

***Cibles de réduction des gaz à effet de serre à l'horizon 2020 :
Le Québec ne peut être qu'un leader!***

***Yvan Dutil, Ph.D.
Octobre 2009***

***Mémoire remis lors des Consultations particulières et auditions publiques à
l'égard du document intitulé « Le Québec et les changements climatiques :
Quelle cible de réduction d'émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2020? ».***

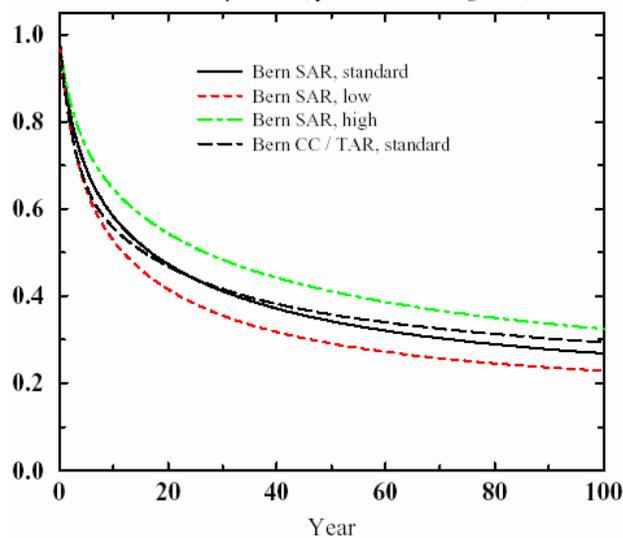
L'auteur est titulaire d'un doctorat en astrophysique. Il a travaillé comme chercheur postdoctoral en télédétection atmosphérique au centre de recherche de la défense de Valcartier ainsi qu'en astrophysique à l'Universitat Politècnica de Catalunya. Il a par la suite travaillé chez ABB Bomem dans le groupe d'ingénierie des systèmes où il a participé à la conception d'instruments de mesure spatiaux. Par la suite, il a enseigné au collégial et a été professeur associé au département de Physique, Génie Physique et Optique de l'Université Laval. Il est maintenant chercheur associé à la chaire *Chaire de recherche industrielle en technologies de l'énergie et en efficacité énergétique* (T3E) de l'École de technologie supérieure.

Quelles cibles viser selon les climatologues?

Il y a un consensus à l'heure actuelle visant à maintenir à ce que l'émission des gaz à effet de serre soit contrôlée de façon à limiter l'accroissement de la température globale de la Terre à 2°C par rapport à son niveau historique. Il est à noter que cet accroissement moyen se refléterait par une augmentation de ~4°C sur les continents et de ~8°C dans l'arctique. Jusqu'ici l'accroissement de la température globale a été de l'ordre de 0,6°C.

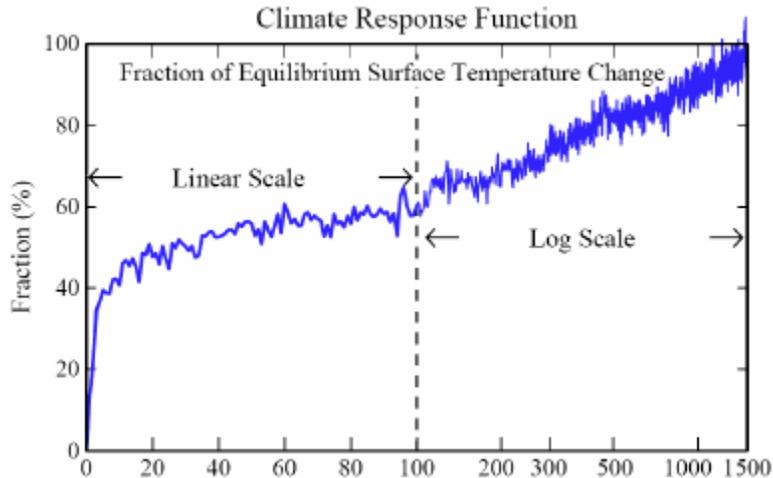
Cette limite est basée sur des considérations technique fondamentale. En effet, il y a 50 ans, les puits de carbone naturels enlevaient 600 kg de CO₂ pour chaque tonne émise. Aujourd'hui, ils n'en absorbent plus que 550 kg. (Canadell et al 2007) et on s'attend que cette quantité diminue (J. L. Sarmiento et al 1998 ; Friedlingstein et al. 2006). De plus, il y a aussi des risques de changements abrupts dans le comportement des puits de carbone. Ainsi, les changements climatiques pourraient entraîner la disparition de la forêt amazonienne (Cox et al. 2000) ou la fonte du pergélisol entraînant un relâchement des réserves de carbone (Dorrepaal et al. 2009).

Un aspect fondamental de la gestion des changements climatiques a fait surface au cours des dernières années : seule la production totale de gaz à effet de serre compte. En effet, les gaz à effet de serre ont une durée de vie très longue dans l'atmosphère et leur effet se fera sentir très longtemps après leur émission. Ainsi après un siècle environ le quart du gaz carbonique est encore présent (Joos et al 1996).



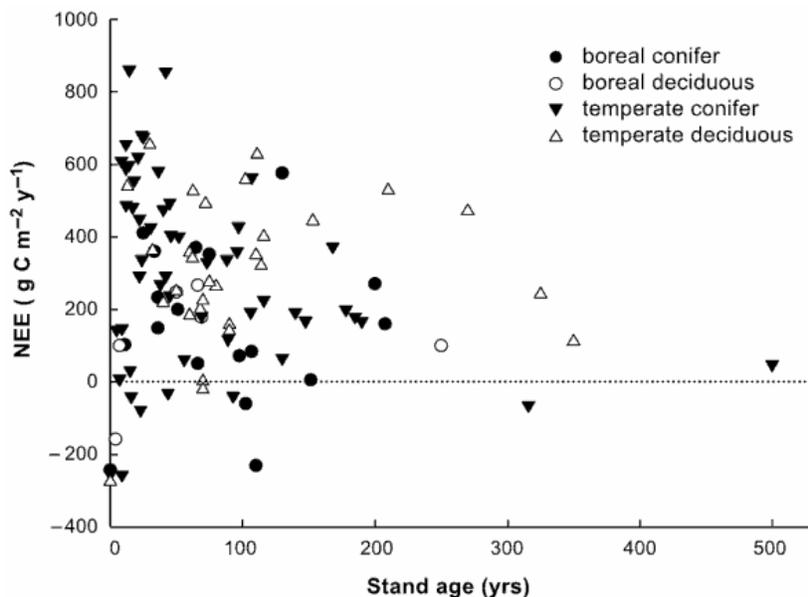
Absorption du CO₂ dans l'environnement (Joos et al. 1996)

De même, la température continuera d'augmenter longtemps après que l'on est cessé d'envoyer des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Un tiers de la réponse en température se produit en quelques années en raison de l'échauffement du sol, la moitié en 25 ans, les trois quarts en 250 ans et la réponse complète prend essentiellement un millénaire (Hansen et al. 2007).



Réponse en température du climat en fonction du temps (tiré de Hansen et al. 2007)

Étant donné la persistance très longue des gaz à effet de serres dans l’atmosphère, il peut être intéressant de vouloir accélérer ce processus. Toutefois, les schémas de capture du carbone ne sont efficaces que si les temps de séquestration sont plus longs que les cycles biologiques normaux. Dans le cas du Québec, étant donné la rareté des structures géologiques imperméables favorables au stockage du gaz carbonique, l’alternative serait d’utiliser la forêt comme puits de carbone. Il y a cependant un débat sur la meilleure approche à suivre. En effet, on pourrait conclure qu’en coupant les forêts matures ce qui favorise la croissance rapide de repousse on augmenterait la capture du carbone. En effet, si les forêts matures absorbent moins de carbone, elles continuent à absorber du carbone (voir graphique ci-dessous).



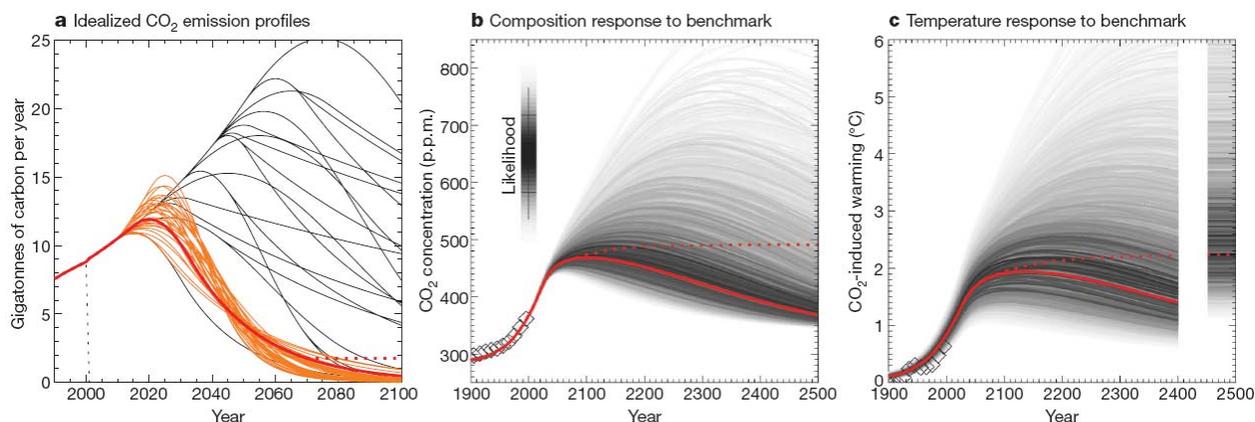
Flux de carbone dans les forêts en fonction de l’âge (tiré de Knohl, Schulze & Wirth 2009)

Or, dans la forêt boréale, la majorité du carbone est stocké dans le sol. Suite à coupe des arbres, la forêt devient une source de carbone pendant une dizaine d’années avant de redevenir un puits (Litvak et al. 2003, Kolari et al. 2004 ; Fredeen, Waughtal & Pypker 2007). Même une coupe

d'éclaircissement semble avoir un effet similaire (Giasson, Coursolle & Margolis 2006). Il est à noter que les coupes forestières ainsi que les incendies endommagent la capacité de la forêt à capturer du carbone si elles sont trop rapprochées (Gough et al. 2007). Par conséquent, pour maximiser la capture du carbone, les coupes forestières doivent être le plus distantes possible ; de l'ordre du siècle au Québec (Peng et al. 2002).

Dans le même ordre d'idée, la modification des pratiques agricoles offre un potentiel intéressant pour la réduction des gaz à effet de serre et la capture du carbone. En effet, l'agriculture est une source importante de gaz à effet de serre : CO₂, CH₄ et N₂O. Elle peut aussi capturer du carbone dans les produits agricole et le sol. Plusieurs pratiques agricoles peuvent améliorer les performances de l'agriculture. La minimisation du labourage permet d'économiser de l'énergie et peut contribuer à augmenter le stockage du carbone et la capture du méthane, tout en protégeant les sols de l'érosion. Un meilleur contrôle de l'apport en azote permet de minimiser les émissions de N₂O. De même, manipuler l'alimentation du bétail permet de réduire la production de CH₄ et N₂O. De même, l'incorporation de charbon organique dans le sol offre des gains en productivité tout en augmentant la charge de carbone du sol (Johnson et al. 2007).

Pour ce qui est des objectifs à viser, il y a maintenant un consensus que la masse totale de gaz à effet de serre émise depuis le début de l'ère industrielle ne doit pas excéder 1 billion de tonnes de carbone (10¹² tC) (Allen et al. 2009; England et al. 2009; Zickfeld et al. 2009; Meinshausen et al. 2009; Matthews et al. 2009). La conséquence de cette approche est qu'il faut diminuer maintenant de façon importante la production de gaz à effet de serre, tout retard obligeant de faire des réductions draconiennes dans le futur.



Scénario d'émission de gaz carbonique et réponse environnemental. Les lignes orange indiquent des scénarios d'émission de 1 TtC entre 1750 et 2500. La ligne rouge pleine représente le scénario de référence et la ligne pointillée une stabilisation de 440 ppm de la concentration de CO₂ (Tiré de Allen et al. 2009).

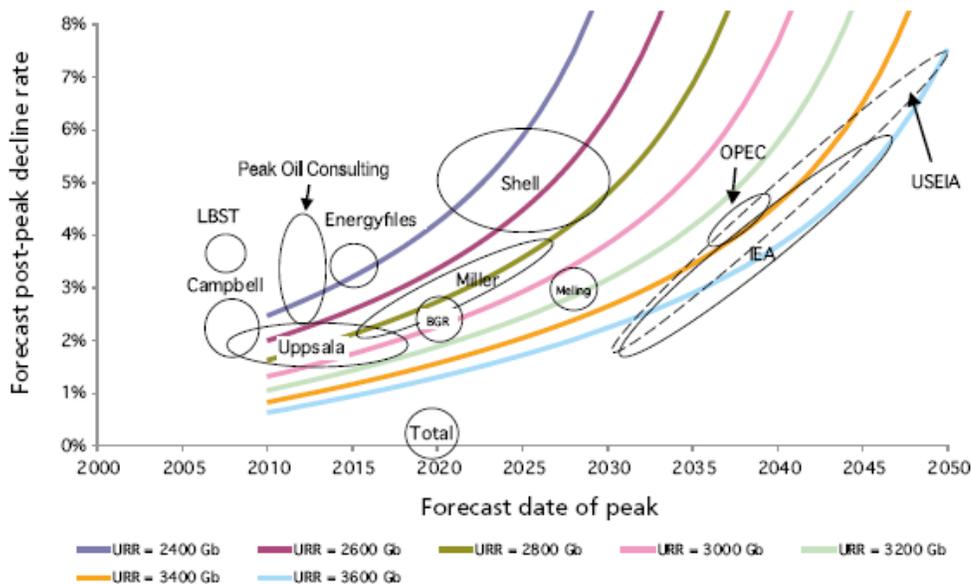
Afin de ne pas dépasser ce budget de carbone, les émissions mondiales devront atteindre environ 4 milliards de tonnes de carbone en 2009. Pour une population totale estimée de 9 milliards de personnes se place un budget de CO₂ à 1,6 t de CO₂ par habitant. Dans le cas du Québec, cela se traduit par une diminution de 84% en 40 ans, soit 4,5%/an! Ce genre de réduction est de l'ordre de proposition de certains chercheurs afin de protéger le climat à court et à long terme (Parry et al. 2008). En effet, une fois les émissions gaz à effet de serre stoppées, il faudra énormément de

temps pour que l'atmosphère et le climat s'en remettent (House et al. 2008; Lowe et al. 2009). Or, il y a un risque que si le climat reste pendant quelques siècles à une température élevée (~2°C), les facteurs de réponse à long terme du climat se mettent en branle (particulièrement la fonte des calottes polaires) ce qui amènera un doublement du réchauffement (~4°C).

Par conséquent, et par souci d'équité à la fois pour les générations futures de québécois et pour les habitants des pays émergents, le Québec devrait viser une réduction de 37% des émissions de gaz à effet de serre entre 2006 et 2020, soit environ **40% à partir de l'année de référence de 1990**.

Le risque d'un choc pétrolier

L'explosion des cours du pétrole en 2008 a remis la question du choc pétrolier en avant-scène. Ce risque est clair et reconnu par de nombreuses organisations (AIE 2009 ; Deutch Bank 2004 ; UK Energy Research Centre 2009). Selon les sources, une chute de la production mondiale de pétrole peut survenir à tout moment entre aujourd'hui et 2030. Cette chute produira un choc économique semblable à la crise actuelle.



Note: Iso-lines represent the assumed or implied global URR of conventional oil. Assumes rate of increase of production prior to the peak is 1.3%/year. Mapping of individual forecasts onto this graph involves some judgment (see Box 7.3 and Box 7.4).

Prediction de la date et de la pente finale de la production pétrolière mondiale (UK Energy Centre 2009)

Il est à noter que la mise en place de mesures préventives visant la réduction de la consommation de pétrole prendra au moins une vingtaine d'années à se mettre en place (Hirsch 2005) et qu'en conséquence, on ne peut qu'espérer amortir ce choc. Il est à noter que le Québec a manqué une opportunité à ce niveau en n'adaptant pas sa politique énergétique en conséquence. Face à ce danger, j'avais proposé que le Québec devienne indépendant du pétrole en 2025 (Dutil 2005) anticipant un peu sur le plan suédois. Dans tous les cas de figure, les mesures prises afin de

contrer le réchauffement climatique du même ordre que celle qu'il faudrait mettre en place pour faire face à ce choc pétrolier. La réduction rapide de la consommation d'hydrocarbure est donc à la fois un impératif environnemental et économique.

Des modèles possibles.

Une cible de réduction de 40% des gaz à effets de serre est ambitieuse, mais pas sans précédent. En effet, la Suède et l'Allemagne proposent une réduction 40 %, alors que le Royaume-Uni vise 34%, la Norvège et les Pays-Bas visent 30 % et le Japon 25%.

Deux plans ambitieux de réduction de la consommation d'énergie et de réduction de gaz à effet de serre m'apparaissent particulièrement pertinents. Il s'agit du plan suédois d'indépendance énergétique et du projet suisse de société à 2000 W.

Le plan suédois, proposé en 2006 (Persson et al. 2006) a pour objectif que la Suède devienne indépendant des importations de pétrole en 2020. Plusieurs points de ce plan peuvent être appliqués au Québec.

- Viser une réduction de 40-50 de la consommation de pétrole dans le transport routier. Ce gain est obtenu par l'augmentation de l'efficacité des voitures de 25-50%. Il est à noter que la différence de consommation d'essence entre la flotte québécoise et européenne (10,1 ℓ/100 km vs 7,5ℓ/100 km) est de cet ordre de grandeur et que si le Québec adoptait les nouvelles normes de consommation européennes ont arriverait facilement à atteindre cet objectif. Dans les secteurs des transports, la Suède vise aussi à renforcer le ferroutage et le cabotage.
- La mise en place d'un système de transport en commun peu coûteux et efficace. L'objectif est de faire croître de 30% ce type de transport. En parallèle, le *réseau* de trains rapides sera renforcé.
- Aucun chauffage à l'huile dans les édifices publics et privés après 2020.
- Une réduction de 25%-40% de la consommation de pétrole est visée pour l'industrie. Ce gain serait essentiellement obtenu par des mesures d'efficacité énergétique et par la récupération de chaleur résiduelle.

Le projet suisse de société à 2000 W (Maréchal et al. 2005) possède un objectif plus large : celui de réduire la consommation d'énergie primaire totale de la Suisse de 5000 W/h aujourd'hui à 2000 W/h en 2050; ce qui revient à ramener le niveau de consommation d'énergie tel qu'il était dans les années soixante. Il vise aussi à réduire à 1 tonne l'émission de CO₂ par habitant en 2050.

Les chercheurs suisses visent une réduction de 80% de la demande en énergie des édifices. Cette perspective est basée sur l'adoption du standard des maisons solaires passives sera atteint d'ici dix ans pour les nouvelles propriétés d'ici 10 ans et pour la mise à niveau des édifices existants d'ici 20 ans. Des économies d'énergie de 20% à 85%, pour une moyenne de 65%, sont possibles au niveau industriel. Du côté des voitures, un potentiel d'économie de 70% a été identifié. La mise en place d'un réseau trains rapides très efficaces énergétiquement afin de réduire le transport aérien et les déplacements en voiture. Dans le cas des camions, les économies ne sont pas aussi importantes, car ils sont déjà opérés de façon plus efficace. Néanmoins, des économies de 30% pour les autobus et 60% pour les camions légers.

Des gains sont aussi attendus par le recyclage et la réutilisation de matériaux dont la production nécessite beaucoup d'énergie : papier, verre, asphalte et plastiques. La substitution de ces matériaux par des nouveaux matériaux ou de nouvelles technologies. L'utilisation plus efficace des matériaux et un usage plus intensif des véhicules et de la machinerie (usage fractionné) sont d'autres pistes de solutions. Dans tous les cas, une analyse système incluant l'analyse de cycle de vie est une nécessité.

Les Québécois gaspillent-ils l'énergie?

Comment se compare la consommation énergétique des Québécois par rapport au reste du monde. En Suède et en Suisse, la consommation moyenne dans le secteur résidentiel est de 170 kWh/m² (Persson et al 2006 ; Maréchal et al 2005) au Canada la moyenne est de 190 kWh/m². Compte tenu du climat, la différence est minime!

Les pièges à éviter

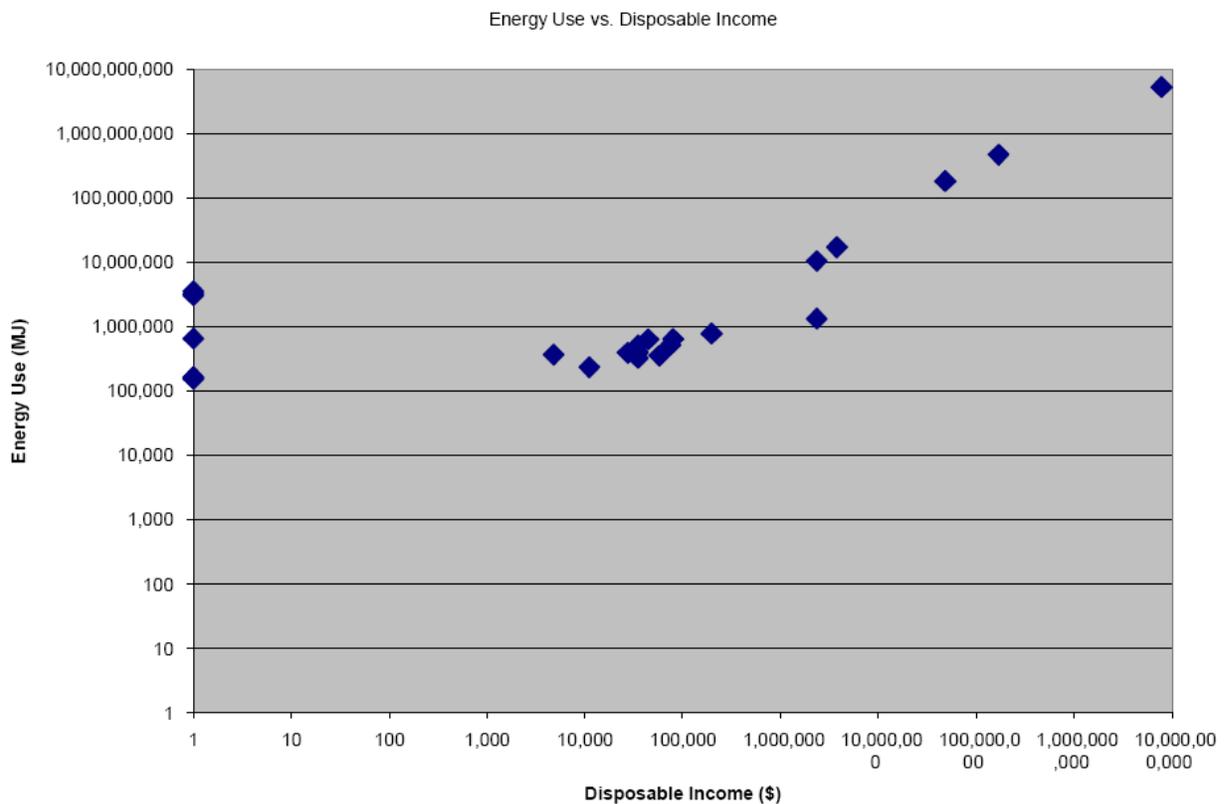
L'efficacité énergétique peut sembler une solution simple, mais elle en pratique elle demande de la planification pour être efficace. En effet, une amélioration de l'efficacité énergétique peut entraîner une augmentation de la consommation d'énergie globale. Ce phénomène a été observé pour la première par l'économiste anglais Stanley Jevons (Jevons 1865). Jevons avait remarqué que les machines à vapeur de Watt étaient plus efficaces que celles de Stephenson, mais que la consommation de charbon avait augmenté. La cause du phénomène était que les machines plus efficaces rendaient leur utilisation plus économique et par conséquent plus de gens pouvaient se permettre leur utilisation. De même, les économies réalisées dans un domaine d'activité économique peuvent se répercuter par une augmentation des activités dans un autre domaine de l'économie et entraîner une augmentation de la consommation totale. Ce phénomène est connu sous le nom de postulat de Khazzoom-Brookes (Brookes 1990; Khazzoom 1980). Afin d'éviter ces phénomènes, l'effort doit être coordonné et la consommation doit être restreinte par des mécanismes législatifs.

Un autre piège est d'attendre le développement de nouvelles technologies pour agir. Le développement et la mise en place de ces technologies prennent du temps. Or, s'il y a une chose qui manque, c'est bien le temps dans le cas qui nous préoccupe. De plus, la grande majorité des technologies nécessaires sont déjà disponibles; une bonne partie d'entre elles ayant été développées lors des chocs pétroliers des années 70. De plus, certaines nouvelles technologies (panneau solaire photovoltaïque, voitures électriques, pile à hydrogène, etc.) sont fortement dépendantes de la disponibilité de métaux rares (Platine, palladium, rhodium, cuivre, zinc, indium, gallium, étain, antimoine, tantale, cadmium, tellure, zirconium) dont la disponibilité n'est pas assurée à long terme (Anderson 2001; Gordon, Bertram & Graedel 2006 ; Alonso et al. 2007 ; Ragnasdóttir 2008 ; Diederer 2009)

Un autre piège est l'exportation du problème à l'étranger hors des comptes nationaux. En effet, il ne sert pas à grand-chose de faire une amélioration ici, si cela se traduit par un déplacement de la production vers un pays qui pollue encore plus. Ce problème a d'ailleurs été abordé par le commissaire au développement durable dans son rapport de 2007-2008. Ainsi, en tenant compte

des échanges économiques transfrontaliers, la trace environnementale du Québec passe de 6.0 ha/h à 7 ha/h en tenant compte des importations. De même, la moitié de la croissance de la production de CO₂ en Chine s'explique par l'augmentation des exportations (Guan et al. 2009).

Le dernier piège est celui des infrastructures qui représente un défi de taille. En effet, quand nous avons vu précédemment, s'il y a des gains importants à espérer dans le domaine du bâtiment, c'est dernier seront long à mettre en place. L'inertie des infrastructures est un des facteurs structuraux limitant les économies d'énergie. En effet, même si on adopte un style de vie frugal passé un certain point ce sont les infrastructures qui déterminent notre trace environnementale. Ainsi, une étude produite par Gutowski et al. (2008) a clairement montré qu'il existe un seuil de trace environnementale en bas duquel il est impossible de descendre. Ainsi, un moine bouddhiste et un sans-abri ont tout de même une trace environnementale significative malgré leur mode de vie des plus modeste. Un politique de développement durable doit donc s'attaquer aussi à ce problème.



Consommation d'énergie en fonction du revenu (tiré de Gutowski et al. (2008))

Politique suggérée pour le Québec

Afin d'atteindre les objectifs en matière de changement climatique ainsi que pour protéger l'économie du Québec d'un choc pétrolier, tout en respectant le principe d'équité intergénérationnelle et internationale, il est impératif de ***réduire de 40% nos émissions de gaz à effet de serre en 2020*** à partir de l'année de référence de 1990.

Le coût d'un tel plan serait de l'ordre de 30 G\$, soit le double du plan pour un objectif proposé par le gouvernement du Québec dans le cas de la cible de -20%. Ce montant pourrait être obtenu en planifiant une hausse progressive de la taxe sur le carbone à 110\$/t en 2020 ou en appliquant aujourd'hui une taxe de 54\$/t. Ce deuxième scénario étant préférable, car il permet de mettre en branle la mesure plus tôt tout en permettant de bénéficier plus rapidement des mécanismes du marché. D'autre part, une mise en place plus rapide des mesures d'économie d'énergie protégera plus efficacement le Québec contre le choc pétrolier attendu. Il est à noter que ce budget correspond à approximativement à la suggestion de sir Nicholas Stern, de consacré ***1 à 2% du PIB*** à la lutte aux changements climatiques.

Avec ce montant, les mesures suivantes devraient être mises en place dans les plus brefs délais :

- Bonification de l'offre de transport en commun le plus rapidement possible. L'ensemble des villes de plus de 20 000 h devrait posséder un service de transport en commun minimal. De plus, il faut envisager la mise en place d'infrastructure de transport lourd (métro, tramway, busway, etc) dans les villes de plus de 150 000 h.
- Il faut mettre à niveau le système de transport par rail dans les plus brefs délais. L'électrification et la mise en place d'un réseau de train de passagers régional sont nécessaires. Des mesures doivent être prises afin de faciliter le transport des marchandises par rail et le cabotage.
- Il faut interdire le chauffage à l'huile et au gaz naturel dans les édifices publics et privés après 2020 sauf dans les régions du Québec non reliées au réseau électrique.
- Il faut pousser au maximum les économies d'énergie dans les entreprises.
- Il faut réformer les pratiques agricoles et la sylviculture afin de maximiser la capture du carbone par les sols.
- Il faut chercher à jumeler les industries fortement consommatrices d'énergie avec des industries ayant besoin de chaleur. Ainsi, le rendement énergétique global du Québec serait sensiblement amélioré, tout en réduisant les coûts de l'énergie pour les deux industries.

Références

M. R. Allen, D. J. Frame, C. Huntingford, C. D. Jones, J. A. Lowe, M. Meinshausen & N. Meinshausen, Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne, Vol 458, 30 April, pp. 1163-1166 (2009)

E. Alonso, J. Gregory, F. Field, R. Kirchain, Material Availability and the Supply Chain: Risks, Effects, and Responses, Environmental Science & technology, Vol. 41, No. 19, p.6649 (2007)

B. A. Andersson, Material Constraints on Technology Evolution: The Case of Scarce Metals and Emerging Energy Technologies, Thèse de Ph.D., Chalmers University of Technology and Göteborg University (2001)

L. Brookes, Energy Efficiency and Economic Fallacies, Energy Policy, Vol. 18, No. 2, pp 199-201 (1990)

J. G. Canadell et al., Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. Proc Natl Acad Sci USA 104:18866–18870 (2007)

P. M. Cox et al., Acceleration of global warming due to carbon cycle feedbacks in a coupled climate model. Nature 408:184–187. (2000)

A.M. Diederer, Metal minerals scarcity: A call for managed austerity and the elements of hope, TNO Defence, Security and Safety, March 10, 2009

E. Dorrepaal et al., Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic. Nature 460:616–619 (2009)

Y. Dutil, Une crise énergétique annoncée : Les Choix et le Défi du Québec à l'horizon 2025, présenté à la Commission de l'Économie et du Travail de l'Assemblée Nationale du Québec, Le secteur énergétique au Québec - Contexte, enjeux et questionnements Janvier 2005 (Audition 26 janvier 2005)

M. H. England, A. S. Gupta, A. J. Pitman, Constraining future greenhouse gas emissions by a cumulative target, PNAS, September 29, vol. 106, no. 39, pp. 16539–16540 (2009)

A. L. Fredeen, J. D. Waughtal, T. G. Pypker, When do replanted sub-boreal clearcuts become net sinks for CO₂?, Forest Ecology and Management 239, pp. 210–216 (2007)

P. Friedlingstein et al., Climate–carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP model intercomparison, J. Clim. 19:3337–3353. (2006)

M.-A. Giasson, C. Coursolle, H. A. Margolis, Ecosystem-level CO₂ fluxes from a boreal cutover in eastern Canada before and after scarification, Agricultural and Forest Meteorology, pp. 23–40 (2006)

- R. B. Gordon, M. Bertram, T. E. Graedel, Metal stocks and sustainability, PNAS, vol. 103, no. 5 pp. 1209–1214 (2006)
- C. M. Gough, C. S. Vogel, K. H. Harrold, K. Georges, P. S. Curtis, The legacy of harvest and fire on ecosystem carbon storage in a north temperate forest, *Global Change Biology* 13, pp. 1935–1949 (2007)
- D. Guan, G. P. Peters, C. L. Weber, K. Hubacek Journey to world top emitter: An analysis of the driving forces of China's recent CO₂ emissions surge, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L04709 (2009)
- T. Gutowski et al., Environmental Life Style Analysis (ELSA), IEEE International Symposium on Electronics and the Environment May 19-20, 2008, San Francisco USA
- J. Hansen et al., Target Atmospheric CO₂: Where Should Humanity Aim?, *Open Atmospheric Science Journal*, (2008)
- R. L. Hirsch, R. Bezdek, R. Wendling, Uncertainty about Future Oil Supply Makes It Important to Develop a Strategy for Addressing a Peak and Decline in Oil Production PEAKING OF WORLD OIL PRODUCTION: IMPACTS, MITIGATION, & RISK MANAGEMENT. Février 2005
- J. I House, C. Huntingford, W. Knorr, S. E Cornell, P. M. Cox, G. R. Harris, C. D Jones, J. A. Lowe, I. C. Prentice, What do recent advances in quantifying climate and carbon cycle uncertainties mean for climate policy? *Environ. Res. Lett.* 3, 044002 (2008)
- W. S. Jevons, *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal-Mines* Published: London: Macmillan and Co. (1865)
- J. M.-F. Johnson, A. J. Franzluebbers, S. L. Weyers, D. C. Reicosky, Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions, *Environmental Pollution* 150 (2007), pp. 107-124
- F. Joos, M. Bruno, R. Fink, T.F. Stocker, U. Siegenthaler, C. Le Quere, and J.L. Sarmiento, An efficient and accurate representation of complex oceanic and biospheric models of anthropogenic carbon uptake, *Tellus*, 48B 397-417. (1996)
- J. D. Khazzoom, Economic Implications of Mandated Efficiency Standards for Household Appliances, *Energy Journal*, Vol.1, No.4, pp21-39 (1980)
- A. Knohl, E.-D. Schulze & C. Wirth, Biosphere Exchange of Old-Growth Forest: Process and Pattern, dans *Old-Growth Forests: Function, Fate and Value*, C. Wirth, G. Gleixner & M. Heimann Eds., Springer, page 146 (2009)
- P. Kolari, J. Pumpanen, U. Rannik, H. Ilvesniemi, F. Berninger, Carbon balance of different aged Scots pine forests in Southern Finland. *Glob. Change Biol.* 10, 1106–1119 (2004)

M. Litvak, S. Miller, S. C. Wofsy., M. Goulden., Effect of stand age on whole ecosystem CO₂ exchange in the Canadian boreal forest. *J. Geophys. Res.* 108 (D3), p. 8225 (2003)

J. A. Lowe, C. Huntingford, S. C. B. Raper, C. D. Jones, S. K. Liddicoat, L. K. Gohar, How difficult is it to recover from dangerous levels of global warming? *Environ. Res. Lett.* 4, 014012 (2009)

F. Maréchal, D. Favrat, E. Jochem, Energy in the perspective of the sustainable development : the 2000 W society challenge, *Resources, Conservation and Recycling* Volume 44, Issue 3, pp. 245-262 (2005)

H. D. Matthews, N. P. Gillett, P. A. Stott, K. Zickfeld, The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions, *Nature*, Vol 459| 11 June 2009, pp. 829-833 (2009)

M. Meinshausen et al. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C. *Nature* 458:1158–1162. (2009)

M. Parry, J. Palutikof, C. Hanson, J. Lowe, Squaring up to reality nature reports climate change, Vol. 2, (2008)

C. Peng., H. Jiang, M. J. Apps, Y. Zhang, Effects of harvesting regimes on carbon and nitrogen dynamics of boreal forests in central Canada: a process model simulation, *Ecological Modelling* 155, pp. 177-/189 (2002)

G. Persson et al., Making Sweden an OIL-FREE Society, Commission on Oil Independence, 21 June 2006

K. V. Ragnasdóttir, Rare metals getting rarer, *Nature geoscience*, Vol 1, Novembre 2008
Rapport du Vérificateur général à l'Assemblée nationale pour l'année 2007-2008, tome II - Rapport du commissaire au développement durable

J. L. Sarmiento et al., Simulated response of the ocean carbon cycle to anthropogenic climate warming. *Nature* 393:245–249. (1998)

N. Stern, *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge, UK: Cambridge University Press. 692. (2007)

UK Energy Research Centre, An assessment of the evidence for a near-term peak in global oil production (2009)

K. Zickfeld, M. Eby, H. D. Matthews, A. Weaver, Setting cumulative emissions targets to reduce the risk of dangerous climate change. *Proc Natl Acad Sci USA* 106:16129–16134. (2009)