergétiques. Ces informations visent d'une part les décideurs des secteurs public et privé et, d'autre part, le public en général. L'Académie considère que des informations techniques sûres sont essentielles au développement d'une stratégie énergétique et durable, à long terme.

Le présent rapport n'examine pas l'ensemble de la situation énergétique au Canada et à l'échelle mondiale, mais donne plutôt des exemples des conditions actuelles et projetées. Le rapport vise à fournir des arguments qui alimenteront une discussion sur le besoin d'une stratégie énergétique à long terme durable. Le concept d'une *stratégie énergétique et durable, à long terme*, doit être défini pour qu'il puisse y avoir des discussions informées sur le concept.

Dans la proposition originale de l'étude au Conseil d'administration de l'Académie, le comité a donné à la *durabilité* la définition employée dans plusieurs publications internationales:

praticabilité (disponibilité et accessibilité de chaque option énergétique), et acceptabilité (acceptabilité sociale, dans son sens le plus large, incluant la protection de l'environnement - particulièrement la minimisation des changements climatiques dus aux émissions de gaz à effet de serre - la santé et la sécurité du public, ainsi que l'équité envers les fournisseurs et les consommateurs)

En termes plus simples, la durabilité est définie ici comme étant *pratique* (disponible et accessible) et *acceptable* (socialement, environnementalement et économiquement). La définition de durabilité comporte plusieurs options dictées par le marché non seulement dans le terme «économique», mais aussi dans les termes «pratique» et «acceptable», ces deux termes étant fondamentaux à une économie dictée par le marché. Ce qui n'est pas pratique ou acceptable ne se vendra pas.

Seuls les facteurs sociaux et environnementaux suggèrent le besoin d'une vision et d'un engagement à long terme pour l'établissement d'un programme de R & D stratégique qui satisfera la notion de durabilité. Il serait souhaitable d'ajouter à l'équation le terme *durable*, signifiant que l'énergie doit être disponible pour satisfaire les besoins présents et futurs.

La notion de durabilité suppose une utilisation continue et efficace de l'énergie basée sur une production suffisante, sans effet négatif sur la société d'aujourd'hui ou de demain. Cette notion implique aussi une multiplication des choix énergétiques, non seulement en termes de développement de nouvelles sources d'énergie, mais aussi de développement de nouvelles technologies de conversion et d'utilisation de ces sources. La durabilité n'implique pas seulement les questions d'environnement et de climat. C'est aussi une question fondamentale de durabilité de l'avenir énergétique à l'échelle mondiale. Pour citer le rapport de 1987 de la Commission Brundtland: «Le développement durable peut satisfaire les besoins actuels sans compromettre les besoins des générations futures».

LE CLIMAT DE LA TERRE

Selon un rapport récemment publié par le *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* (GEIEC) des Nations Unies, «il y a au moins 90 % de certitude que les températures continueront à augmenter» si aucun changement n'est apporté au système énergétique (réf. 1). Les figures 1 et 2, préparées à l'aide d'informations tirées du rapport du GEIEC, montrent comment les données recueillies d'une grande diversité de sources indiquent une forte influence humaine sur les températures moyennes de la Terre au cours des 140 et des 1 000 dernières années, et mettent en évidence la concentration de trois gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère terrestre depuis le début du 19^e siècle, soit l'ère industrielle.

La figure 1a présente les moyennes des températures annuelles sur des périodes de 10 ans. Au cours du dernier siècle, la température globale de la surface de la planète semble avoir augmenté de 0,6 °C environ.

La figure 1b donne les températures de surface moyennes de l'hémisphère nord, par tranches de

50 ans, pour les 1 000 dernières années. Ces informations ont été recrées à partir de données indirectes (cercles de troncs d'arbres, coraux et carottes de glace) pour la période antérieure à 1850, mais calibrées contre des données thermométriques pour la période de 1850 à 1950, des données thermométriques fiables étant disponibles depuis 1850. Bien que la précision des données plus anciennes soit moins sûre, il est néanmoins évident que le rythme de réchauffement au cours du 20^e siècle est plus rapide qu'au cours de tout autre des neuf siècles précédents. Les années 1990 représentent la décennie la plus chaude, et l'année 1998 l'année la plus chaude du millénaire.

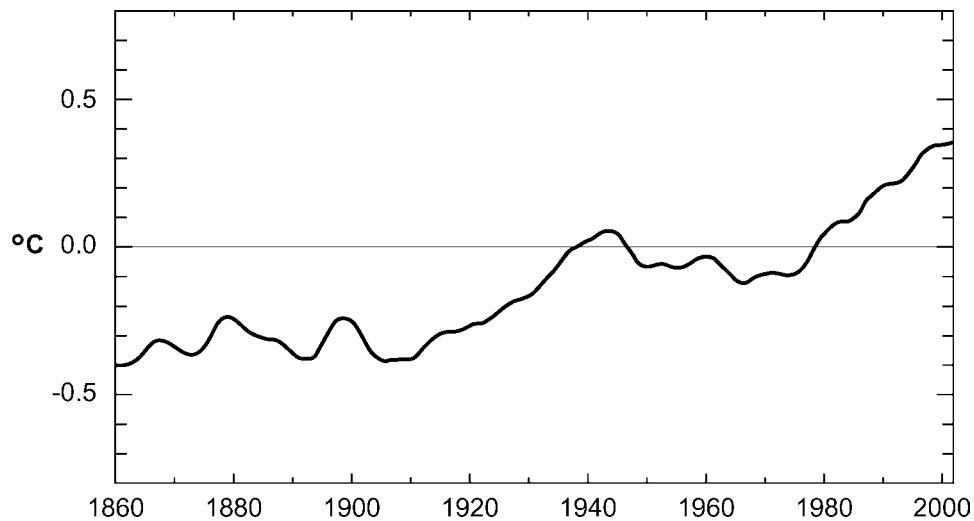


Figure 1a. Variations de la température de la surface de la Terre pour les 140 dernières années.

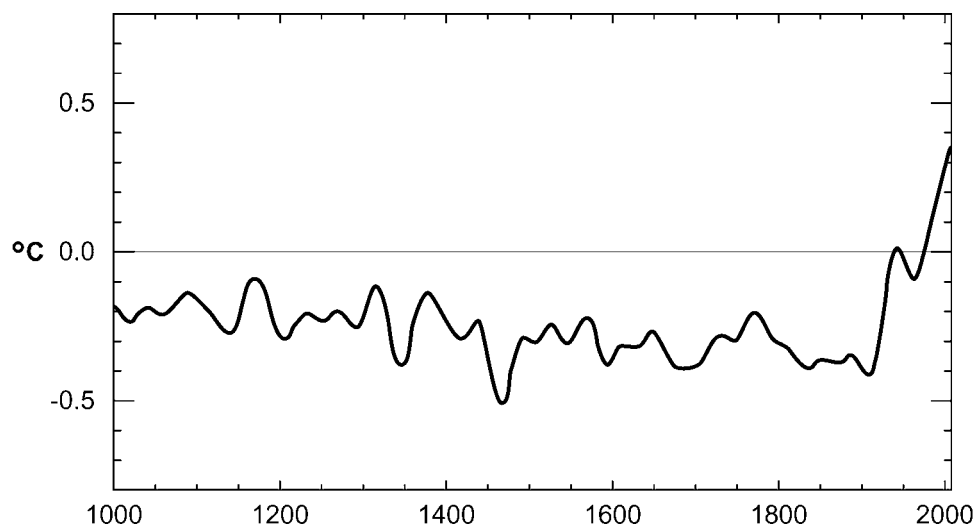


Figure 1b. Variations de la température de la surface de la Terre pour les 1 000 dernières années.

La figure 2 indique l'influence humaine sur l'atmosphère depuis le début de l'ère industrielle. Des données de gaz à effet de serre (en ppm/ppb) de carottes de glace de plusieurs endroits de l'Antarctique et du Groenland ont été complétées par des lectures atmosphériques directes faites au cours des dernières décennies pour établir un profil de température pour les 1 000 dernières années.

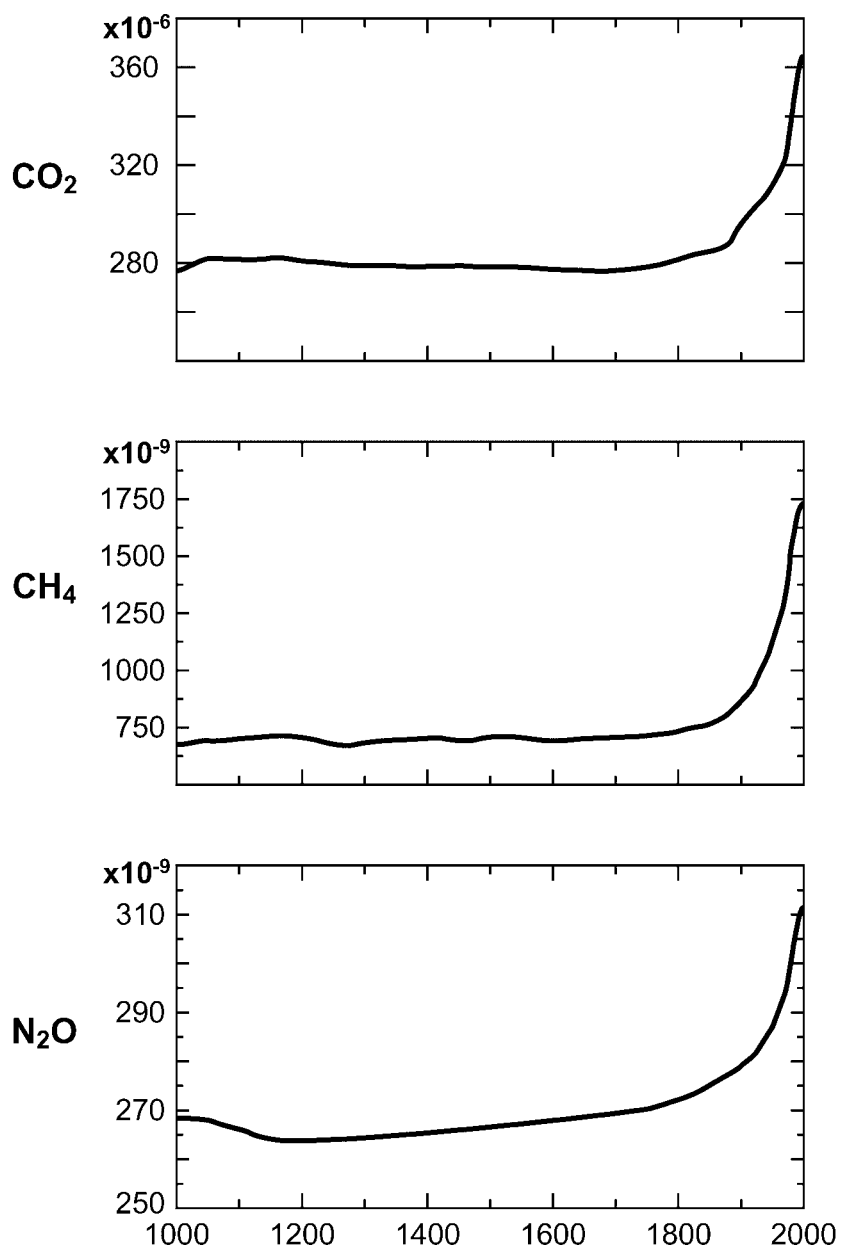


Figure 2. Concentrations atmosphériques globales de trois gaz à effet de serre.

Les académies des sciences de 17 pays, dont le Canada, ont récemment demandé «une action rapide pour réduire la production humaine des gaz à effet de serre qui réchauffent la planète». Il y a toutefois des scientifiques réputés qui doutent encore que les données recueillies soient suffisantes pour justifier des changements importants au système énergétique actuel, principalement en raison des conséquences économiques considérables liées à de tels changements. Le présent rapport ne cherche pas à résoudre cette très importante question. Il était vite devenu évident au groupe de travail que la grande majorité des documents scientifiques consultés démontrent que les activités humaines affectent le climat global. Selon la position adoptée par les membres du groupe de travail et appuyée par le conseil d'administration de l'Académie, toute étude d'une stratégie à long terme doit inclure la possibilité du changement climatique. Une approche prudente en ingénierie dicte qu'une attitude d'attentisme n'est pas acceptable car les risques sont trop nombreux. De plus, avec les technologies actuelles, le temps requis pour faire des changements importants au système énergétique est beaucoup trop long.

OFFRE ET DEMANDE ÉNERGÉTIQUES AU CANADA

On sait que les Canadiens et leurs voisins au sud sont les plus grands consommateurs d'énergie primaire per capita au monde. Les chiffres de consommation énergétique annuelle per capita pour 1998 illustrent clairement les grandes différences entre les diverses régions du globe (réf. 3) (1 GJ = 10^9 joules).

Amérique du Nord:	360 GJ
Europe, Japon:	190 GJ
Chine:	42 GJ
Afrique, Inde:	25 GJ

La différence marquée dans la demande énergétique entre l'Amérique du Nord et l'Europe, deux régions ayant le même niveau de développement, ne peut être que partiellement expliquée par les différences climatiques et géographiques (les hivers plus froids et les distances plus grandes entre les centres économiques). Il serait intéressant d'étudier les différences entre les demandes réelles plus en détail pour déterminer si la demande en Amérique du Nord peut être réduite par l'application de nouvelles technologies ou par des changements dans les modes de vie.

Demande énergétique

Dans la plus grande partie du dernier siècle, il existait une corrélation directe entre le PIB per capita d'une nation et son utilisation d'énergie primaire. La crise du pétrole des années 1970 a toutefois changé la situation. La conservation, des taux d'efficacité énergétique améliorés et le développement de nouvelles technologies ont permis d'augmenter le PIB per capita sans accroissement proportionnel de la demande énergétique. Pour le Canada, un taux de croissance économique annuel de 2 % environ au cours des 25 prochaines années se traduirait par un accroissement de 70 % du PIB. Pendant la même période, on estime que la population du Canada aura augmenté de 20 % environ. Par contre, la demande énergétique totale ne devrait

augmenter que de 25 % environ, avec très peu d'accroissement de la consommation énergétique annuelle per capita. La demande énergétique annuelle au Canada devrait donc passer des 8 000 PJ actuels à 10 000 PJ (1 péta-joule = 10^{15} joules) d'ici l'an 2025.

À l'heure actuelle, environ 42 % de l'énergie est utilisée pour des processus industriels, 25 % pour les transports, 30 % pour les bâtiments et 3 % pour des utilisations non énergétiques d'hydrocarbures comme la fabrication de produits (plastiques, etc.) (réf. 4). L'introduction de nouvelles technologies au cours des 25 prochaines années pourrait fort bien changer ces pourcentages d'utilisation de l'énergie. Il y a encore un fort potentiel de conservation d'énergie dans la conception de bâtiments commerciaux et industriels. L'arrivée de nouvelles technologies dans le secteur des transports pourrait aussi avoir un effet important sur la demande énergétique.

Offre énergétique

Après cette brève revue de la demande énergétique projetée au Canada pour les 25 prochaines années, il est également intéressant de regarder certaines tendances dans le système énergétique au Canada pour voir si l'on peut s'attendre à des problèmes importants.

Production et réserves de pétrole

Au cours de la dernière décennie, la production annuelle de pétrole au Canada s'est accrue de 25 % environ. Par contre, au cours des cinq premières années seulement de la dernière décennie (1990-1995), les exportations de pétrole vers les États-Unis ont augmenté de 95 %. Cette augmentation considérable a été en partie rendue possible par l'exploitation des sables pétrolifères dans l'ouest du pays. Les développements futurs prévus pour exploiter ces sables pourraient encore augmenter la production de brut synthétique de 600 %.

Par ailleurs, la production de pétrole au large de la côte est du Canada (Hibernia, Terra Nova) doit augmenter de 300 % environ. Les réserves prouvées de pétrole conventionnel au Canada seront suffisantes pendant une dizaine d'années, mais cette estimation ne reflète que les forages d'exploration qui avaient été jugés économiquement viables pour établir la taille des réserves de pétrole. En fait, les réserves totales du Canada sont estimées à 12 000 millions de tonnes (ou 500 000 PJ) (réf. 5). Si l'on tient compte des réserves non conventionnelles (sables pétrolifères et gisements marins), on estime que le Canada peut produire du pétrole pendant 400 ans encore.

Production et réserves de gaz naturel

Au cours de la dernière décennie, la production annuelle de gaz naturel au Canada a connu un accroissement de 45 % environ. Pour cette même période, les exportations de gaz naturel aux États-Unis ont augmenté de 250 %. Il existe aussi d'autres réserves de gaz naturel dans la vallée du Mackenzie et au large de la côte est du Canada. La pratique courante veut que l'on ait des réserves prouvées de gaz naturel pour 30 ans. Les réserves totales du Canada, incluant les réserves en mer, sont estimées à $8\,000 \times 10^9 \text{ m}^3$ (ou $300 \times 10^6 \text{ PJ}$) (réf. 5).

Production et réserves de charbon

Le charbon représente, en général, l'option de production d'énergie électrique la plus économique. Ceci est vrai au Canada et dans la plupart des autres parties du monde. Trois nouvelles centrales thermiques au charbon sont d'ailleurs prévues ou déjà en construction en Alberta, pour une capacité totale de 1 700 MW. Les réserves totales de charbon au Canada sont estimées à 21 000 millions de tonnes (ou 600 000 PJ) (réf. 5).

Autres sources d'énergie et leurs réserves

Environ 78 % de l'énergie consommée au Canada provient de sources à base d'hydrocarbures (pétrole, gaz naturel et charbon).

Au Canada, la source la plus importante d'énergie autre que les hydrocarbures est l'énergie électrique, avec une production annuelle de 350 TWh d'électricité, soit 1 200 PJ ou environ 15 % de la demande énergétique totale. Le potentiel total de l'énergie hydroélectrique au Canada est estimé à 650 TWh, ou deux fois la puissance totale installée actuelle (réf. 5).

L'énergie nucléaire vient ensuite, avec une production de 100 TWh environ d'électricité par an, soit 350 PJ ou environ 4,5 % de la demande énergétique totale (réf. 6). Le Canada renferme les gisements d'uranium parmi les plus riches au monde, et le potentiel d'accroissement de cette source d'énergie est encore élevé au Canada et à l'étranger.

D'autres sources d'énergie qui ne sont pas à base d'hydrocarbures, souvent appelées *renouvelables*, comprennent l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie marémotrice et la bioénergie. À l'heure actuelle, ces sources ne contribuent qu'une partie relativement petite de l'énergie requise au Canada, mais leur potentiel est important.

La première phase de cette étude n'incluait pas une évaluation des diverses technologies énergétiques inhérentes au développement de sources d'énergie renouvelables, de la conservation et de l'efficacité énergétique, ou de toute autre nouvelle source d'énergie. Une telle évaluation est prévue pour la deuxième phase de cette étude.

OFFRE ET DEMANDE ÉNERGÉTIQUES À L'ÉCHELLE MONDIALE

À l'heure actuelle, le Canada consomme environ 2,5 % de l'énergie primaire mondiale, mais produit environ 4,5 % de l'énergie produite mondialement. Il est clair que le Canada est l'un des exportateurs d'énergie nets du monde. Le Canada est aussi le cinquième producteur d'énergie après les États-Unis, la Russie, la Chine et l'Arabie Saoudite.

Comme nous l'avons mentionné plus tôt, les principaux moteurs de l'accroissement de la demande énergétique mondiale sont la croissance démographique et le développement économique. Selon les prévisions les plus récentes, la population mondiale devrait atteindre

environ 10 milliards vers la fin du siècle (la population actuelle se situe autour des 6 milliards). La figure 3 estime la population mondiale entre 9 et 12 milliards d'ici l'an 2100 (réf. 7).

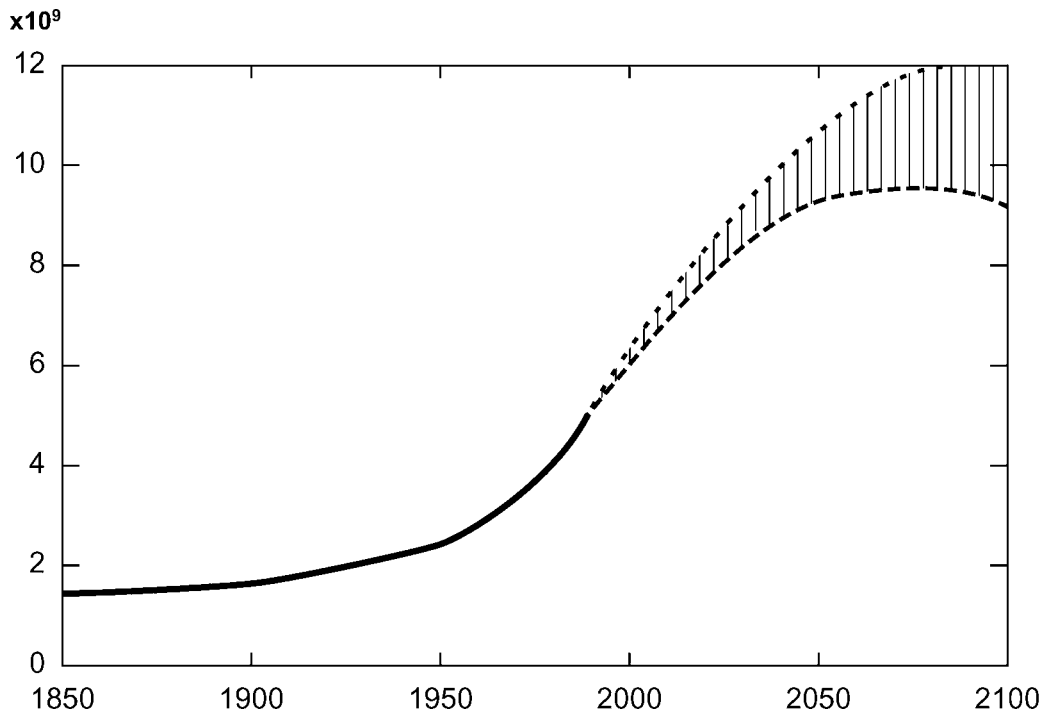


Figure 3. Estimations de la population à l'échelle mondiale

Le PIB per capita, qui représente la croissance économique, est un chiffre beaucoup plus important que la population. Alors que le taux de croissance économique annuel moyen des pays développés se situe à 2 %, les grands pays en voie de développement devraient connaître un accroissement annuel du PIB per capita pouvant atteindre 8 % par an. Ensemble, l'accroissement démographique et la croissance économique vont quadrupler ou quintupler la demande en énergie primaire au cours des 100 prochaines années (réf. 7). Il est important de noter que cette augmentation de la demande proviendra presque entièrement des pays en voie de développement et qu'on suppose que les nouvelles technologies seront exploitées de manière à utiliser l'énergie aussi efficacement que possible. On ne s'attend pas à ce que la croissance économique de 2 % des pays développés mène à un accroissement correspondant de la demande énergétique en raison du développement continu et de l'introduction de nouvelles technologies à haut rendement énergétique et de nouvelles mesures de conservation d'énergie.

La demande énergétique primaire mondiale en 1998 était de l'ordre de 400×10^3 PJ (réf. 7). L'accroissement estimé de cette demande par un facteur de 4 ou 5 au cours des 50 à 100 prochaines années ne pourra être satisfait par des sources à base d'hydrocarbures que s'il y a une augmentation considérable de production de charbon et de pétrole brut synthétique extrait de sables pétrolifères. (Les réserves mondiales de charbon exploitable sont estimées à 10^{12} tonnes, ou environ 30×10^6 PJ. Les réserves mondiales de pétrole non conventionnel sont estimées à 10^{12} barils, ou environ $5,7 \times 10^6$ PJ (réf. 5).

Les conséquences environnementales d'une telle stratégie seraient certainement inacceptables à tous les niveaux - local, régional et global - sans au moins l'introduction de nouvelles technologies. Les technologies actuelles permettant d'exploiter des processus propres de conversion d'hydrocarbures étant encore coûteuses, elles ne sont pas économiquement acceptables pour le marché. Le perfectionnement de technologies existantes ou le développement de nouvelles technologies d'exploitation de sources d'énergie alternative sont au coeur d'une stratégie énergétique et durable, à long terme.

UTILISATION FUTURE DE L'ÉNERGIE

La situation énergétique future décrite plus tôt porte à conclure qu'il faut développer d'autres scénarios qui permettront de satisfaire l'accroissement de la demande énergétique sans causer de problèmes environnementaux, sociaux et économiques importants. Cette étude comprend un bref survol de certains scénarios développés par divers organismes pour mieux comprendre les nombreux facteurs qui influenceront la manière dont le monde évoluera et qui identifient des opportunités pour le Canada dans ce contexte évolutif. Ces scénarios ne sont ni des prédictions ou des prévisions. Un scénario particulier allie simplement diverses sources d'énergie, diverses conditions économiques et diverses opportunités technologiques. Plusieurs organisations ont développé des scénarios de l'avenir énergétique à long terme.

Scénarios pour l'avenir énergétique canadien

L'un des scénarios les plus récents pour le Canada a été formulé par Ressources naturelles Canada (RNCCan): **Avenir des technologies énergétiques (ATE) 2050**. ATE 2050 a été élaboré en consultation avec plusieurs experts nationaux et internationaux en énergie. Les divers scénarios proposent des représentations de la situation énergétique du Canada dans les 30 à 50 prochaines années (réf. 8).

Trois moteurs distincts ont été identifiés pour développer quatre scénarios qui peuvent sembler quelque peu extrêmes. Ces trois moteurs sont:

- (1) *l'étiquette environnementale*, pour refléter l'importance perçue des enjeux environnementaux. Lorsque la réaction à ces enjeux est faible, l'étiquette environnementale est dite «grise». En présence d'un haut degré de sensibilisation, qui entre en ligne de compte dans le processus décisionnel, l'étiquette est dite «verte»;
- (2) les *marchés*, pour mesurer la mondialisation des marchés. Lorsque les produits et les capitaux circulent librement à travers les frontières, les marchés sont dits «ouverts». Lorsque les nations se concentrent sur des enjeux internes seulement, les marchés sont dits «fermés»;

- (3) le *rythme de l'innovation*, pour refléter la vitesse à laquelle le Canada génère, développe et met en marché de nouvelles idées sur le marché. Un rythme d'innovation lent freine la croissance économique alors qu'un rythme rapide tend à augmenter le taux de changement des investissements en matière d'infrastructure énergétique pour accepter l'intégration de nouvelles technologies.

Les quatre scénarios ont été développés en fonction d'une population de 44 millions, au Canada, d'ici l'an 2050. Les circonstances démographiques vont alors exiger l'adaptation de notre système de services énergétiques aux plans de la mobilité et des besoins de chauffage et de refroidissement, par exemple.

Les quatre scénarios développés pour le Canada en 2050 se définissent comme suit:

- (1) *Le je-m'en-foutisme*: reflétant un rythme d'innovation lent, des marchés fermés et une étiquette environnementale grise (souvent appelé «roulement quotidien des affaires»)
- (2) *Chercher à saisir*: reflétant un rythme d'innovation lent, des marchés ouverts et une étiquette environnementale verte.
- (3) *Les affaires d'abord*: reflétant un rythme d'innovation rapide, des marchés ouverts et une étiquette environnementale grise.
- (4) *La macroscopie*: reflétant un rythme d'innovation rapide, des marchés ouverts et une étiquette environnementale verte.

Pour chacun de ces quatre scénarios, ATE 2050 a établi les demandes énergétiques avec divers mix de combustibles et les émissions de gaz à effet de serre résultantes par secteur. Les résultats sont illustrés aux figures 4 et 5. Ils montrent que la demande en énergie primaire d'ici l'an 2050 pourra varier d'un peu plus de 10 000 PJ seulement pour le scénario macroscopie, avec 53 % de combustibles fossiles, jusqu'à 16 000 PJ pour le scénario je-m'en-foutiste, avec 82 % de combustibles fossiles.

Les différences entre les émissions de GES sont encore plus marquées, soit entre un peu plus de 200 millions de tonnes de CO₂ pour le scénario macroscopie et plus de 1 000 millions de tonnes de CO₂ pour le scénario je-m'en-foutiste. Le niveau actuel des émissions de GES se situe à 600 millions de tonnes/an environ (réf. 9).

Les méthodes employées pour développer ces scénarios ne tiennent pas compte d'événements extraordinaires comme les grandes catastrophes naturelles ou des bouleversements géopolitiques entraînant des guerres à grande échelle.

Les scénarios doivent servir de points de départ de discussions sur le développement de stratégies énergétiques nationales et internationales. Ils ont été inclus dans le présent rapport strictement à titre d'exemples des outils disponibles pour stimuler des discussions sérieuses.

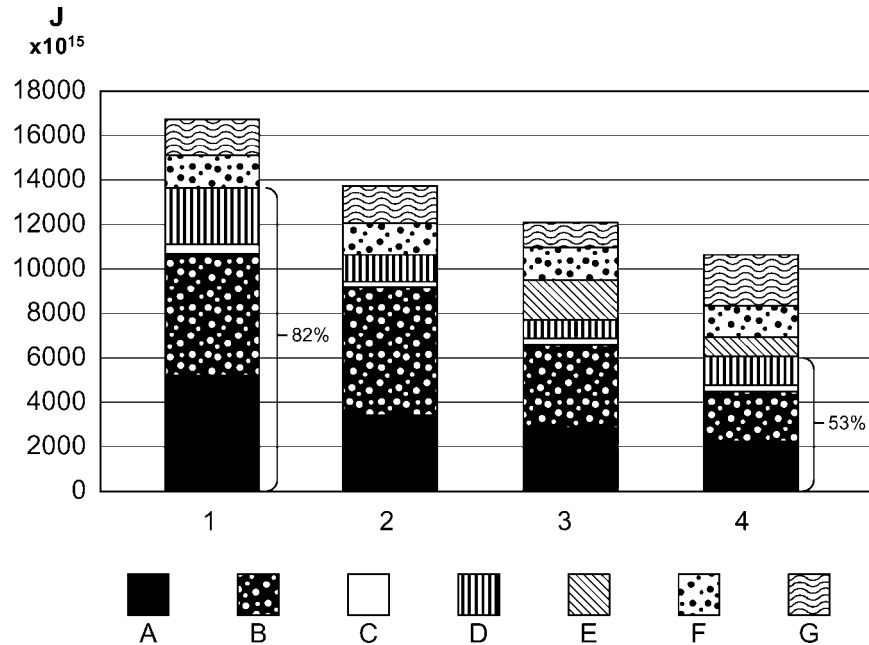


Figure 4. Demande en énergie primaire par type de combustible en 2050 pour quatre scénarios canadiens: (A) pétrole (B) gaz (C) émissions de pétrole sous forme liquide (D) charbon (E) énergie nucléaire (F) énergie hydroélectrique (G) énergie renouvelable

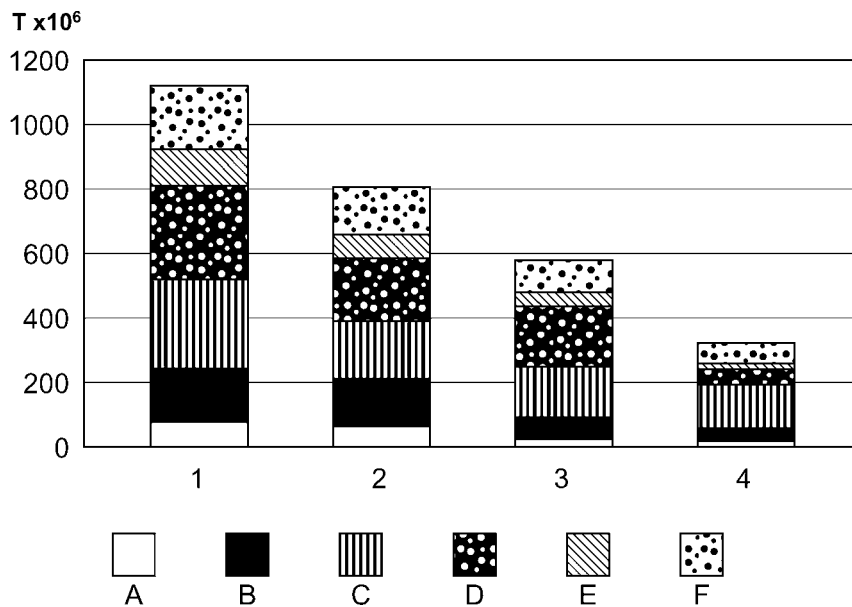


Figure 5. Émissions de CO₂ par secteurs d'utilisation en 2050 pour quatre scénarios canadiens: (A) bâtiments (B) industrie (C) transport (D) production de l'électricité (E) production de combustibles fossiles (F) produits non énergétiques

Scénarios pour l'avenir énergétique mondial

À l'instar de l'étude ATE 2050 de RNCAN des scénarios possibles pour la situation canadienne, d'autres organismes internationaux ont réalisé des études établissant des scénarios énergétiques globaux. Les diverses études tendent à produire des scénarios semblables. L'étude la plus détaillée a été réalisée par l'**International Institute of Applied Systems Analysis (IIASA)** avec la coopération du **Conseil mondial de l'énergie (CME)**. L'étude est résumée ci-après (réf. 7).

L'étude de l'IIASA a développé des scénarios pour trois principaux cas, soit A, B et C, avec trois sous-éléments dans le cas A et deux sous-éléments dans le cas C.

- A: **Croissance économique élevée** - forte exploitation de la technologie et des ressources, pas de limite d'émissions de CO₂
 - A1: grande disponibilité future de gaz naturel et de pétrole
 - A2: rareté du gaz naturel et du pétrole, retour massif au charbon
 - A3: des changements technologiques rapides mènent à une utilisation accrue de sources d'énergie nucléaire et renouvelable et à un abandon graduel des combustibles fossiles pour des raisons économiques plutôt qu'en raison de la rareté des ressources (ce scénario est parfois appelé *bio-nucléaire*)

- B: **Statu quo** - peu de changement, pas de limite d'émissions de CO₂

- C: **Scénario écologique** - grande utilisation de combustibles non fossiles
 - C1: l'énergie nucléaire est une technologie transitoire qui sera entièrement abandonnée d'ici la fin du 21^e siècle
 - C2: une nouvelle génération de réacteurs nucléaires sécuritaires est développée et jouit d'une grande acceptation sociale.

Le cas A présente un avenir caractérisé par des progrès technologiques et économiques considérables. Il repose sur la conviction qu'il n'y a essentiellement pas de limite à l'ingéniosité humaine et suppose une situation géopolitique favorable et des marchés libres. D'ici l'an 2100, il n'y aura plus de distinction entre les pays développés et en voie de développement.

Le cas B représente un scénario plus modeste et plus pragmatique que le cas A. Tous les développements, économiques et technologiques, surviennent à un rythme plus lent (et probablement plus réaliste). Ce scénario prévoit une importante utilisation continue de ressources fossiles et l'exploitation de grandes quantités de ressources d'hydrocarbures non conventionnelles.

Le cas C est celui qui pose le plus grand défi. Il est optimiste quant à la situation géopolitique et la technologie. Contrairement au cas A, il suppose une coopération internationale sans précédent axée explicitement sur la protection de l'environnement et l'égalité des nations.

Le tableau suivant résume les caractéristiques des six scénarios. La figure 6 donne les chiffres de la demande énergétique primaire pour les cas A, B et C. La figure 7 présente les

concentrations atmosphériques de CO₂ résultantes.

	Cas A	Cas B	Cas C
Croissance économique	Forte	Moyenne	Faible (nord) Élevée (sud)
Progrès technologique et disponibilité des ressources	Élevés	Moyens	Faibles (fossiles) Élevés (non fossiles)
Limites d'émissions de CO₂	Non	Non	Oui
Nombre de scénarios	3	1	2

Tableau 1. Caractéristiques de six scénarios pour l'avenir énergétique à l'échelle mondiale.

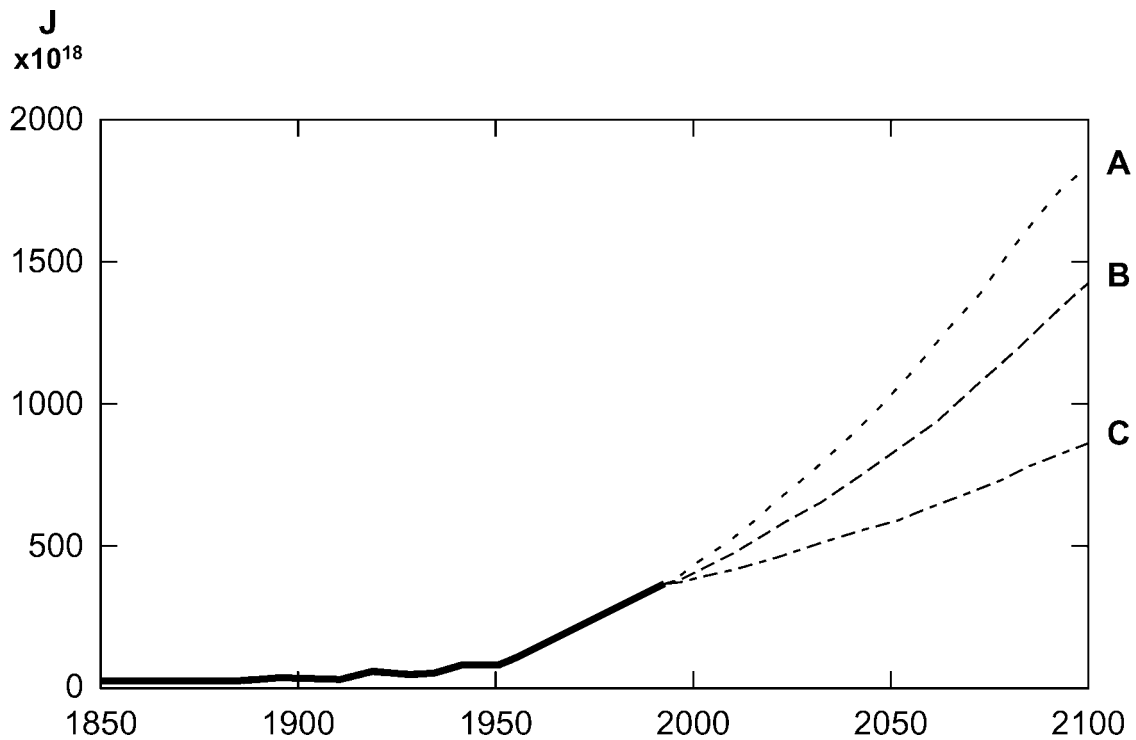


Figure 6. Demandes mondiales en énergie primaire jusqu'en 2100

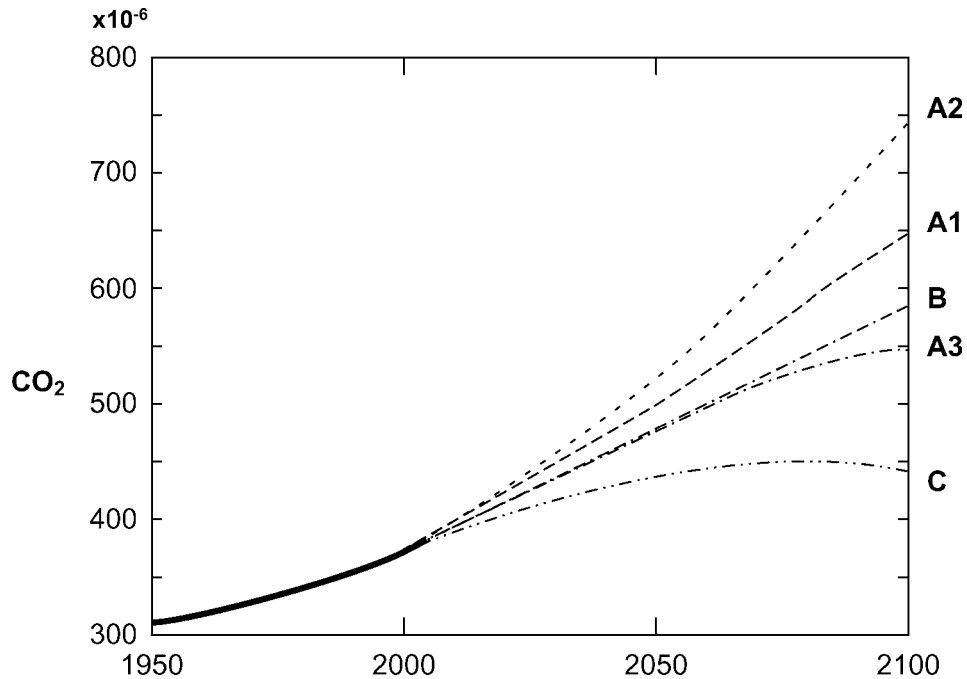


Figure 7. Concentrations atmosphériques de CO₂ à l'échelle mondiale jusqu'en 2100

DISCUSSION

Le présent rapport présente des informations sur les questions d'énergie et de climat, recueillies pour alimenter les discussions sur le besoin de développer une stratégie énergétique et durable, à long terme, pour le Canada et à l'échelle mondiale. La première version du rapport a été présentée aux membres de l'Académie lors de l'assemblée générale annuelle qui a eu lieu à Calgary le 1^{er} juin 2001. Les discussions et les commentaires des membres ont été très utiles à la rédaction de ce chapitre du rapport.

Le besoin d'une stratégie énergétique et durable, à long terme, est essentiellement stimulé par la croissance démographique et l'accroissement du PIB. Les scénarios de l'avenir énergétique mentionnés plus tôt dans ce rapport et qui peuvent répondre à cette croissance sans compromettre les besoins de générations futures s'appuient fortement sur le développement de nouvelles technologies ou sur le perfectionnement de technologies existantes, en matière d'énergie.

L'évolution des systèmes énergétiques à l'échelle de la planète au cours du prochain siècle sera influencée par plusieurs facteurs dont:

- les changements dans le mix de sources d'énergie
- le nombre de véhicules sur les routes (plus de 1 milliard d'ici l'an 2020)
- le remplacement des moteurs à combustion interne par des piles à combustibles

- l'évolution d'une économie à base biologique
- la conversion plus efficace des combustibles fossiles en électricité (décarbonisation)
- le développement de systèmes de captage et de séquestration de CO₂
- des véhicules de nouvelle génération à haut rendement énergétique

Pour tous ces facteurs, le défi qui se pose est le développement de nouvelles technologies ou l'amélioration de technologies existantes à un coût raisonnable. Voici quelques exemples de ce qui a déjà été réalisé ces dernières années (réf. 7):

- le coût de l'énergie éolienne a été réduit de 30 % environ au cours de la dernière décennie
- le coût de production d'éthanol à partir de biomasse a été réduit de plus de 70 % depuis 1975
- le coût de l'énergie thermique solaire a été réduit de 15 % environ au cours de la dernière décennie
- le coût de l'énergie photovoltaïque solaire a été réduit de 20 % environ au cours des deux dernières décennies

Ces réductions de coûts suivent la courbe traditionnelle pour les nouvelles technologies. À l'étape de la R & D, les coûts sont évidemment très élevés et ne constituent pas un facteur réel d'un point de vue économique. L'étape suivante d'une nouvelle technologie est l'étape de la démonstration où les coûts tendent à diminuer rapidement, ce qui permet d'entreprendre l'étape d'apprentissage ou d'expérimentation. À cette étape de l'introduction d'une nouvelle technologie, le coût d'investissement baisse de 20 % environ chaque fois que la production d'énergie double. Les sources d'énergie renouvelable (énergie éolienne, énergie solaire et bioénergie) sont encore à l'étape d'apprentissage où le coût d'investissement baisse de 20 % pour chaque doublement de la production. L'étape d'apprentissage est suivie par l'étape de production commerciale où la technologie a été acceptée sur le marché comme alternative viable, pas nécessairement pour des raisons économiques, mais des raisons sociales, environnementales ou de sécurité, par exemple. Pendant cette étape, les coûts d'investissement peuvent encore chuter, mais cette fois à un rythme de 10 % environ chaque fois que la production double. C'est selon cette courbe de coûts bien établie pour les technologies en voie de développement que de nouvelles technologies peuvent commencer à concurrencer avec les technologies existantes strictement sur le plan économique.

La turbine à gaz aéro-dérivée est un exemple de technologie énergétique entièrement développée qui a atteint l'étape de production commerciale. Originellement conçue comme réacteur pour avions militaires, cette *nouvelle* technologie a été adaptée pour la production d'énergie dans les années 1950 pour devenir un produit commercial dans le secteur de l'énergie vers le milieu des années 1960. Jusqu'à la commercialisation de la turbine, le taux de diminution des coûts était de l'ordre de 20 % par doublement de la production, pour tomber à 10 % lorsque la turbine à gaz aéro-dérivée est devenue un produit commercial employé pour la conversion d'énergie.

Lors du développement d'une stratégie énergétique, il est important de connaître les coûts comparatifs de l'énergie livrée provenant de diverses sources. Ces coûts dépendent des coûts

d'investissement originaux et des coûts d'exploitation. Le tableau suivant donne les coûts d'investissement tirés des données recueillies et dont les moyennes ont été établies par l'IIASA et le CME pour plusieurs installations dans plusieurs pays (réf. 7).

Technologie	\$US (1990)/kW
Turbine à gaz à cycle simple	250
Énergie éolienne	1 250
Biomasse	1 500
Énergie nucléaire	2 000
Énergie thermo-solaire	2 750
Énergie photovoltaïque solaire	4 250

Il est intéressant de noter que les coûts d'investissement pour les installations productrices d'énergie à turbine à gaz sont encore considérablement plus faibles que ceux de technologies d'exploitation d'énergie renouvelable ou de l'énergie nucléaire.

CONCLUSIONS

Sachant que la demande mondiale en énergie augmentera de 600 % d'ici la fin du siècle, nous aurons besoin d'un vaste choix d'options énergétiques. Les défis techniques et les complexités des technologies requises pour assurer un avenir énergétique et durable sont immenses.

Outre les difficultés technologique liées à une stratégie énergétique à long terme, plusieurs autres facteurs doivent être considérés dans le développement d'une stratégie nationale. L'un de ces facteurs, qui a d'ailleurs été traité avec un degré de priorité élevé lors de l'assemblée générale annuelle de l'Académie, est la souveraineté ou l'indépendance du Canada compte tenu du rôle relativement important des États-Unis au niveau des exportations d'énergie du Canada.

L'énergie ne peut pas être adéquatement traitée d'une manière isolée. Le libre-échange est probablement l'une des politiques les plus importantes à considérer dans le développement d'une stratégie énergétique. L'avenir de l'approvisionnement en eau potable, par exemple, est un autre aspect à considérer dans l'élaboration d'une politique énergétique. Quelle que soit la politique adoptée, elle doit être suffisamment flexible pour s'ajuster aux circonstances changeantes.

Le point central d'une stratégie énergétique à long terme doit être la durabilité telle que définie dans le présent rapport, et solidement basée sur une politique économiquement responsable.

Le groupe de travail conclut que les sources d'énergie à base d'hydrocarbures pourront satisfaire la demande énergétique qui, selon les prévisions, aura sextuplé d'ici la fin du siècle. Le risque que l'utilisation de ces sources entraîne des effets importants sur le climat et donc sur l'environnement est toutefois trop important pour être acceptable.

Une stratégie énergétique et durable, à long terme, requiert un plus grand choix de sources

d'énergie et de technologies énergétiques que celles présentement disponibles. Vu l'ampleur des défis que pose le développement de nouvelles technologies et compte tenu de l'expertise collective des membres de l'Académie canadienne du génie, il est évident que l'Académie peut jouer un rôle important dans l'évaluation non seulement des technologies existantes mais aussi de toute nouvelle technologie énergétique.

RÉFÉRENCES

1. *Sommaire technique du Groupe de travail I*, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GEIEC), 2001
2. *Répertoire des membres*, Académie canadienne du génie, 2001
3. *Energy for Tomorrow's World - Acting Now*, Énoncé 2000 du Conseil mondial de l'énergie, 2000
4. Communication privée entre le Groupe de travail de l'ACG sur l'énergie et le changement climatique et Global Change Strategies International Inc, 2001
5. *Relevé des ressources énergétiques*, Conseil mondial de l'énergie, 1998
6. *Nuclear Sector Focus - A Summary of Energy, Electricity and Nuclear Data*, Énergie atomique du Canada Ltée, 1999
7. *Global Energy Perspectives*, International Institute of Applied Systems Analysis (IIASA) et le Conseil mondial de l'énergie (CME), édité par Nebojsa Nakicenovic, Arnulf Grubler et Alan McDonald, 1998
8. *Canada 2050 - Quatre scénarios à long terme pour le système énergétique canadien*, Ressources naturelles Canada, www.nrcan.gc.ca/es/etf
9. *Technology Innovation for Mitigating Greenhouse Gas Emissions*, Document de la Table technologique, BRDE, RNCAN, 1998

ANNEXES

A. Membres du groupe de travail de l'ACG

Jon Jennekens
Joe Ploeg (président)
Terrance Rummery
Philip Cockshutt (membre d'office)
Ron Crotogino (après l'assemblée générale 2001)

B. Commanditaires de l'Étude sur l'énergie et le changement climatique

SNC-Lavalin inc.
Hydro-Québec
Imperial Oil Limitée
Ontario Power Generation
Gouvernement du Canada (Secrétariat du changement climatique)

C. Table de conversion

1 tep (tonne d'équivalent pétrole)	= 42 GJ = 11,67 x 10 ³ kWh
1 tec (tonne d'équivalent charbon)	= 29,3 GJ
1 000 m ³ de gaz naturel	= 36 GJ
1 000 kWh	= 3,6 GJ = 0,086 tep

Mega = 10⁶
Giga = 10⁹
Tera = 10¹²
Peta = 10¹⁵